

# Bestimmung der Potenziale und Ausarbeitung von Strategien zur verstärkten Nutzung von erneuer- baren Energien in Luxemburg

## Endbericht

### Autoren:

Peter Biermayr  
Clemens Cremer  
Thomas Faber  
Lukas Kranzl  
Mario Ragwitz  
Gustav Resch  
Felipe Toro

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fh-ISI)

Energy Economics Group, TU Wien (EEG)

BSR-Sustainability

Karlsruhe, 26. März 2007



Ansprechpartner:

Dr. rer. nat. Mario Ragwitz

Breslauer Str. 48, D-76139 Karlsruhe, Tel. +49 721 / 6809-157, Fax -272

E-Mail: [Mario.Ragwitz@isi.fhg.de](mailto:Mario.Ragwitz@isi.fhg.de)

Dr. sc. techn. Clemens Cremer

Breslauer Str. 48, D-76139 Karlsruhe, Tel. +49 721 / 6809-256, Fax -272

E-Mail: [Clemens.Cremer@isi.fhg.de](mailto:Clemens.Cremer@isi.fhg.de)



---

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 Vorbemerkungen.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Überblick über die Methoden .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Aktueller Status der Erneuerbaren Energien.....</b>	<b>5</b>
3.1 Entwicklung des Energieverbrauchs .....	5
3.2 Erneuerbare Stromerzeugung.....	6
3.2.1 Wasserkraft.....	8
3.2.2 Windenergie .....	9
3.2.3 Photovoltaik.....	10
3.2.4 Biogas .....	11
3.2.5 Organischer Anteil des Hausmülls .....	13
3.3 Erneuerbare Wärmeerzeugung.....	14
3.3.1 Biomasse zur Wärmeerzeugung.....	15
3.3.2 Solarthermische Wärmeerzeugung.....	19
3.3.3 Wärmepumpen.....	20
3.4 Biokraftstoffe .....	20
<b>4 Aktuelle Fördermaßnahmen und Rahmenbedingungen der erneuerbaren Energien.....</b>	<b>22</b>
4.1 Fördermaßnahmen für erneuerbare Energien.....	22
4.1.1 Detaillierte Beschreibung der Fördermaßnahmen.....	23
4.2 Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien .....	38
4.2.1 Allgemeines zum Genehmigungsrecht.....	39
4.2.2 Wasserkraft.....	40
4.2.3 Windkraft .....	40
4.2.4 Heizungsanlagen mit Biomassefeuerung .....	42
4.2.5 Biogas .....	43
4.2.6 Solaranlagen .....	44

---

4.2.7	Geothermie .....	44
4.2.8	Überblick über förderlich wirkende und hemmend wirkende Aspekte der rechtlichen Rahmendbedingungen .....	45
<b>5</b>	<b>Potenziale und Kosten der erneuerbaren Energien .....</b>	<b>46</b>
5.1	Untersuchungsgegenstand, Definitionen und Daten .....	52
5.1.1	Untersuchungsgegenstand .....	53
5.1.2	Definition der Potenziale .....	56
5.1.3	Wesentliche allgemeine Annahmen .....	57
5.2	Biomasse – feste biogene Energieträger .....	58
5.2.1	Allgemeine Aspekte der Biomassenutzung .....	58
5.2.2	Potenziale im Bereich nachwachsendes Energieholz .....	65
5.2.3	Potenziale im Bereich Alt- und Restholz .....	77
5.2.4	Potenziale im Bereich Energiepflanzen (ein- und mehrjährige) .....	81
5.2.5	Potenziale im Bereich biogener Müllanteil für die thermische Verwertung .....	85
5.2.6	Potenziale im Bereich feste landwirtschaftliche Reststoffe .....	88
5.2.7	Potenziale im Bereich Klärschlammnutzung .....	90
5.2.8	Zusammenfassung Potenziale fester biogener Energieträger .....	92
5.2.9	Kosten der Bereitstellung und Nutzung fester biogener Energieträger.....	96
5.3	Biomassenutzung - flüssige biogene Energieträger .....	101
5.3.1	Energiepflanzen .....	101
5.3.2	Altspeiseölmethylester (AME) .....	106
5.3.3	Zusammenfassung der Potenziale für flüssige biogene Energieträger.....	107
5.3.4	Kosten der flüssigen biogenen Energieträger .....	109
5.4	Biomassenutzung - gasförmige biogene Energieträger .....	110
5.4.1	Biogas allgemein.....	111

---

5.4.2	Das technische Entwicklungspotenzial von Biogas und die Biogas-Direkteinspeisung .....	112
5.4.3	Potenziale im Bereich Gülle .....	113
5.4.4	Potenziale im Bereich Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege .....	115
5.4.5	Potenziale im Bereich Bioabfälle .....	117
5.4.6	Potenziale im Bereich Schlachtabfälle .....	119
5.4.7	Potenziale im Bereich Energiepflanzen .....	121
5.4.8	Potenziale im Bereich Klärgas .....	123
5.4.9	Potenziale im Bereich Deponiegas .....	125
5.4.10	Zusammenfassung der Potenziale im Bereich gasförmige biogene Energieträger .....	125
5.4.11	Kosten der gasförmigen biogenen Energieträger .....	128
5.5	Geothermie .....	129
5.5.1	allgemeine Aspekte der Geothermienutzung .....	129
5.5.2	Geothermipotenziale in Luxemburg .....	130
5.5.3	Kosten der Geothermienutzung .....	133
5.6	Kleinwasserkraft .....	134
5.6.1	Kleinwasserkraftpotenziale in Luxemburg .....	134
5.6.2	Kosten der Kleinwasserkraftnutzung .....	139
5.7	Photovoltaik .....	139
5.7.1	Allgemeine Aspekte der Photovoltaiknutzung in Luxemburg .....	139
5.7.2	Potenziale aus Photovoltaik in Luxemburg .....	140
5.7.3	Kosten der Photovoltaiknutzung .....	146
5.8	Solarthermie .....	147
5.8.1	Allgemeine Aspekte der Solarthermie .....	147
5.8.2	Potenziale aus Solarthermie .....	148
5.8.3	Kosten der Solarthermie .....	155
5.9	Wärmepumpen .....	156
5.9.1	Allgemeine Aspekte der Wärmepumpen .....	156
5.9.2	Potenziale aus Wärmepumpen .....	157
5.9.3	Kosten der Wärmepumpentechnologie .....	163

---

5.10	Windkraft .....	164
5.10.1	Allgemeine Aspekte der Windkraft .....	164
5.10.2	Potenziale aus Windkraft.....	166
5.10.3	Kosten der Windkraftnutzung .....	171
<b>6</b>	<b>Szenarien und Zielpfade .....</b>	<b>174</b>
6.1	Szenariendefinition.....	174
6.2	Rahmenannahmen.....	175
6.2.1	Energiebedarf.....	175
6.2.2	Referenzenergiepreise .....	177
6.2.3	Kosten und Potenziale erneuerbarer Energien .....	178
6.2.4	Eingangsparameter allgemeiner Natur.....	179
6.2.5	Annahmen bezüglich der Förderpolitiken .....	181
6.3	Ergebnisse .....	181
6.3.1	Das wirtschaftliche Realisierungspotenzial erneuerbarer Energien .....	182
6.3.2	Das Business-as-usual (BAU) Szenario.....	186
6.3.2.1	Der künftige Ausbau erneuerbarer Energien.....	186
6.3.2.2	Resultierende Förderkosten .....	190
6.3.2.3	Vermiedene CO <sub>2</sub> Emissionen.....	193
6.3.2.4	Vermiedener Einsatz fossiler Energien .....	194
6.3.2.5	Sensitivitätsanalyse.....	194
6.3.3	Szenario: Verstärkte Anstrengungen .....	197
6.3.3.1	Der künftige Ausbau erneuerbarer Energien.....	199
6.3.3.2	Resultierende Förderkosten .....	204
6.3.3.3	Vermiedene CO <sub>2</sub> Emissionen.....	207
6.3.3.4	Vermiedener Einsatz fossiler Energien .....	208
6.3.3.5	Sensitivitätsanalyse.....	208
<b>7</b>	<b>Kosten-Nutzen Analyse .....</b>	<b>213</b>
7.1	Szenarienvergleich.....	213
7.2	Technologievergleich .....	220

---

<b>8 Strategien zur Umsetzung der Ausbauziele und Politikempfehlungen .....</b>	<b>223</b>
<b>9 Literatur .....</b>	<b>226</b>
<b>10 Anhang I - Einheiten .....</b>	<b>231</b>
<b>11 Anhang II - Biogas Direkteinspeisung.....</b>	<b>232</b>

## Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 2-1: Illustration der verschiedenen Potenzialdefinitionen .....	3
Abbildung 3-1: Historische Entwicklung des Bruttoinlandverbrauchs von Luxemburg nach Energieträgern; Datenquelle: Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur, Direction de l'énergie et des communications; Grafik: eigene Berechnungen.....	5
Abbildung 3-2: Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien in Luxemburg von 1990 bis 2005; Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR .....	6
Abbildung 3-3: Installierte Kapazität erneuerbaren Energien im Stromsektor in Luxemburg von 1990 bis 2005; Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR .....	7
Abbildung 3-4: Installierte Kapazität pro Anlage im Bereich Biogas von 1997 bis 2006 .....	12
Abbildung 3-5: Entwicklung des Luxemburger Haushaltsmüllaufkommens.....	13
Abbildung 3-6: In Luxemburg im Zeitraum 2001 bis 2005 bezuschusste automatisierte biogene Heizsysteme .....	16
Abbildung 3-7: Kumulierte Leistung der im Zeitraum 2001 bis 2005 in Luxemburg bezuschussten automatisierten biogenen Heizsysteme .....	17
Abbildung 3-8: Installierte Kapazität von Holzhackschnitzelheizungen von 1997 .....	17
Abbildung 4-1: Grafische Darstellung der Höhe der Einspeisevergütung nach der Verordnung vom 14.10.2005 in Abhängigkeit der installierten Leistung. ....	27
Abbildung 5-1: Status quo Erneuerbare Energie und realisierbare Potenziale 2010/2020 in Luxemburg .....	47
Abbildung 5-2: Anteilsmäßige Struktur der Potenzialtypen nach Potenzialgruppen .....	50
Abbildung 5-3: Die Potenziale der „Stromtechnologien“ Kleinwasserkraft, Photovoltaik und Windkraft.....	51
Abbildung 5-4: Die Potenziale der „Wärmetechnologien“ .....	52

---

Abbildung 5-5:	Landkarte Luxemburg .....	55
Abbildung 5-6:	Überblick über Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energie und mögliche Energiedienstleistungen.....	56
Abbildung 5-7:	Verteilung der Landesfläche von Luxemburg auf unterschiedliche Flächentypen .....	61
Abbildung 5-8:	Waldflächen in Luxemburg .....	67
Abbildung 5-9:	In Luxemburg im Zeitraum 2001 bis 2005 bezuschusste automatisierte biogene Heizsysteme .....	74
Abbildung 5-10:	Kumulierte Leistung der im Zeitraum 2001 bis 2005 in Luxemburg bezuschussten automatisierten biogenen Heizsysteme .....	74
Abbildung 5-11:	Installierte kumulierte Leistung von Hackschnitzelkessel in Luxemburg.....	75
Abbildung 5-12:	Verwendungskategorien von Alt- und Restholz aus Luxemburg .....	79
Abbildung 5-13:	Verteilung der Nutzungsorte von luxemburgischem Alt- und Restholz .....	79
Abbildung 5-14:	Entwicklung der Luxemburger Landwirtschaftsflächen;.....	82
Abbildung 5-15:	Entwicklung des Luxemburger Haushaltsmüllaufkommens.....	86
Abbildung 5-16:	Darstellung der Potenzialkategorien nach Rohstofftypen.....	94
Abbildung 5-17:	Darstellung des Status quo im Jahr 2005 .....	94
Abbildung 5-18:	Abbildung 5.2.18: Darstellung des realisierbaren Potenzials bis zum Jahr 2010.....	95
Abbildung 5-19:	Darstellung des realisierbaren Potenzials bis zum Jahr 2020 .....	95
Abbildung 5-20:	Mittlere Investitionskosten für Biomassekessel .....	100
Abbildung 5-21:	Lernkurve der Ethanolproduktion in Brasilien .....	105
Abbildung 5-22:	Potenziale für flüssige biogene Energieträger in Luxemburg .....	109
Abbildung 5-23:	Größenverteilung der luxemburgischen Kläranlagen nach Anlagentyp .....	123
Abbildung 5-24:	Darstellung der Potenziale im Bereich gasförmiger biogener Energieträger .....	126

---

Abbildung 5-25:	Status quo der gasförmigen biogenen Energieträger in Luxemburg im Jahr 2005 .....	127
Abbildung 5-26:	Potenzial 2010 der gasförmigen biogenen Energieträger in Luxemburg .....	127
Abbildung 5-27:	Potenzial 2020 der gasförmigen biogenen Energieträger in Luxemburg .....	128
Abbildung 5-28:	Einschränkungen bei der Durchführung von Tiefbohrungen in Luxemburg .....	132
Abbildung 5-29:	Lernkurve der Photovoltaik-Technologie im Vergleich mit anderen Technologien .....	143
Abbildung 5-30:	Entwicklung der durchschnittlichen Kostenstrukturen von Photovoltaikanlagen im deutschen Photovoltaikmarkt .....	144
Abbildung 5-31:	Szenario zur weiteren Diffusion der Solarthermie in Luxemburg bis 2020 .....	154
Abbildung 5-32:	Zonen gleicher Windgeschwindigkeiten in Luxemburg.....	165
Abbildung 5-33:	Lernkurven unterschiedlicher Technologien; Quelle: Green (2005).....	169
Abbildung 5-34:	Anteilige Kosten eines 1,8 MW-Windkraftprojektes im Jahr 2000 in Österreich.....	173
Abbildung 6-1:	Primärenergiepreise für Öl, Erdgas und Kohle .....	177
Abbildung 6-2:	Endenergiepreise ohne Steuern für das Referenzszenario.....	177
Abbildung 6-3:	Resultierende technologiespezifische Kostenreduktionen durch technologisches Lernen im Referenzfall sowie bei beschleunigtem Ausbau erneuerbarer Energien.....	180
Abbildung 6-4:	Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene gemäß dem <i>wirtschaftlichen Realisierungspotenzial</i> .....	183
Abbildung 6-5:	EE-Energieerzeugung auf sektoraler Ebene gemäß dem <i>wirtschaftlichen Realisierungspotenzial</i> . Aufgeschlüsselt hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung (links) sowie im Hinblick auf sektorale Anteile im Jahr 2020 (rechts).....	184
Abbildung 6-6:	Entwicklung der EE-Wärmeproduktion auf Technologieebene gemäß dem <i>wirtschaftlichen</i>	

	<i>Realisierungspotenzial</i> .....	184
Abbildung 6-7:	Entwicklung des notwendigen Aufpreises pro MWh Gesamtnachfrage auf sektoraler Ebene für bereits bestehende EE-Anlagen (gemäß dem <i>wirtschaftlichen Realisierungspotenzial</i> ).....	185
Abbildung 6-8:	Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das <i>BAU-Szenario</i> .....	186
Abbildung 6-9:	Entwicklung der direkten Förderkosten für EE gemäß <i>BAU-Szenario</i> .....	191
Abbildung 6-10:	Entwicklung des notwendigen Aufpreises pro MWh Gesamtnachfrage auf sektoraler Ebene zur Erreichung des Ausbaus EE gemäß <i>BAU-Szenario</i> .....	192
Abbildung 6-11:	Entwicklung der direkten Förderkosten für EE im Stromsektor gemäß <i>BAU-Szenario</i> .....	192
Abbildung 6-12:	Entwicklung der vermiedenen CO <sub>2</sub> -Emissionen verbunden mit dem Ausbau EE gemäß <i>BAU-Szenario</i> .....	193
Abbildung 6-13:	Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das <i>BAU-Szenario</i> im Falle einer Steigerung von Energieeffizienzmaßnahmen .....	196
Abbildung 6-14:	Energieerzeugung aus neuen EE-Anlagen (2006 bis 2020) bei Beibehaltung derzeitiger (BAU) Förderpolitiken, verbunden mit massivem Barrierenabbau und erhöhter Investitionssicherheit .....	198
Abbildung 6-15:	Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das Szenario „ <i>verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)</i> “.....	199
Abbildung 6-16:	Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das Szenario „ <i>verstärkte Anstrengungen (Kyoto)</i> “.....	200
Abbildung 6-17:	Entwicklung der direkten Förderkosten für EE gemäß dem Szenario „ <i>verstärkte Anstrengungen</i> “, aufgeschlüsselt nach Varianten: „ <i>(Erneuerbare)</i> “ (links) und „ <i>(Kyoto)</i> “ (rechts).....	204
Abbildung 6-18:	Entwicklung des notwendigen Aufpreises pro MWh Gesamtnachfrage auf sektoraler Ebene zur Erreichung des Ausbaus EE gemäß dem Szenario „ <i>verstärkte Anstrengungen</i> “, aufgeschlüsselt nach Varianten:	

---

	„(Erneuerbare)“ (links) und „(Kyoto)“ (rechts) .....	205
Abbildung 6-19:	Entwicklung der direkten Förderkosten für EE im Stromsektor gemäß dem Szenario „ <i>verstärkte Anstrengungen</i> “, aufgeschlüsselt nach Varianten: „(Erneuerbare)“ (links) und „(Kyoto)“ (rechts) .....	206
Abbildung 6-20:	Entwicklung der vermiedenen CO <sub>2</sub> -Emissionen verbunden mit dem Ausbau EE gemäß dem Szenario „ <i>verstärkte Anstrengungen</i> “, aufgeschlüsselt nach Varianten: „(Erneuerbare)“ (links) und „(Kyoto)“ (rechts).....	207
Abbildung 6-21:	Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene gemäß des Szenarios „ <i>verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)</i> “ im Falle einer <i>gestiegenen Energienachfrage</i> .....	210
Abbildung 7-1:	Szenarienvergleich: Resultierende Energieerzeugung im Jahr 2020 aus im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichteten EE-Anlagen.....	214
Abbildung 7-2:	Szenarienvergleich: Prozentuale Anteile EE am sektoralen bzw. primärenergetischen Energieverbrauch im Jahr 2020.....	214
Abbildung 7-3:	Szenarienvergleich: Kumulierte (diskontierte) Förderkosten für im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete EE-Anlagen.....	216
Abbildung 7-4:	Szenarienvergleich: Vermiedene CO <sub>2</sub> Emissionen im Jahr 2020 – durch im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete EE-Anlagen.....	217
Abbildung 7-5:	Szenarienvergleich: Vermiedene fossile Energie im Jahr 2020 – durch im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete EE-Anlagen.....	218
Abbildung 7-6:	Szenarienvergleich: Resultierende Energieerzeugung im Jahr 2020 im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichteter EE-Anlagen, aufgeschlüsselt nach EE-Technologie .....	221

## Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 3-1: Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien 1997 und 2005 in GWh.....	7
Tabelle 3-2: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Wasserkraftwerken in Luxemburg zwischen 2001 und 2005.....	8
Tabelle 3-3: Installierte Kapazität und Fluss von Wasserkraftwerken in Luxemburg.....	8
Tabelle 3-4: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Windkraftwerken in Luxemburg zwischen 2001 und 2005.....	10
Tabelle 3-5: Installierte Kapazität, Standort und Betreiber von Windkraftanlagen in Luxemburg.....	10
Tabelle 3-6: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Photovoltaikanlagen in Luxemburg zwischen 2001 und 2005;.....	11
Tabelle 3-7: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Photovoltaikanlagen in Luxemburg zwischen 2001 und 2005.....	12
Tabelle 3-8: Installierte Kapazität und Stromerzeugung aus biogenem Müll in Luxemburg zwischen 2001 und 2005.....	14
Tabelle 3-9: Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien 2000 und 2005.....	15
Tabelle 3-10: Zusammenfassung des Status Quo bei der Nutzung von Energieholz in Luxemburg.....	17
Tabelle 3-11: Holzhackschnitzelanlagen in Luxemburg; Quelle: Luxemburger Forstverwaltung - Administration des Eaux et Forêts.....	18
Tabelle 3-12: Über die Verordnung vom 17. Juli 2001 und die Verordnung vom 3. August 2005 bezuschusste solarthermische Anlagen von Privatpersonen in Luxemburg.....	19
Tabelle 3-13: Produktion von Biotreibstoffen 2004 und 2005 in GWh.....	20
Tabelle 3-14: Biokraftstoffanteil 2004 und 2005 - Luxemburg.....	21

---

Tabelle 4-1:	Netzeinspeisetarife entsprechend den verschiedenen RES-Technologien.....	28
Tabelle 4-2:	Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005, Bereich Solarthermie .....	32
Tabelle 4-3:	Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005, Bereich Biomasse .....	33
Tabelle 4-4:	Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005, Bereich PV .....	34
Tabelle 4-5:	Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005, Bereich Wärmepumpen .....	35
Tabelle 4-6:	Details zum Gesetz vom 22. Februar 2004 .....	36
Tabelle 4-7:	Details zum Gesetz vom 30. Juni 2004 .....	37
Tabelle 4-8:	Details zum Gesetz vom 24. Juli 2001 zur Unterstützung der ländlichen Entwicklung .....	38
Tabelle 5-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Potentialberechnung; Quelle: eigene Berechnungen .....	48
Tabelle 5-2:	Flächenerträge unterschiedlicher Pflanzenarten .....	59
Tabelle 5-3:	Zuwachsraten des öffentlichen Waldes in Deutschland .....	59
Tabelle 5-4:	Einteilung des Sektors Biomasse nach Stoffgruppen: .....	62
Tabelle 5-5:	Maßeinheiten für Brennholz.....	63
Tabelle 5-6:	Umrechnungszahlen gebräuchlicher Brennholzsortimente .....	63
Tabelle 5-7:	Definition der Größenklassen von Holzhackschnitzel.....	64
Tabelle 5-8:	Waldflächen in Luxemburg .....	66
Tabelle 5-9:	Abschätzung des Flächenpotenzials zur Berechnung des technischen Potenzials fester biogener Biomasse aus Holz. ....	68
Tabelle 5-10:	Status quo der Waldnutzung in Luxemburg.....	72
Tabelle 5-11:	Zusammenfassung der Potenzialabschätzung Energieholz in Luxemburg .....	77
Tabelle 5-12:	Produktion, Import und Export von Holz in Luxemburg im Jahr 2003 .....	78
Tabelle 5-13:	Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich fester biogener Energieträger .....	93

---

Tabelle 5-14:	Kosten der Brennholzerzeugung in Österreich .....	97
Tabelle 5-15:	Mittlere Investitionskosten für Pelletskessel mit manueller Brennstoffzufuhr (Tages- bis Wochenspeicher) .....	99
Tabelle 5-16:	Mittlere Investitionskosten für Pelletskessel mit automatischer Brennstoffzufuhr (automatische Austrag aus Lagerraum).....	99
Tabelle 5-17:	Mittlere Investitionskosten für Hackschnitzelfeuerungen mit automatischer Brennstoffzufuhr (automatische Austrag aus Lagerraum) .....	99
Tabelle 5-18:	Mittlere Investitionskosten für Scheitholzfeuerungen.....	100
Tabelle 5-19:	Kostenfunktionen von mittleren und großen Biomasse-Anlagen.....	101
Tabelle 5-20:	Zusammenfassung der Potenziale für flüssige biogene Energieträger .....	108
Tabelle 5-21:	Biogaserträge für verschiedene Substrate in m <sup>3</sup> /t organische Trockensubstanz (TS) .....	112
Tabelle 5-22:	Viehbestand in Luxemburg im Jahr 2003 .....	113
Tabelle 5-23:	Abschätzung des theoretischen Potenzials aus Gülle .....	114
Tabelle 5-24:	Sammelinfrastruktur für Bioabfälle in Luxemburg .....	117
Tabelle 5-25:	Im Jahr 2004 in Luxemburg geschlachtete Tiere (in Tonnen Schlachtgewicht).....	119
Tabelle 5-26:	Schlachthofabfälle in Luxemburg.....	120
Tabelle 5-27:	Luxemburger Kläranlagen mit BHKW .....	124
Tabelle 5-28:	Zusammenfassung der Potenziale im Bereich gasförmige biogene Energieträger.....	126
Tabelle 5-29:	Spezifische Kosten der Rohgaserzeugung nach Anlagentyp .....	129
Tabelle 5-30:	Solarstrahlungsangebot in Luxemburg.....	139
Tabelle 5-31:	Annahmen für die Berechnung des Nutzwärmeertrages von solarthermischen Anlagen.....	148
Tabelle 5-32:	Über die Verordnung vom 17. Juli 2001 und die Verordnung vom 3. August 2005 bezuschusste solarthermische Anlagen von Privatpersonen in Luxemburg.....	153
Tabelle 5-33:	Investitionskosten von solarthermischen Anlagen in	

---

	Österreich .....	156
Tabelle 5-34:	Entziehbare Wärmeleistung aus dem Erdreich.....	158
Tabelle 5-35:	Richtwerte für den maximalen Wärmeentzug aus dem Erdreich durch Erdsonden .....	158
Tabelle 5-36:	Annahmen zur Berechnung des Nutzwärmeertrages der in Österreich installierten Wärmepumpen.....	160
Tabelle 5-37:	Typische Leistungsdaten von Windkraftanlagen .....	167
Tabelle 5-38:	Krankkosten für die Errichtung von Windkraftanlagen.....	171
Tabelle 5-39:	Aufteilung der Gesamt-Projektkosten eines 1,8 MW- Windkraftprojektes im Jahr 2000 in Österreich .....	172
Tabelle 6-1:	Wesentliche Kenngrößen des Endenergieverbrauchs.....	176
Tabelle 6-2:	Energieproduktion aus EE auf Technologieebene bis 2020 für das <i>BAU-Szenario</i> .....	188
Tabelle 6-3:	Ausschöpfung des realisierbaren Potenzials der erneuerbaren Energieträger im Jahr 2010 und 2020 gemäß <i>BAU-Szenario</i> .....	189
Tabelle 6-4:	Energieproduktion aus EE auf Technologieebene bis 2020 für das Szenario „ <i>verstärkte Anstrengungen</i> “, aufgeschlüsselt nach Varianten: „( <i>Erneuerbare</i> )“ (links) und „( <i>Kyoto</i> )“ (rechts).....	201
Tabelle 6-5:	Vergleich der Potenzialausschöpfung im Jahr 2020 gemäß der Szenarien <i>BAU</i> (links) und „ <i>verstärkte</i> <i>Anstrengungen</i> “ (rechts) .....	203
Tabelle 7-1:	Szenarienvergleich: Kosten versus Nutzen des Ausbaus erneuerbarer Energien (Neuinstallationen 2006 bis 2020) (vereinfachte monetäre Betrachtung).....	220
Tabelle 10-1:	Vielfache und Teile von Einheiten; Quelle: DIN 1301 .....	231
Tabelle 10-2:	Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten .....	231
Tabelle 11-1:	Modell-Biogasanlagen in Deutschland.....	233
Tabelle 11-2:	Spezifische Kosten der Rohgaserzeugung nach Anlagentyp.....	235

## 1 Vorbemerkungen

Die Nutzung erneuerbarer, lokal und regional verfügbarer Energiequellen fördert die Entwicklung einer nachhaltigen Energieversorgung. Emissionen von Schadstoffen und Kohlendioxid können eingespart werden. Die Entwicklung und Nutzung von erneuerbaren Energien stärkt die lokale und regionale Wirtschaft und trägt positiv zu sozialen Netzwerken bei. Die Niederlassung von Betrieben, die im Bereich der erneuerbaren Energien tätig sind, kann einen bedeutenden Beitrag zur Diversifizierung der luxemburgischen Wirtschaft leisten. Die Sicherheit der Energieversorgung wird erhöht.

Derzeit müssen ca. 99% der in Luxemburg benötigten Energie importiert werden. Erneuerbare Energiequellen stellen – neben der Verbesserung der Energieeffizienz - die einzige heimische Energieressource dar. Es ist folglich nur durch einen Ausbau dieser Energiequellen möglich den extrem hohen Abhängigkeitsgrad Luxemburgs von Energieimporten zu mindern.

Die Förderung der Nutzung erneuerbarer Energien ist auch im weiteren Zusammenhang mit Strategien, Gesetzen und Richtlinien zu sehen, die auf nationaler und europäischer Ebene verabschiedet wurden und die den Umweltschutz oder die Ressourcensicherheit zum Gegenstand haben. Die wichtigsten darunter sind:

- das Kyoto Protokoll und das Burden Sharing Agreement der EU und die daraus abgeleiteten Minderungsverpflichtungen für Treibhausgasemissionen,
- die Richtlinie 2001/77/EG zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit dem Ziel von 5,7% Strom aus erneuerbaren Energiequellen in 2010 gemessen am Bruttostromverbrauch,
- die Richtlinie 2003/30/EG zur Förderung von Biokraftstoffen im Verkehrssektor,
- die Roadmap der Europäischen Kommission (KOM(2006) 848) zu erneuerbaren Energien
- das Weißbuch KOM(97)599 zu erneuerbaren Energien,
- der Biomasseaktionsplan der europäischen Kommission,
- der CO<sub>2</sub>-Minderungsplan der luxemburgischen Regierung "Changement climatique: Agir pour un défi majeur",
- das Gesetz zur rationellen Energienutzung von 1993.

Ziel der Studie war es Strategien und Handlungsempfehlungen zu entwickeln, die dazu beitragen können, dass die erneuerbaren Energieressourcen in Luxemburg künftig noch effektiver und effizienter ausgenutzt werden. Hierzu wurde zunächst die aktuelle Situation hinsichtlich der bereits bestehenden Nutzung von erneuerbaren Energien und hinsichtlich der bestehenden Förderpolitiken analysiert. Darüber hinaus wurden die Potenziale der erneuerbaren Energien in Luxemburg abgeschätzt. Auf dieser Grundlage wurden angemessene Ziele für die zukünftige Nutzung der identifizierten Potenziale entwickelt sowie Ausbauszenarien zur Erreichung dieser Ziele erstellt. Diese Arbeiten münden in einen Vorschlag für eine Strategie zur Umsetzung für die Zeithorizonte 2010 und 2020.

Auftraggeber für diese Studie sind das Ministerium für Umwelt<sup>1</sup> und das Ministerium für Wirtschaft und Außenhandel<sup>2</sup> Luxemburgs, als nationaler Koordinator agiert die luxemburgische Energieagentur (Agence de l'Energie).

---

1 Ministère de l'Environnement

2 Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur

## 2 Überblick über die Methoden

Das Kernelement der vorliegenden Studie ist die Bestimmung dynamischer Potentiale für erneuerbare Energieträger in den Sektoren Elektrizität, Wärme und Biotreibstoffe. Es wurden sowohl das theoretische und technische Potential als auch das realisierbare Potential für die Jahre 2010 und 2020 bestimmt. Das *theoretische Potenzial* beschreibt das in einer Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot unter der Berücksichtigung einzelner wesentlicher struktureller Restriktionen wie der geografischen Flächenstrukturen. Das *technische Potenzial* beschreibt jenen Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung gegebener technischer und ökologischer Randbedingungen nutzbar ist. Zusätzlich werden dabei detaillierte strukturelle Restriktionen berücksichtigt. Unter dem *realisierbaren Potenzial* erneuerbarer Energie wird der Anteil des technischen Potenzials verstanden, der unter Berücksichtigung von weiteren Hemmnissen und fördernden Faktoren genutzt werden kann. Diese Faktoren sind struktureller (tatsächliche Eignung von Flächen), legaler (Gesetze, Verordnungen), soziologischer (Technologiediffusion) und psychologischer (wahrgenommene Vorteile bzw. Nachteile) Natur. Abbildung 2-1 illustriert die Bestimmung des Potentials grafisch.

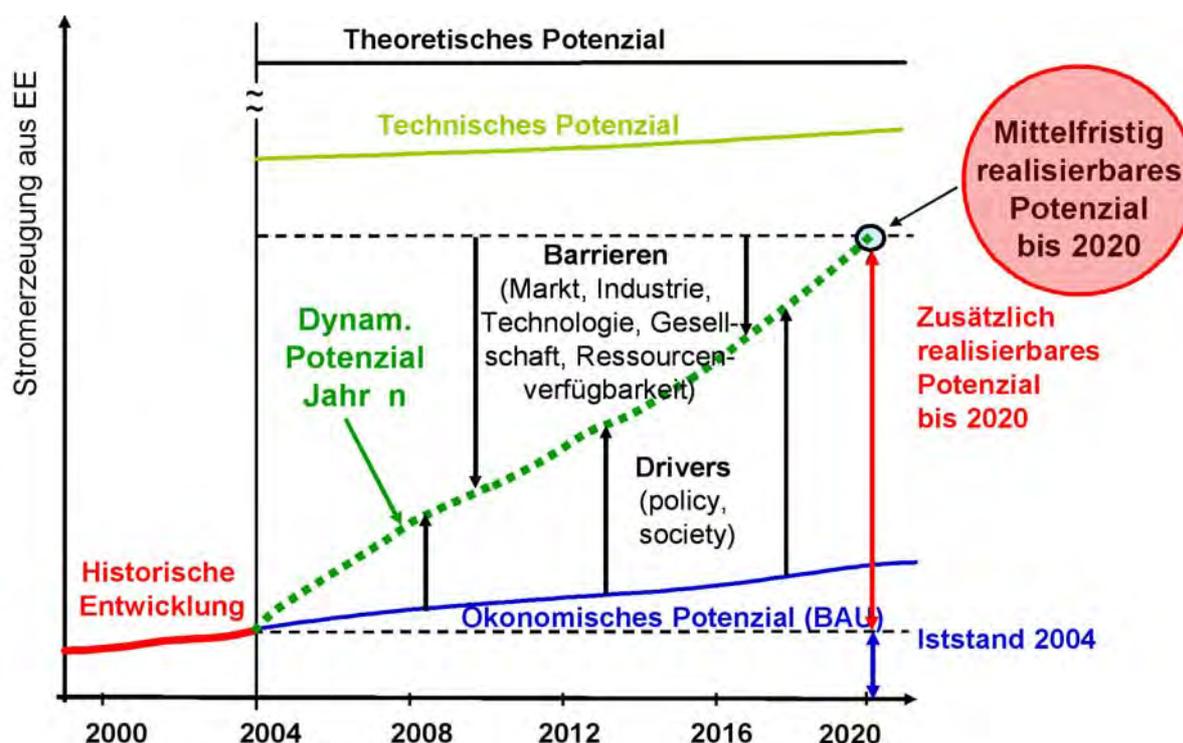


Abbildung 2-1: Illustration der verschiedenen Potenzialdefinitionen

Basierend der klaren Differenzierung zwischen nicht-ökonomischen und ökonomischen Restriktionen finden erste im Rahmen der Potenzialdefinition Berücksichtigung während letztere auf der Basis techno-ökonomischer Modelle behandelt werden. Genauer: Ökonomische Schranken, die die Erzeugungskosten und nicht das verfügbare Potential beeinflussen, werden durch die Wahl der Förderinstrumente und deren Ausgestaltung mitbestimmt und somit auf der Grundlage der Modelle *Green-X* und *Invert* detailliert untersucht.

Die Anwendung von **Green-X** erlaubt einerseits eine umfangreiche vergleichende Analyse der Interaktionen zwischen den einzelnen Fördersystemen für erneuerbare Energien und andererseits eine Bewertung der Interaktionen zwischen unterschiedlichen energiepolitisch relevanten Strategien wie Förderung Erneuerbarer Energien in den Sektoren Strom, Wärme und Biotreibstoffe, Kraft-Wärme-Kopplung und nachfrageseitigen Maßnahmen im Stromsektor (DSM).

Dynamische Kostenpotenzialkurven für alle Erzeugungstechnologien, welche im Rahmen des Projektes für Luxemburg im Detail generiert wurden, bilden den Kern des Modells **Green-X**.

Um realistische Szenarien simulieren zu können, lässt sich im Model **Green-X** ein Portfolio unterschiedlicher Fördersysteme (z.B. Einspeisetarife, Quotensysteme, Ausschreibungsverfahren, Investitionsförderungen, etc.) und deren Ausgestaltungsvarianten (z.B. gestufter Einspeisetarif, nationale, internationale Zertifikatssystem) auswählen.

Mit Hilfe des Modells lassen sich u.a. folgende Ergebnisse ermitteln:

- Strom-, Wärme und Biotreibstoffherzeugung aus erneuerbaren Energieträgern auf Technologieebene
- Anteil EE am Gesamtverbrauch
- Durchschnittliche Erzeugungskosten EE auf Technologieebene
- Einfluss der Förderstrategie auf die Erzeugungskosten auf Technologieebene
- Transferkosten der gewählten Förderstrategie für die Konsumenten auf Technologieebene

Ein weiterer methodischer Schwerpunkt der Arbeiten basiert auf der Anwendung des Simulations-Tools **Invert** auf den Luxemburger Raumwärmemarkt im Bereich der Wohnbauten. Mit Hilfe des Tools **Invert** lassen sich die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in den Bereichen Raumwärme, Warmwasser, Kühlen, Biotreibstoffe und erneuerbare Stromerzeugung abbilden und Szenarien zur Entwicklung des Raumwärmemarktes entwickeln. Im Rahmen dieses Projekts wird vor allem auch die Kopplung zwischen steigenden Wärmeschutzstandards und Erneuerbaren im Gebäudebereich abgebildet.

Der Gebäudebestand ist im Modell **Invert** nach Gebäudekategorien (also z.B. Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Nichtwohngebäude) und Bauperioden beschrieben. Jede dieser Gebäudeklassen ist durch bestimmte Eigenschaften (z.B. U-Werte, Baujahr, etc.) charakterisiert. Die Simulation der Energieeffizienz-Maßnahmen sowie der eingesetzten Energieträger im Heizungsbereich erfolgt über die dynamische Überprüfung der ökonomischen Effizienz bestimmte Wärmeschutzmaßnahme und Angebotstechnologien. Unter zusätzlicher Berücksichtigung nicht-monetärer fördernder oder hemmender Faktoren ergibt sich für jeden Gebäudetyp, ob entsprechende Wärmeschutzmaßnahmen und Heizungserneuerungen durchgeführt werden. Dabei wird angenommen, dass jährlich maximal ein bestimmter Anteil der Gebäude saniert werden kann. Energiepreise sowie Förderungen für Wärmeschutzmaßnahmen sind dabei entscheidende Einflussgrößen in Bezug auf die ökonomische Effizienz und damit die Simulationsergebnisse.

### 3 Aktueller Status der Erneuerbaren Energien

In den folgenden Abschnitten sind die wesentlichen Entwicklungen im Hinblick auf die Strom-, Wärme- und Biotreibstoffproduktion in Luxemburg dargestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Daten zur Energieerzeugung und den installierten Kapazitäten. Einige Berechnungsgrundlagen wie z.B. die zugrundeliegenden Daten zu den Primärenergieinputs bei der Biomasse werden im Kapitel 5 "Potenziale" behandelt.

#### 3.1 Entwicklung des Energieverbrauchs

Um die Größenordnungen der in weiterer Folge dargestellten Entwicklung der erneuerbaren Energieträger greifbar machen zu können, soll ein kurzer Blick auf den aktuellen Energieverbrauch in Luxemburg geworfen werden. Abbildung 3-1 zeigt hierfür die historische Entwicklung des nationalen Bruttoenergieverbrauchs in GWh. Diese Einheit wird im Weiteren für alle Angaben in Hinblick auf Energiemengen, unabhängig von Energieträger und Stufe in der Wandlungskette verwendet, um stets einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

In Abbildung 3-1 ist einerseits der strukturelle Wandel der in Luxemburg eingesetzten Energieträger von einem Fokus auf Festbrennstoffe in den beginnenden 1970er Jahren hin zu einer öl- und gasdominierten Energiewirtschaft in aktueller Zeit. Andererseits wird die Entwicklung des Gesamtenergieverbrauchs deutlich, der seit den späten 1990er Jahren wieder einen deutlichen Aufwärtstrend aufweist.

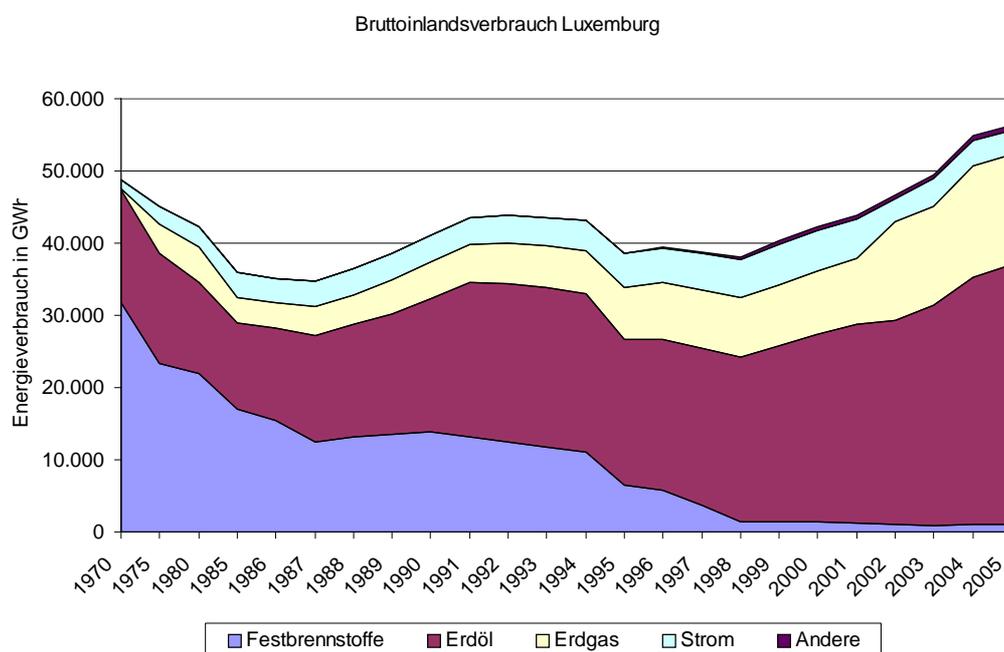


Abbildung 3-1: Historische Entwicklung des Bruttoinlandsverbrauchs von Luxemburg nach Energieträgern; Datenquelle: Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur, Direction de l'énergie et des communications; Grafik: eigene Berechnungen

### 3.2 Erneuerbare Stromerzeugung

Die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien in Luxemburg zeigte innerhalb des letzten Jahrzehnts ein starkes Wachstum, wie in Abbildung 3-2 dargestellt ist. Die Kleinwasserkraft verzeichnet dabei den größten Beitrag zur Gesamtproduktion, mit einem Anteil von 48% im Jahr 2005. Auffällig ist das starke Wachstum von Strom aus Windkraft, dessen Anteil innerhalb von 10 Jahren von 0% auf 25% der erneuerbaren Stromproduktion im Jahr 2005 gestiegen ist. Im Jahr 2004 betrug die Produktion von Strom aus Windenergie ungefähr 40 GWh und stieg im Jahr 2005 auf 52,5 GWh. Strom aus Bioabfall zeigt einen steten zeitlichen Verlauf. Im Zeitraum 1990-2005 betrug dessen Produktion ungefähr 17-19 GWh/Jahr. Dieser Wert ergibt sich aus einem Anteil des biogenen Anteils am gesamten Müll von 36,78%. Die dargestellte Stromproduktion durch Biogas setzt sich aus landwirtschaftlichem Biogas und Klärgas zusammen. Während die Klärgasproduktion innerhalb der vergangenen 5 Jahre recht konstant etwa 4-5 GWh pro Jahr betrug, wuchs die landwirtschaftliche Biogasproduktion von 8,2 GWh in 2001 auf 27,2 GWh in 2005.

In Abbildung 3-3 ist die installierte Kapazität von Anlagen zur erneuerbaren Stromerzeugung für den Zeitraum 1990 bis 2005 dargestellt. Im Vergleich zur Entwicklung der Stromerzeugung weisen die Windenergie und die Photovoltaik - bedingt durch die relativ geringe Volllaststundenzahl - einen höheren Anteil auf.

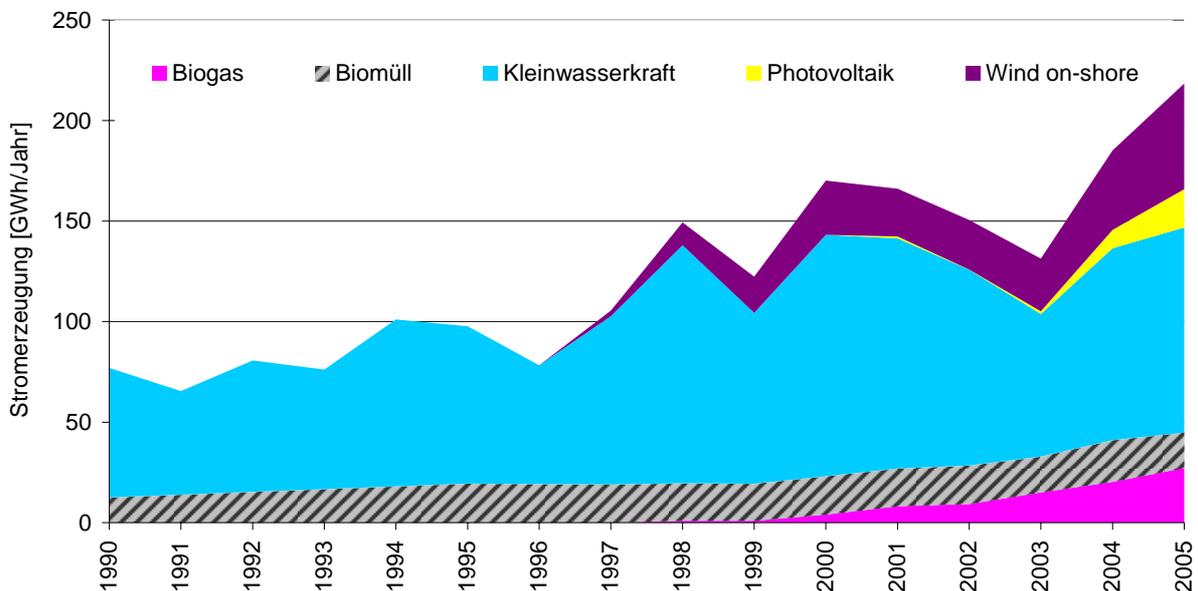


Abbildung 3-2: Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien in Luxemburg von 1990 bis 2005; Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

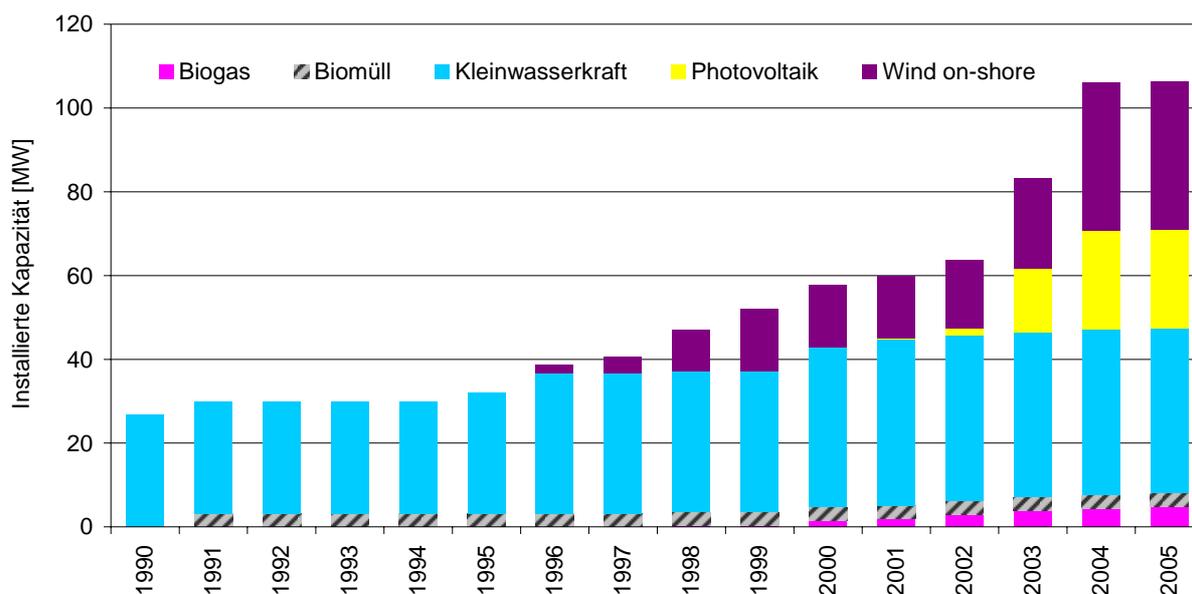


Abbildung 3-3: Installierte Kapazität erneuerbaren Energien im Stromsektor in Luxemburg von 1990 bis 2005; Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

In Tabelle 3-1 ist die Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern für die Jahre 1997 und 2005 dargestellt, ebenso das jährliche Wachstum während dieses Zeitraums. Der Beitrag erneuerbarer Energiequellen zum Gesamtstromverbrauch in Luxemburg lag im Jahr 1997 bei 2,0% und 2005 bei 3,45%.

Tabelle 3-1: Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien 1997 und 2005 in GWh

Technologie	1997 [GWh]	2005 [GWh]	Durchschnittliches Wachstum [%/a]
Biogas	0	27	
Feste Biomasse	0	0	
Bioabfall	17	18	0,6
kleine Wasserkraft	82	102	2,2
Photovoltaik	0	19	
Wind on-shore	3	53	33,3
<b>Total</b>	<b>102</b>	<b>219</b>	<b>7,7</b>
Anteil am Gesamtverbrauch	2,0%	3,45%	

Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

Wir möchten im Folgenden den derzeitigen Status der einzelnen Energiequellen darstellen.

### 3.2.1 Wasserkraft

Die Erzeugung von Strom aus großen Wasserkraftanlagen spielt in Luxemburg keine Rolle. Es existiert zwar in Vianden ein Pumpspeicherkraftwerk, aber da es sich bei der Hauptturbine um eine reine Pumpspeicheranlage ohne natürliche Zuflüsse handelt, ist der Strom nicht als Erzeugung aus erneuerbaren Energien zu werten. Darüber hinaus speist dieses Kraftwerk direkt in das deutsche Netz ein und liegt somit auch außerhalb des Bilanzkreises des Luxemburger Stromnetzes. Die installierte Kapazität sowie die Stromerzeugung aus Wasserkraftanlagen in den Jahren 2001-2005 ist in Tabelle 3-2 dargestellt.

Im Rahmen der Förderung erneuerbarer Energien wurden in den letzten zehn Jahren einige kleine Wasserkraftwerke reaktiviert. Eine Auflistung sämtlicher Wasserkraftwerke in Luxemburg ist in Tabelle 3-3 gegeben.

Tabelle 3-2: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Wasserkraftwerken in Luxemburg zwischen 2001 und 2005

Jahr	2001	2002	2003	2004	2005
Installierte Kapazität [MW]	39,5	39,5	39,5	39,5	39,5
Stromerzeugung [GWh]	114,4	97,4	70,9	95,4	102

Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

Tabelle 3-3: Installierte Kapazität und Fluss von Wasserkraftwerken in Luxemburg

Wasserkraftanlagen		
Anlage	Installierte Leistung (kW)	Fluss
Esch-sur-Sure	10000	Sauer
Rosport	6000	Sauer
Grevenmacher	8250	Mosel
Palzem	4800	Mosel
Schengen	4500	Mosel
Lohmühle/Staumauer Vianden	4000	Our
<b>Total</b>	<b>37550</b>	
Bettendorf	50	Sauer
Birtrange	105	Alzette
Bourscheid	35	Sauer
Cruchten	105	Alzette

<b>Wasserkraftanlagen</b>		
Anlage	Installierte Leistung (kW)	Fluss
Erpeldange	85	Sauer
Essingen	93	Alzette
Ettelbruck	250	Alzette
Moestroff	140	Sauer
Schüttburg	26	Clerf
Backesmühle	10	Weißer Erz
Bannmühle	40	Attert
Bigonville	48,5	Sauer
Bissermühle	45	Attert
Bounsmühle	60	Syr
Clouterie/Bissen	140	Attert
Fausermühle	40	Syr
Felsmühle	45	Syr
Fockenmühle	30	Eisch
Maulusmühle	11	Woltz
Neumühle	15	Weißer Erz
Reisermühle	15	Weißer Erz
Hessenmühle	22	Weißer Erz
Steckenmühle	48	Syr
Stolzemburg	45	Our
Tuchfabrik/Bettborn	15	Roudbaach
Useldingen	45	Attert
Total	<b>1563,5</b>	
Poste SEBES à Nospelt	429	Turbine im Trinkwasserstrom
Alle	39542,5	

Quelle: Energieagentur Luxemburg

### 3.2.2 Windenergie

Die erste Windkraftanlage zur Stromproduktion wurde in Luxemburg im Jahr 1997 errichtet. Bis Dezember 2005 waren insgesamt 36 Windkraftanlagen mit einer Gesamtkapazität von 35,4 MW ans Netz angeschlossen. Zwei weitere private Kleinstanlagen speisen ihre Energie in das Stromnetz ein.

Im Jahr 2004 betrug der aus Windkraft produzierte Strom 39,4 GWh. Dies entspricht einer Steigerung von 50% im Vergleich zum Vorjahr, was auf die Einrichtung des Windparks Kehmen/Bourscheid im September 2004 zurückzuführen ist (7 Windräder mit jeweils 1800 kW Leistung). Als letztes ging im Dezember 2004 die Anlage in Stockem mit 2 Windrädern à 600kW ans Netz. Im Jahr 2005 wurde so eine Stromproduktion von 52,5 GWh erreicht.

Pläne zur Realisierung weiterer Projekte liegen auf dem Tisch, bis zum jetzigen Zeitpunkt

wurde jedoch keines davon umgesetzt<sup>3</sup>. Dies beruht unter anderem auch auf der steigenden Ablehnung der Windkraft bei der Bevölkerung und damit verbundenen Genehmigungsbehinderungen. Die installierte Kapazität sowie die Stromerzeugung aus Windkraftanlagen in den Jahren 2001-2005 ist in Tabelle 3-4 dargestellt. Eine Übersicht über die Windkraftanlagen in Luxemburg ist in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-4: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Windkraftwerken in Luxemburg zwischen 2001 und 2005

Jahr	2001	2002	2003	2004	2005
Installierte Kapazität [MW]	14,9	16,4	21,5	35,3	35,4
Stromerzeugung [GWh]	23,7	24,7	26,2	39,4	52,5

Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

Tabelle 3-5: Installierte Kapazität, Standort und Betreiber von Windkraftanlagen in Luxemburg

Windenergie nach Anlagen			
Standort	Betreiber	installierte Leistung	Inbetriebnahme
Mompach	Windpower S.A.	4 x 500	Januar 1997
Nachtmanderscheid	Wandpark op der Hei sàrl.	1 x 850	Juli 1997
Heinerscheid 1	Wandpark Gemeng Hengischt	3 x 600	Dezember 1998
Heiderscheid	Wand a Waasser S.A.	3 x 500	Dezember 1998
Remerschen	Agence de l'Energie S.A.	1 x 600	Dezember 1998
Derenbach/Wincrange	Megawind/Nordwand S.A.	4 x 600	Januar 1999
Nachtmanderscheid	Wandpark op der Hei sàrl.	1 x 850	September 1999
Heinerscheid 2	Wandpark Gemeng Hengischt	5 x 1000	November 1999
Bettborn/Reimberg	Energi Atelier Réiden	2 x 600	November 2002
Heinerscheid 3	Wandpark Gemeng Hengischt	3 x 1800	Juni 2003
Kehmen-Bourscheid	Wandpark Kehmen-Heiscent	7 x 1800	September 2004
Stockem	Haardwand S.A.	2 x 600	Okt./Dez. 2004

Quelle: MinEcon (2005)

### 3.2.3 Photovoltaik

Die Kumulierbarkeit von Investitionszuschüssen und mit der Vergütung aus dem Einspeisetarif für PV-Anlagen hat in den Jahren 2002 bis 2004 einen großen Boom dieser Branche ausgelöst. Der starke Zuwachs an installierter Leistung von PV-Anlagen hat dazu geführt, dass in Luxemburg heute die weltweit höchste spezifische installierte Leistung an PV-

<sup>3</sup> Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

Anlagen hat, sowohl in Bezug auf die Bevölkerung als auch in Bezug auf die Landesfläche.

Der stürmische Zuwachs an PV-Kapazität ging gegen Ende des Jahres 2004 sichtbar zurück, da die für Investoren sehr günstigen Regelungen im August 2004 einer Revision unterzogen wurden. Die Folgeregulungen bezüglich des Investitionszuschusses wurden im August 2005 bekannt, die Folgeregulungen bezüglich des Einspeisetarifes im Oktober 2005. Auch mit den überarbeiteten Regelungen könnten noch profitable PV-Projekte durchgeführt werden. Die zurückhaltende Investitionstätigkeit, die auch für die Jahre 2005-2006 absehbar ist, zeigt jedoch eine gewisse Ernüchterung bei potenziellen Investoren. Vermutlich wurde die Errichtung von PV-Anlagen auch von vielen privaten Investoren in den „Boom-Jahren“ vor allem als profitable Geldanlage gesehen. Unter den veränderten finanziellen Bedingungen dürften solche Investoren nach anderen Geldanlageformen mit einem nach ihrer Einschätzung besseren Verhältnis aus Risiko und Rendite suchen.

Während der Expertengespräche in Luxemburg wurde deutlich, dass sowohl die individuell sehr hohen Förderbeträge als auch insbesondere die hohen Ausgaben der öffentlichen Hand für die Förderung als kritisch gesehen werden. Auch wenn eine robuste Volkswirtschaft wie die Luxemburgs aufgrund dieser Ausgaben nicht nur annähernd gefährdet werden dürfte, so hat die Entwicklung zu einer vergleichsweise schlechten öffentlichen Akzeptanz für die Nutzung der Photovoltaik geführt.

Für Ende 2005 wird eine installierte Leistung von insgesamt 23.6 MW geschätzt<sup>4</sup>.

Die installierte Kapazität sowie die Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen in den Jahren 2001-2005 ist in Tabelle 3-6 dargestellt.

Tabelle 3-6: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Photovoltaikanlagen in Luxemburg zwischen 2001 und 2005;

Jahr	2001	2002	2003	2004	2005
Installierte Kapazität [MW]	0,2	1,6	15,2	23,5	23,6
Stromerzeugung [GWh]	1,0	0,1	1,4	9,2	19,0

Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

### 3.2.4 Biogas

Der landwirtschaftlichen Statistik für das Jahr 2006 kann man entnehmen, dass 22 Einrichtungen zur Rückgewinnung von Methan auf landwirtschaftlichen Betrieben existieren. Hier von sind 16 Einzelanlagen, 3 Anlagen werden von 2 oder 3 Teilhabern betrieben und 3 weitere Anlagen mit jeweils mehr als 600 kW installierter Leistung werden von jeweils etwa 20 Teilhabern betrieben. Eine weitere Anlage mit 700 kW ging im Jahr 2006 in Betrieb. Die drei größten Anlagen tragen zu mehr als der Hälfte zur gesamten installierten Leistung bei. Die

<sup>4</sup> Rapport d'activité 2004 du Ministère de l'Économie

landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden auf Basis von Gülle und Energiepflanzen (fast ausschließlich Mais) betrieben mit einem Gasertrag von etwa 26 GWh auf Basis von Gülle, 1 GWh Bioabfälle<sup>5</sup>, 21 GWh auf Basis von Energiepflanzen sowie 18 GWh auf Basis von Grünschnitt.<sup>6</sup> Weiterhin existieren drei Klärgasanlagen mit 13 GWh Gasproduktion. Der seit fast zehn Jahren bestehende starke Wachstumstrend im Bereich des landwirtschaftlichen Biogases scheint derzeit recht robust.

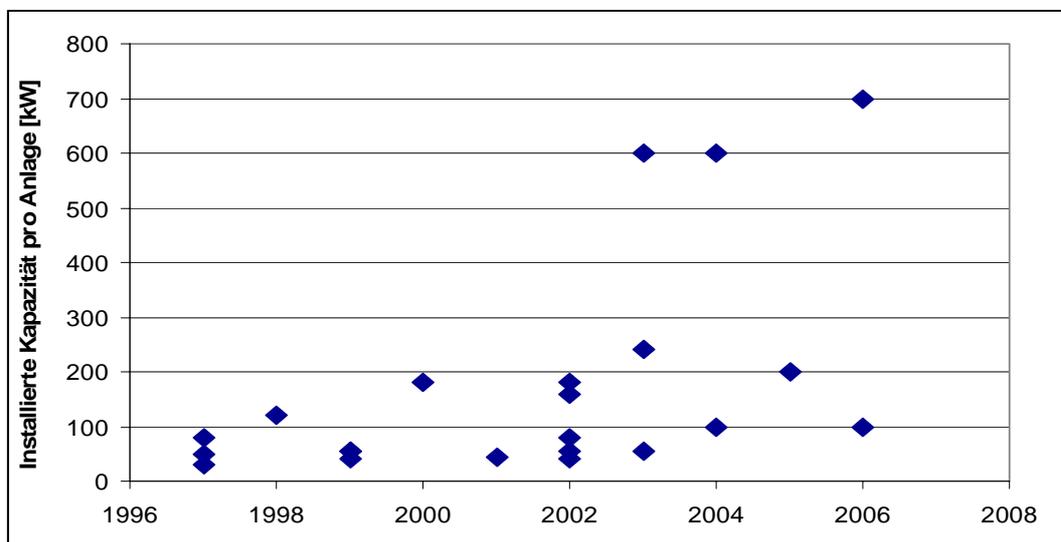
Eine wesentliche Entwicklung im Bereich der Biogasanlagen betrifft den Trend im Hinblick auf die Anlagengröße. Wie in Abbildung 3-4 dargestellt, kann man feststellen, dass die durchschnittliche Anlagengröße in der Vergangenheit kontinuierlich zugenommen hat und vermehrt Anlagen von mehreren Betreibern genutzt werden.

Die installierte Kapazität sowie die Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen in den Jahren 2001-2005 ist in Tabelle 3-7 dargestellt.

Tabelle 3-7: Installierte Kapazität und Stromerzeugung von Photovoltaikanlagen in Luxemburg zwischen 2001 und 2005

Jahr	2001	2002	2003	2004	2005
Installierte Kapazität [MW]	2,1	3,0	3,9	4,5	4,8
Stromerzeugung [GWh]	8,2	9,3	15,1	20,3	27,2

Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR



Quelle: ASTA

Abbildung 3-4: Installierte Kapazität pro Anlage im Bereich Biogas von 1997 bis 2006

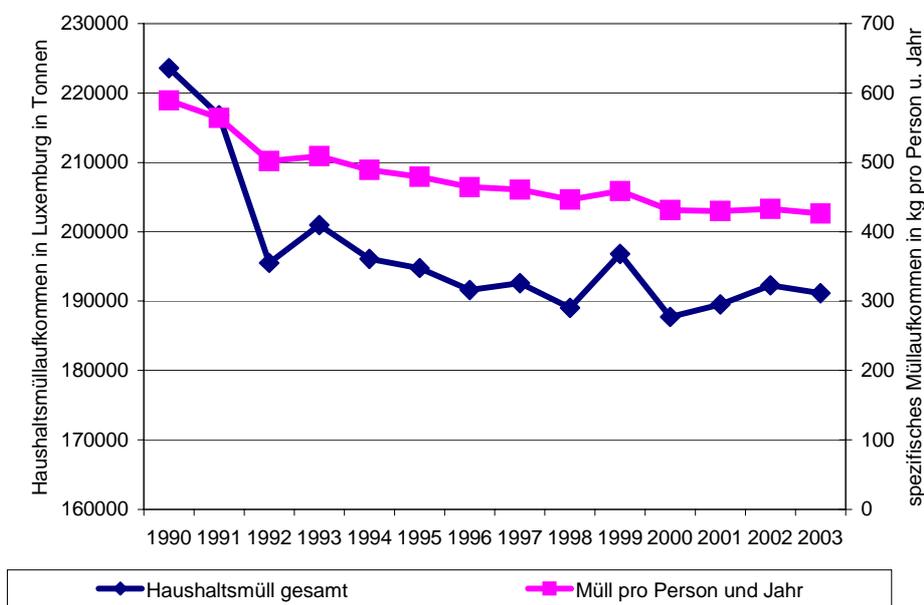
<sup>5</sup> Das heißt, dass eine entsprechende Nutzung zurzeit nur in einem sehr geringen Umfang stattfindet. Vergärung von Küchenabfällen findet derzeit noch nicht statt.

<sup>6</sup> Für die Berechnungen hierzu siehe Kapitel 5.

Die Stromerzeugung durch Biogasanlagen erfolgt häufig als Kraft-Wärme-Kopplung, d.h. Strom und Wärme werden gemeinsam genutzt. Die Bedingung hierfür ist, dass eine geeignete Nutzung für die Wärme möglich ist. Dieses kann bei landwirtschaftlichen Betrieben z.B. für Heizungszwecke in Wohn- oder Nutzgebäuden erfolgen oder durch die Bereitstellung von Prozesswärme für die Trocknung verschiedener landwirtschaftlicher Erzeugnisse. Die verfügbaren Werte der Wärmeerzeugung in Biogasanlagen basieren auf einem Inventar der Biogasanlagen der Biogasvereinigung in Luxemburg. Die hierin ausgewiesenen Wärmemengen summieren sich auf ca. 4,6 GWh. Obgleich diese Angaben unter Umständen nicht vollständig erfasst sind, ergibt sich, dass nur ein geringer Anteil der anfallenden Abwärme genutzt wird.

### 3.2.5 Organischer Anteil des Hausmülls

Die energetische Nutzung des organischen Anteils des Hausmülls zeigte in den vergangenen Jahren keinerlei Wachstum, weder in Bezug auf die erzeugte Strom und Wärmemenge noch bezüglich der installierten Kapazität. Die historische Entwicklung des Haushaltsmüllaufkommens in Luxemburg im Zeitraum von 1990 bis 2003 ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Sowohl das absolute als auch das relative Müllaufkommen je Einwohner ist im Betrachtungszeitraum gesunken, wobei in den letzten Jahren das relative Aufkommen konstant ist und das absolute Müllaufkommen durch die wachsende Einwohnerzahl wieder einen leichten Aufwärtstrend zeigt.



Quelle: Administration de l'Environnement

Abbildung 3-5: Entwicklung des Luxemburger Haushaltsmüllaufkommens

Der Status quo der Luxemburger Müllverbrennung im Jahr 2005 lag nach Angaben von Sidor

bei 125.000 t verbranntem Müll. Unter Berücksichtigung des oben angeführten biogenen Anteils und einem spezifischen Heizwert von 2,5 kWh/kg Müll ergibt sich ein Heizwert der biogenen Müllfraktion von 115 GWh. Der Status quo der Luxemburger Müllverbrennung im Jahr 2005 lag nach Angaben von Sidor bei 125.000 t verbranntem Müll. Unter Berücksichtigung des biogenen Anteils von 36,78% und einem spezifischen Heizwert von 2,5 kWh/kg Müll ergibt sich ein Heizwert der biogenen Müllfraktion von 115 GWh. Die SIDOR führt zurzeit Müllverbrennung (biogener Anteil) in einem energetischen Umfang von 115 GWh/a durch. Dies ist ein namhafter Anteil des Gesamtpotenzials, wobei zurzeit nur ein kleiner energetischer Anteil in Form von elektrischem Strom auch tatsächlich genutzt wird und der größere Teil der thermischen Energie als Abwärme ungenutzt verloren geht. Der elektrische Wirkungsgrad der Verstromung der SIDOR-Müllverbrennungsanlage liegt nach Angaben von SIDOR bei ca. 17% bis 19%. Insgesamt wurden aus der Nutzung des biogenen Anteils des Hausmülls im Jahr 2005 etwa 17,7 GWh Strom erzeugt. Die Leistung der aktuellen Turbine beträgt 9 MW<sub>el</sub>, dieses ergibt bei einem biogenen Anteil von 36,78% ca. 3,3 MW<sub>el</sub> "erneuerbare" Kapazität.

Die installierte Kapazität sowie die Stromerzeugung aus biogenem Müll in den Jahren 2001-2005 ist in Tabelle 3-8 dargestellt.

Tabelle 3-8: Installierte Kapazität und Stromerzeugung aus biogenem Müll in Luxemburg zwischen 2001 und 2005

Jahr	2001	2002	2003	2004	2005
Installierte Kapazität [MW]	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Stromerzeugung [GWh]	18,8	19,1	17,8	20,7	17,7

Quelle: Bericht LU DIR EC/2001/77; ILR

### 3.3 Erneuerbare Wärmeerzeugung

Die Entwicklung der erneuerbaren Wärmeproduktion in Luxemburg war in den vergangenen Jahren weniger dynamisch als der Zuwachs im Stromsektor. Allein die Bereiche der Solar Kollektoren sowie die modernen Biomasseheizungen (insbesondere Holzhackschnitzel) konnten merkliche Zuwächse verzeichnen. Daten zur Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien in Luxemburg sind in Tabelle 3-9 zusammengestellt. Lediglich Wärme aus fester Biomasse leistete in 2005 mit etwa 264 GWh den entscheidenden Beitrag zur Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien. Hierbei wird neben einer Anlage zur Nutzung industrieller Prozesswärme insbesondere Energieholz in traditionellen Scheitholzanlagen und in modernen Holzfeuerungsanlagen genutzt. Ein sehr schnell wachsender Bereich der Biomasse Wärmeerzeugung stellen moderne Holzhackschnitzelanlagen dar. In diesen wurde im Jahr 2005 bereits etwa 15 GWh Wärme produziert, verglichen zu 1,3 GWh im Jahr 2000. Die Wärmeproduktion aus Solarthermie konnte in den vergangenen drei Jahren signifikante Zuwächse im Bereich verzeichnen, von etwa 0,5 GWh pro Jahr in 2000 auf etwa 3 GWh pro Jahr in 2005. Basierend auf den Daten der Umweltverwaltung wird die derzeit installierte

Fläche auf etwa 9.600 m<sup>2</sup> geschätzt. Für den Bereich der Erdwärmepumpen existieren neben den Daten der Umweltverwaltung zu den seit 2001 bezuschussten Anlagen kaum belastbare Statistiken für Luxemburg. Generell kann von einem sehr geringen Durchdringungsgrad ausgegangen werden. Die Daten der Umweltverwaltung weisen eine Zahl von 21 geförderten Anlagen aus. Es wird in diesem Bereich eine Arbeitszahl von 3,8 gefordert. In Zukunft ist durch eine weitere Fokussierung der Energiepolitik auf den Wärmebereich ev. eine stärkere Marktdurchdringung von Wärmepumpen möglich.

Tabelle 3-9: Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien 2000 und 2005

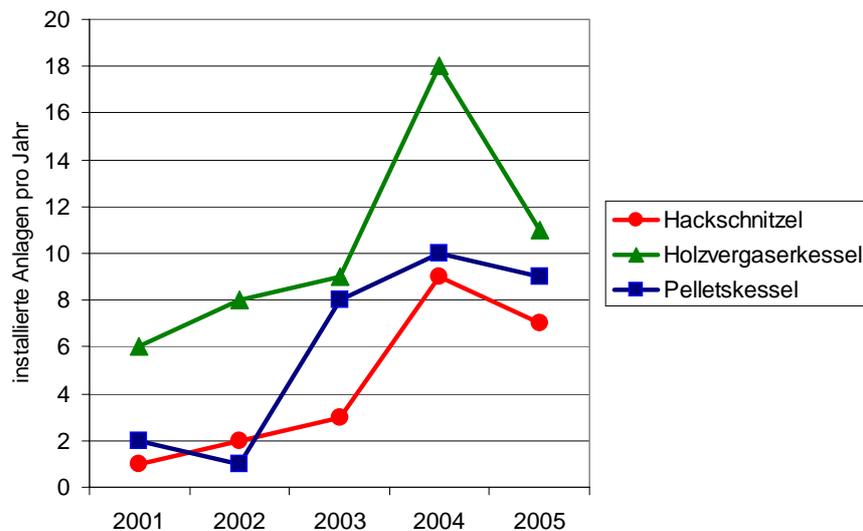
	<b>2000 [GWh]</b>	<b>2005 [GWh]</b>	<b>durchschnittliches Wachstum pro Jahr [%]</b>
Biogas	0	4,6	
Biomasse (dezentral) - Wärme aus Energieholz	47,3	64,5	6,4,%
hiervon Scheitholz	44	48,2	1,8%
Hackschnitzel	1,3	14,8	63%
Pellets	0	1,5	
industrielle Prozesswärme - Wärme aus Alt und Restholz	200	200	
Wärme aus Solarthermie	0,5	3	43%
Erdwärmepumpen	0	1	
<b>Gesamt</b>	<b>247,8</b>	<b>273,1</b>	<b>2%</b>
Anteil am Wärmeverbrauch	1,75%	1,88%	

### 3.3.1 Biomasse zur Wärmeerzeugung

Bei der Wärmeerzeugung durch Biomasse dominiert die Nutzung von Holz sowie in deutlich geringerem Umfang die Wärmegewinnung aus Biogas. Der größte Anteil der holzbasierten Wärmeerzeugung erfolgt im Bereich der industriellen Prozesswärme auf der Basis von Alt- und Restholz. Hierbei erfolgt der wesentliche Anteil der Wärmeerzeugung von 200 GWh pro Jahr in einem Betrieb. Die Schätzung der Wärmeerzeugung aus traditionellen Holzheizungen (Scheitholz) ist schwierig, da diese mit den üblichen Messproblemen bei nichtkommerzieller Biomassenutzung verbunden ist. Generell kann bei traditionellem Scheitholz von einem stagnierenden bis leicht ansteigendem Trend innerhalb der vergangenen Dekade ausgegangen werden. Die Abschätzung des Status quo der Scheitholzheizungen in Luxemburg und deren Energieverbrauch stützt sich auf die Angaben zur Beheizung der Gebäude. Die nationale Gebäudestatistik nennt für das Jahr 2001 eine Zahl von 2210 luxemburgischen Haushalten, welche mit Holz beheizt werden. Die Holzheizungen finden sich dabei hauptsächlich im alten Gebäudebestand. In neu errichteten Gebäuden der vergangenen 10 Jahre wurden kaum Holzheizungen installiert. In rezenter Vergangenheit ist die Nachfrage nach Holzöfen zwar wieder angestiegen, es wird jedoch vermutet, dass es sich bei diesen Holzöfen um Zweitsysteme handelt, welche nur einen geringen Teil des jeweiligen Heizwärmebedarfes

decken. Das zur Beheizung eingesetzte Holz ist dem Scheitholz zuzuordnen. Zur Hochrechnung des bestehenden Energieverbrauches aus Scheitholz wird im Schnitt ein Jahresheizenergieverbrauch der entsprechenden Haushalte von 20.000 kWh Heizwert angenommen. Dies ergibt ein aktuelles (Nachfrage)Potenzial für Scheitholz von 44,2 GWh. Moderne Heizsysteme basierend auf Holzhackschnitzeln sind statistisch besser erfasst, da diese erst seit kurzem kommerziell verfügbar sind und somit über Verkaufszahlen sehr zuverlässig auf die installierte Leistung geschlossen werden kann. In der Tabelle 3-11 sind die seit 1997 in Betrieb genommenen und derzeit geplanten großen Holzhackschnitzelheizungen aufgelistet. Abbildung 3-8 zeigt den Verlauf der installierten Leistung bei großen Holzhackschnitzelheizungen von 1997 bis 2005. Die gesamte Wärmeerzeugung aus diesen Anlagen wird auf 12.5 GWh/a geschätzt.

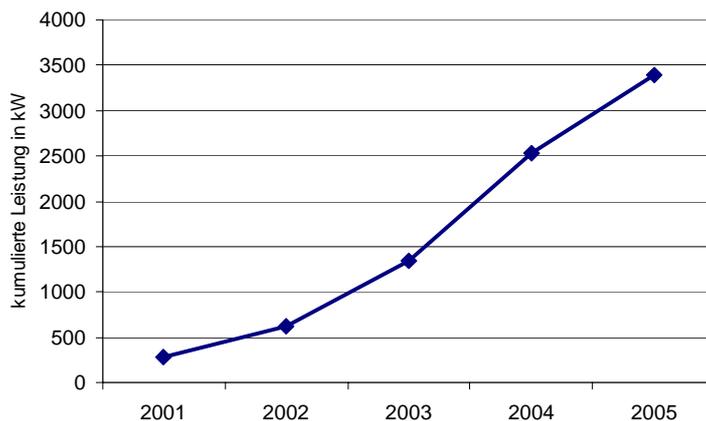
Die Entwicklung der Marktdiffusion von (bezuschussten) privaten Kleinanlagen ist in Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 dokumentiert. Im Zeitraum 2001 bis 2005 wurden in Luxemburg 22 Hackschnitzelkessel, 52 Holzvergaserkessel und 30 Pelletskessel bezuschusst. Die kumulierte installierte Leistung der genannten Anlagen beträgt dabei im Jahr 2005 einen Wert von 3390 kW.



Quelle: Umweltverwaltung

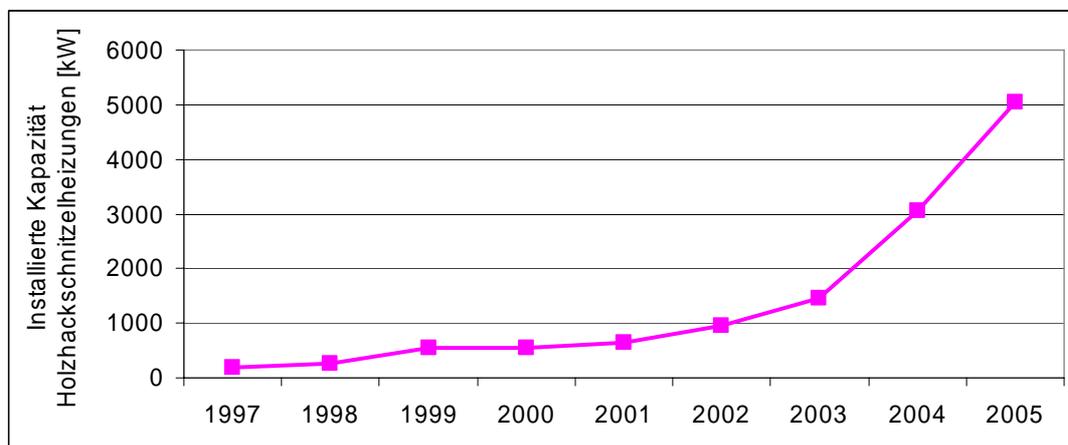
Abbildung 3-6: In Luxemburg im Zeitraum 2001 bis 2005 bezuschusste automatisierte biogene Heizsysteme

Tabelle 3-10 fasst den Status Quo bei der Nutzung von Energieholz in Luxemburg zusammen.



Quelle: Umweltverwaltung

Abbildung 3-7: Kumulierte Leistung der im Zeitraum 2001 bis 2005 in Luxemburg bezuschussten automatisierten biogenen Heizsysteme



Quelle: Luxemburger Forstverwaltung - Administration des Eaux et Forêts

Abbildung 3-8: Installierte Kapazität von Holzhackschnitzelheizungen von 1997

Tabelle 3-10: Zusammenfassung des Status Quo bei der Nutzung von Energieholz in Luxemburg

	Installierte Leistung		Volllaststunden		Energiebedarf	
2005 Biomasse KWK	0,0	kW	0	h	0	GWh
2005 Hackschnitzel groß	5.062,0	kW	2474	h	12,5	GWh
2005 Hackschnitzel klein	1.014,0	kW	2300	h	2,3	GWh
2005 Holzvergaser klein	1.709,0	kW	2300	h	3,9	GWh
2005 Pellets	666,0	kW	2200	h	1,5	GWh
2005 Scheitholz u. nicht bezuschusste	24.550,0	kW	1800	h	44,2	GWh
Summen	32.981,0	kW			64,5	GWh

Quelle: eigene Berechnungen

Tabelle 3-11: Holzhackschnitzelanlagen in Luxemburg; Quelle: Luxemburger Forstverwaltung - Administration des Eaux et Forêts

Stand 01/2006				
Gemeinde	Ort	Status	Inbetriebnahme	Leistung (in kW)
<b>Anlagen in Betrieb</b>				
Wilwerwiltz	Enscherange	Pr.	1997	200
Niederanven	Sennigerberg	St.	1998	52
Bastendorf	Tandel	Ko.	1999	300
Echternach	Echternach	Ko.	2001	100
Préizerdaul	Bettborn	Ko.	2002	300
Pütscheid	Pütscheid	Ko.	2003	200
Beaufort	Beaufort	Ko.	2003	300
Mompach	Born	Ko.	2004	400
Junglinster	Junglinster	Ko.	2004	1.000
Medernach	Medernach	Ko.	2004	200
Bastendorf	Landscheid	Ko.	2005	100
Niederanven	Oberanven	Ko.	2005	320
Betzdorf	Roodt/Syre	Ko.	2005	320
Ville de Luxembourg	Dommeldange	Ko.	2005	750
Stadtbredimus	Stadtbredimus	Ko.	2005	320
Esch-sur-Alzette	Ellergronn	St.	2005	200
			<b>Total</b>	<b>5.062</b>
<b>Anlagen in Planung</b>				
Junglinster	Junglinster	Ko.		300
Redange	Redange	Ko.	2005	320
Heiderscheid	Heiderscheid	Ko.		240
Heinerscheid	Heinerscheid	Ko.	2005	150
Clemency	Clemency	Ko.		?
Wormeldange	Dreiborn	Ko.		?
Beckerich		Ko.	2004	2.000
Larochette		Ko.	2006	220
Contern		Ko.	2006	400
			<b>Total</b>	<b>3.630</b>
<b>TOTAL (laufende und geplante Anlagen)</b>				<b>8.692</b>

Pr. = Privat St. = Staatlich Ko. = Kommunal  
bis 2005

### 3.3.2 Solarthermische Wärmeerzeugung

Der Status quo 2005 bezüglich der in Luxemburg installierten solarthermischen Anlagen wird von den in Tabelle 3-12 dargestellten Daten abgeleitet. Im Zeitraum von 2001 bis Ende 2005 wurden in Luxemburg insgesamt 749 solar thermische Anlagen mit einer Gesamtfläche von ca. 5.600 m<sup>2</sup> bezuschusst. Die Entwicklung der Anzahl der bezuschussten Anlagen verlief dabei un stetig. Im Jahr 2005 wurden deutlich weniger Anlagen gefördert als in den 3 Jahren davor. Der Schluss liegt dabei nahe, dass die Umstellung des Fördersystems hier Einfluss genommen hat.

Zusätzlich zu den dokumentierten bezuschussten Anlagen von Privatpersonen wurden im Zeitraum 1998 bis 2005 in Summe 15 kommunale solarthermische Anlagen errichtet, welche über das PEEC-Programm bzw. über den Umweltschutzfonds (fonds pour la protection de l'environnement) bezuschusste wurden.

Tabelle 3-12: Über die Verordnung vom 17. Juli 2001 und die Verordnung vom 3. August 2005 bezuschusste solarthermische Anlagen von Privatpersonen in Luxemburg

Jahr	Anlagen ohne Heizungseinbindung			Anlagen mit Heizungseinbindung			Alle Anlagen		
	m <sup>2</sup>	Stk	m <sup>2</sup> /Stk	m <sup>2</sup>	Stk	m <sup>2</sup> /Stk	m <sup>2</sup>	Stk	m <sup>2</sup> /Stk
2001	346	68	5,1	271	31	8,7	617	99	6,2
2002	764	132	5,8	636	60	10,6	1.400	192	7,3
2003	767	128	6,0	374	43	8,7	1.141	171	6,7
2004	653	123	5,3	1.100	63	17,5	1.753	186	9,4
2005	298	55	5,4	385	46	8,4	683	101	6,8
Summe	2.828	506		2.766	243		5.593	749	

Quelle: Umweltverwaltung

Über den Zeitraum vor 2001 bei privaten Anlagen bzw. über den Zeitraum vor 1998 bei kommunalen Anlagen liegen keine statistischen Aufzeichnungen vor. Weiters ist mit einer gewissen Anzahl von Anlagen zu rechnen, welche nicht um Bezuschussung angesucht haben. Der EuroObservER (2005) nennt eine kumulierte Kollektorfläche in Luxemburg für das Jahr 2004 von 11.500 m<sup>2</sup>. Diese Zahl erscheint angesichts der verfügbaren disaggregierten Daten als hoch gegriffen, zumal der Diffusionsgrad dieser Technologie vor den Zeiten der hier dargestellten Aufzeichnungen laut der Aussage von luxemburgischen Experten sehr gering war. Zur Abschätzung des Status quo für das Jahr 2005 wurde deshalb angenommen, dass im Zeitraum vor 2001 bereits eine Kollektorfläche von 848 m<sup>2</sup> im Bereich der Anlagen ohne Heizungseinbindung und 277 m<sup>2</sup> im Bereich der Anlagen mit Heizungseinbindung installiert waren. Die Anlagen welche in Zeiträumen der prinzipiellen Möglichkeit einer Bezuschussung ohne Bezuschussung errichtet wurden, wurden mit 1804 m<sup>2</sup> eingeschätzt. Insgesamt ergibt dies eine Einschätzung des Status quo für das Jahr 2005 von 9603 m<sup>2</sup> Kollektorfläche bzw. einem energetischen Ertrag dieser Anlagen von 3 GWh.

### 3.3.3 Wärmepumpen

Die Wärmepumpentechnologie ist in Luxemburg kaum verbreitet. Historisch führten die bereits oben beschriebenen schlechten Erfahrungen mit dieser Technologie dazu, dass heute kaum Anlagen installiert werden. In den vergangenen 5 Jahren wurden 21 Anlagen bezuschusst und in den vergangenen 10 Jahren wurden in ganz Luxemburg ca. 40 Wärmepumpenanlagen in privaten Einfamilienhäusern installiert. Dies entspricht einem Status quo der Umweltwärmenutzung durch Wärmepumpen in Luxemburg im Jahr 2005 von ca. 1 GWh.

### 3.4 Biokraftstoffe

Der Biotreibstoffsektor in Luxemburg existiert nur in Ansätzen. Nach Informationen der Agro-énergie wird derzeit in Luxemburg Raps für die Biodieselproduktion auf einer Fläche von etwa 1300 ha angebaut. Anlagen zur Umwandlung von Energiepflanzen in Biotreibstoff bestehen in Luxemburg derzeit nicht. Nach einer Auskunft von SuperDrecksKesch konnte zusätzlich im Jahr 2005 eine Menge von 316,36 t (das sind 0,7 kg/Einwohner und Jahr) Alt-speiseöle und -fette gesammelt werden. Dies entspricht einem Energieinhalt von ca. 2,8 GWh/a.

Der Gesamtbetrag des für die Biodieselproduktion angebauten Rapses wird nach Frankreich transportiert, dort in Biodiesel transformiert und nach dem Reimport nach Luxemburg größtenteils zum Betreiben der Busse in Luxemburg Stadt eingesetzt. Etwa 1/3 des Flottenbedarfs der öffentlichen Busse werden auf der Basis von Biodiesel bereitgestellt. Laut dem Luxemburgischen Bericht zur EU Kommission für die Biotreibstoffdirektive 2003/20/EC aus dem Jahr 2005, wurden die in Tabelle 3-13 angegebenen Mengen an Biodiesel in Luxemburg Stadt verbraucht.

Tabelle 3-13: Produktion von Biotreibstoffen 2004 und 2005 in GWh

	2004 [GWh]	2005 [GWh]
Biodiesel Verbrauch Luxemburg Stadt	6.8	6.6
Altspeiseöle und -fette	2.8	2.8
Anteil Gesamtverbrauch	0.029%	0.029%

Quelle: Direktive 2003/30/EC: Luxemburg Bericht – 2005

Das EU-Direktiven-Ziel für Luxemburg für Biotreibstoffe im Verkehrssektor beträgt für das Jahr 2006 2.75% Anteil biogener Kraftstoffe am Benzin- und Dieserverbrauch. Dieser Anteil konnte für das Jahr 2006 nicht erreicht werden, da die in den Jahren 2004 und 2005 wirksamen Maßnahmen nicht ausreichend waren um eine breite Markteinführung von Biotreibstoffen zu initiieren.

Der gesamte für die Direktive 2003/30/EC relevante Kraftstoffverbrauch (inklusive Biokraftstoffe) in 2004 und 2005 ist in Tabelle 3-14 zusammengefasst.

Tabelle 3-14: Biokraftstoffanteil 2004 und 2005 - Luxemburg

	<b>2004</b>		<b>2005</b>	
	[Tonne]	[% Biokraf.]	[Tonne]	[% Biokraf.]
Ottokraftstoff	553.062	0	507.571	0
Diesel	1.624.135	0.035	1.805.178	0.031
<b>Summe</b>	<b>2.177.197</b>	<b>0.026</b>	<b>2.312.749</b>	<b>0.024</b>

Quelle: Direktive 2003/30/EC: Luxemburg Bericht – 2005

## **4 Aktuelle Fördermaßnahmen und Rahmenbedingungen der erneuerbaren Energien**

Die Förderung der erneuerbaren Energien in Luxemburg ist derzeit über eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen aus den Bereichen der Wirtschafts-, Umwelt- und Landwirtschaftspolitik geregelt. Dabei greifen die Fördermaßnahmen an verschiedenen Stellen an, um die Nutzung erneuerbarer Energien zu erhöhen. So werden einerseits Sekundärenergieträger, insbesondere Strom, aus erneuerbaren Energien mit speziellen Tarifen vergütet und es wird andererseits auch die Errichtung von Anlagen zur Nutzung der erneuerbaren Energien gefördert. Die Regelungen sind teilweise zielgruppenspezifisch gestaltet; das heißt solche Fördermaßnahmen können nur von einem bestimmten Personenkreis in Anspruch genommen werden.

Neben den Rechtsetzungen zur Förderung der erneuerbaren Energien bildet die allgemeine Gesetzgebung in Luxemburg den rechtlichen Rahmen innerhalb dessen die Nutzung der erneuerbaren Energien entwickelt wurde und weiterentwickelt werden wird.

Die wichtigsten förderlichen Aspekte der bestehenden luxemburgischen Förderpolitik sind:

- die gute finanzielle Ausstattung der Förderinstrumente,
- die breite Förderung aller relevanten erneuerbaren Energien

Eher hinderliche Aspekte der vergangenen und der aktuellen Förderpolitik sind:

- die z.T. ungenügende Investitionssicherheit bei Förderinstrumenten,
- die komplexe Förderstruktur mit ähnlichen Regelungen für verschiedene Zielgruppen oder sogar vergleichbaren Zielgruppen,
- der z.T. kurzzeitige Bestand von Förderbedingungen, der die Wirtschaftsbranche der erneuerbaren Energien (Planer, Lieferanten, Hersteller, Installateure) vor Herausforderungen stellt
- das Nebeneinander unterschiedlicher Anlaufstellen für ähnliche Technologien und Förderzusammenhänge

Die als eher hinderlich eingeschätzten Aspekte bedeuten nicht, dass die bestehende Förderpolitik für erneuerbare Energien in Luxemburg grundsätzlich unbrauchbar ist, was auch der Ausbau der erneuerbaren Energien in der Vergangenheit belegt. Vielmehr kann vermutet werden, dass noch Potenziale in der Förderung bestehen, sowohl was die erreichbare Nutzung der erneuerbaren Energien angeht (Fördereffektivität) als auch was die notwendigen Fördermittel angeht (Fördereffizienz).

### **4.1 Fördermaßnahmen für erneuerbare Energien**

Im Überblick handelt es sich bei den Regelungen zur Förderung erneuerbare Energien um folgende Gesetze und Verordnungen:

- Das Gesetz vom **5. August 1993** über die rationelle Energienutzung. Dieses Gesetz hat den Charakter eines übergeordnete Rahmengesetz, in dem auch die Grundsätze zur Förderung der Erneuerbaren Energien und von Energieeffizienzmaßnahmen festgelegt werden;
- (veränderte) Großherzogliche Verordnung vom **30. Mai 1994** über die Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien und über KWK
- Gesetz vom **31. Mai 1999** zur Einführung eines Umweltschutzfonds
- Ministerielles Rundschreiben von 20. April 2005 zum Umweltschutzfonds
- (veränderte) Großherzogliche Verordnung vom **22. Mai 2001** zur Einführung eines Kompensationsfonds im Rahmen der Organisation des Elektrizitätsmarktes
- Gesetz vom **24. Juli 2001** zur Unterstützung der ländlichen Entwicklung
- Großherzogliche Verordnung vom **11. August 2001** zur Umsetzung des Gesetzes zur Unterstützung der ländlichen Entwicklung vom 24. Juli 2001
- Großherzogliche Verordnung vom **17. März 2003** zu den Fördermöglichkeiten aus dem Gesetz zur Unterstützung der ländlichen Entwicklung
- Gesetz vom **22. Februar 2004** zur Einführung einer Beihilferegelung in den Bereichen Umweltschutz, rationelle Energienutzung und Energieerzeugung aus erneuerbaren Ressourcen
- .Gesetz vom **30. Juni 2004** über die Einführung eines generellen Rahmens für ein Förderprogramm für kleine und mittelständische Unternehmen
- (veränderte) Großherzogliche Verordnung vom **3. August 2005** zur Einführung eines Programms zur Förderung der rationellen Nutzung von Energie und die Aufwertung erneuerbarer Energien für natürliche Personen (ersetzt die Verordnung vom 17. Juli 2001)
- Großherzogliche Verordnung vom **3. August 2005** zur Einführung einer Prämie für Strom aus erneuerbaren Energieträgern (Wind, Wasserkraft, Biomasse, Biogas) (ersetzt die Verordnung vom 28. Dezember 2001)
- Großherzogliche Verordnung vom **14. Oktober 2005** über die Bereitstellung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energieträgern

#### 4.1.1 Detaillierte Beschreibung der Fördermaßnahmen

##### Rahmengesetz vom 5. August 1993

Das Rahmengesetz bildet die Grundlage für die Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energien und aus der Erzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung. Es umfasst alle für Luxemburg relevanten erneuerbaren Energiequellen. Ziel dieses Instruments ist die Erhöhung der Nutzung der erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung, sowie die Förderung der Energieeffizienz. Vom Instrumententyp her ist es ein Rahmengesetz mit Verordnungsermächtigung zur Regelung von spezifischen Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Energien und aus KWK. Mit seiner Einführung 1993 war keine zeitliche Gültigkeitsbeschränkung verbunden, so dass es bis auf weiteres gültig bleibt.

Kernelemente des Rahmengesetz vom 5.8.1993 sind die Definition der förderwürdigen E-

nergiequellen, sowie die Festlegung von Leistungsgrenzen für Anlagen bis 150 kW und für Anlagen von 151 kW bis 1500 kW bei KWK-Anlagen. Des weiteren wird der garantierte Netzzugang zum öffentlichen Netz für Strom aus erneuerbaren Energien und KWK wird in Artikel 5 des Gesetzes festgelegt. Artikel 6 beinhaltet eine Verordnungsermächtigung zum Erlass einer Verordnung in der die Vergütung von Strom aus den im Gesetz erfassten Energien geregelt werden soll.

Unter den Schlüsselfaktoren dieses Instruments ist vor allem sein Vorhandensein als grundlegende Rechtsetzung zur Förderung von erneuerbarem Strom, die bereits seit knapp 13 Jahren besteht. Der lange Fortbestand des Rahmengesetzes hat dazu beigetragen, Vertrauen bei Investoren zu schaffen, obwohl über das Rahmengesetz z.B. keine Förderdauern garantiert werden. Das Rahmengesetz macht keine Aussage zur Kumulierbarkeit von verschiedenen Fördermaßnahmen und schließt damit eine Kumulierbarkeit auch nicht aus. Die real gegebene Kumulierung von Fördermaßnahmen im Bereich der PV zeigt, dass sich die Auffassung durchgesetzt hat, dass eine Kumulierung zulässig ist und zwar nicht nur bei der Photovoltaik, sondern auch bei anderen erneuerbaren Energien. Eine Bewertung direkter Effekte des Rahmengesetzes ist kaum möglich, da es – der Natur eines Rahmengesetzes entsprechend - keine Detailregelungen enthält, die den letztlich über den Erfolg einer Fördermaßnahme entscheiden.

#### **Veränderte Großherzogliche Verordnung vom 30. Mai 1994**

Diese Verordnung enthielt in ihrer ursprünglichen Fassung Regelungen sowohl für die Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien als auch für die Förderung von Strom aus der Produktion in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Zwischenzeitlich wurde die Einspeisevergütung für den Strom aus erneuerbaren Energien durch spätere Verordnungen neu geregelt, so dass die Verordnung vom 30. Mai 1994 an dieser Stelle keine Gültigkeit mehr hat. Für die Kraft-Wärme-Kopplung gilt die Verordnung hingegen weiterhin. Ein bemerkenswerter Punkt in dieser Verordnung ist das Fehlen einer expliziten Förderhöchstdauer. In der Verordnung in ihrer derzeit gültigen Fassung wird lediglich festgelegt, dass Strom aus KWK-Anlagen zunächst für einen Zeitraum von zwei Jahren vom staatlichen Netzbetreiber CEGEDEL aufgekauft wird und dass sich dieser Mechanismus jeweils um ein Jahr verlängert wird, solange ihn weder der Betreiber der KWK-Anlage noch die CEGEDEL kündigen. Die Mindestdauer der Förderung ist mit zwei Jahren viel zu kurz, um auf deren Grundlage eine Investition in eine KWK-Anlage wirtschaftlich darstellen zu können. Über diese Frist hinaus enthält die Verordnung jedoch keine Garantien über die Aufrechterhaltung der Förderung. Dennoch werden in Luxemburg viele KWK-Anlagen unter diesem Förderregime, letztlich im Vertrauen auf einen Fortbestand der Regelung betrieben. Auch wenn die öffentliche Hand die Förderung relativ kurzfristig einstellen könnte, dürfte der Vertrauensschutz den Investoren gegenüber einem abrupten Auslaufen der Förderung entgegen stehen.

---

### **Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005 zur Einrichtung einer Ökoprämie für Elektrizität aus der Erzeugung mit Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Biogas**

Bei der Verordnung vom 3.8.2005 handelt sich um einen festen, von der Art der erneuerbaren Energie unabhängigen Einspeisetarif. Ziel der Fördermaßnahme ist es im Zusammenspiel mit anderen Maßnahmen eine Erhöhung des Angebots an Strom aus erneuerbaren Energien zu erreichen. Die Ökoprämie wird Anlagen für eine Dauer von bis zu 10 Jahren gewährt, die im Zeitraum zwischen dem 1. Januar 2005 und dem 31. Dezember 2007 in Betrieb genommen wurden bzw. werden. Die Höhe der Ökoprämie beträgt 0,025 €/kWh. Für Wasserkraftanlagen, Biomasseanlagen und Biogasanlagen ist die maximale Leistung einzelner Anlagen auf 3 MW beschränkt. Für Windkraftanlagen gilt eine Beschränkung von 5 MW für jede einzelne Anlage, um in den Genuss der Prämie zu kommen. Die Gewährung der Prämie schloss die Inanspruchnahme der zusätzlichen Vergütung nach der Einspeiseverordnung vom 30. Mai 1994 Mit der Neuregelung der Einspeisevergütung (Verordnung vom 14. Oktober 2005) ist dieser Ausschluss jedoch bedeutungslos geworden. Im Gegensatz zu den Vergütungen auf Basis der Einspeiseverordnung, die über einen Kompensationsfonds von allen Netznutzern getragen wird, finanziert sich die Ökoprämie aus Steuermitteln. Eine derartige Zahlung aus Steuermitteln könnte möglicherweise von der Kommission oder im Fall einer Klage vom europäischen Gerichtshof als unzulässige staatliche Beihilfe bewertet werden.

Grundsätzlich positiv an der Gestaltung der Prämie ist die Festlegung einer Förder- (höchst)dauer zu werten, denn diese erzeugt eine klarere Perspektive für Investoren, zumindest was den Anteil der Einnahmen angeht, der aus der Prämie stammt. Es bleibt jedoch zu beachten, dass von einer Förderhöchstdauer gesprochen wird, so dass auch eine kürzere Förderdauer prinzipiell möglich erschiene und dass die Verordnung einen Finanzierungsvorbehalt enthält. Bezüglich dieser beiden Unsicherheitsfaktoren dürfte die tatsächliche Durchführung der Verordnung wahrscheinlich für Investoren in neue Projekte als Richtschnur gelten. Eine Bewertung der Effekte dieser Verordnung allein ist kaum möglich, da nur im Zusammenspiel mit anderen Fördermechanismen die notwendige „kritische Förderhöhe“ erreicht wird, so dass auch diese ihre Wirkung entfalten kann.

### **Verordnung vom 14. Oktober 2005**

Die Verordnung vom 14. Oktober 2005 beruht auf dem Rahmengesetz von 1993 und enthält die derzeit gültige Regelung für die Einspeisetarife für Strom aus erneuerbaren Energien. Im Einklang mit dem Rahmengesetz ist es Ziel der Verordnung das Angebot an Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu erhöhen. Hinsichtlich der Einordnung des Instrumententyps handelt es sich hier um eine Förderung auf festen Einspeisetarifen. Die Förderdauer durch die Einspeisetarife ist in der Verordnung vom 14. Oktober 2005 nicht festgelegt. Das Förderinstrument wurde rückwirkend für alle Anlagen, die ab dem 1. Januar 2005 in Betrieb genommen worden waren, gültig und hat mit Ausnahme der Förderung für PV-Anlagen keine Gültigkeitsbeschränkung. PV-Anlagen können die Einspeisetarife dagegen nur erhalten, wenn sie im Zeitraum vom 1. Januar 2005 bis zum 31. Dezember 2007 in Betrieb genommen wurden.

Die Höhe der aufgrund dieser Verordnung gewährten Einspeisetarife ist mit Ausnahme der PV für alle erneuerbaren Energien gleich. Es wird für die nicht-solaren Stromerzeugungstechnologien lediglich in zwei Größenklassen differenziert. Anlagen bis 500 kW erhalten einen größenunabhängigen Tarif von 0.0776 €/kWh. Anlagen zwischen 501 kW und 10 000 kW erhalten einen größendegressiven Einspeisetarif, der sich nach der in der Gleichung 4-1 dargestellten Formel berechnet.

Gleichung 4-1: Vergütung für Strom aus erneuerbaren Energien aus Anlagen mit einer Leistung zwischen 501 und 10 000 kW nach der Verordnung vom 14. Oktober 2005

$$M = \left( 1.95 + \left( \frac{500}{P} \right)^{0.75} \right) * \frac{2,63}{100} \text{ €/ kWh}$$

mit

$M$  = Vergütung je kWh

$P$  = Leistung der Anlage

Die sich aus der Verordnung vom 14. Oktober ergebende Funktion der Einspeisevergütung für nicht-solare Stromerzeugungstechnologien in Abhängigkeit der Anlagenleistung ist in Abbildung 4-1 grafisch dargestellt. Dabei wird der starke Einfluss des Größendegressionseffektes sichtbar, durch den die Vergütung bereits bei Anlagen knapp über 2 MW unter 0,06 €/kWh fällt. Mit einem Exponenten von 0.75 wird in der Berechnungsformel für die Einspeisevergütung eine sehr starke Kostendegression mit der Anlagengröße unterstellt. In Realität sind solche Werte für die „economies of scale“ für die in Frage kommenden Techniken der erneuerbaren Energien kaum zu beobachten.

Bei Windturbinen ist aufgrund der Überlagerung von Lernkurven aus technologischem Lernen und von Größeneffekten vielmehr eine gestuft aufwärts weisende Kostenfunktion zu beobachten. Die niedrigsten spezifischen Kosten werden derzeit von Anlagen in der Größenordnung von 600 kW erreicht, da hier aufgrund der hohen produzierten Stückzahlen dieser Anlagen die Lerneffekte am größten sind. Zu größeren Leistungen hin steigen die Kosten wieder an, da in den größeren Leistungsklassen bisher deutlich weniger Anlagen produziert worden sind und damit die erreichten Lerneffekte deutlich geringer sind. Im Bereich der jeweils üblichen Größenklassen der Anlagen sind dagegen leicht Kostendegressionseffekte mit der wachsender Anlagengröße zu erwarten. Die geringen spezifischen Kosten der Anlagenklasse um 600 kW bewirken, dass diese Anlagen dort in sehr großem Maße eingesetzt werden, wo die Anzahl der Anlagenstandorte kaum beschränkt ist wie zum Beispiel in dünner besiedelten Entwicklungsländern. In Weltregionen wie Europa, wo die Standorte ein knappes Gut darstellen, werden größere Turbinen gewählt, um die Standorte möglichst gut auszunutzen. In Luxemburg ist die Genehmigung von Standorten für Windkraftanlagen wie in vielen anderen Ländern Europas kein einfaches Unterfangen, so dass hier eine Förderpolitik, die auf eine möglichst intensive Ausnutzung der knappen möglichen Standorte hinwirkt, insbesondere dann angeraten ist, wenn sich abzeichnet, dass sie mit nur kleinen bis mittleren

Anlagen belegt werden sollten.

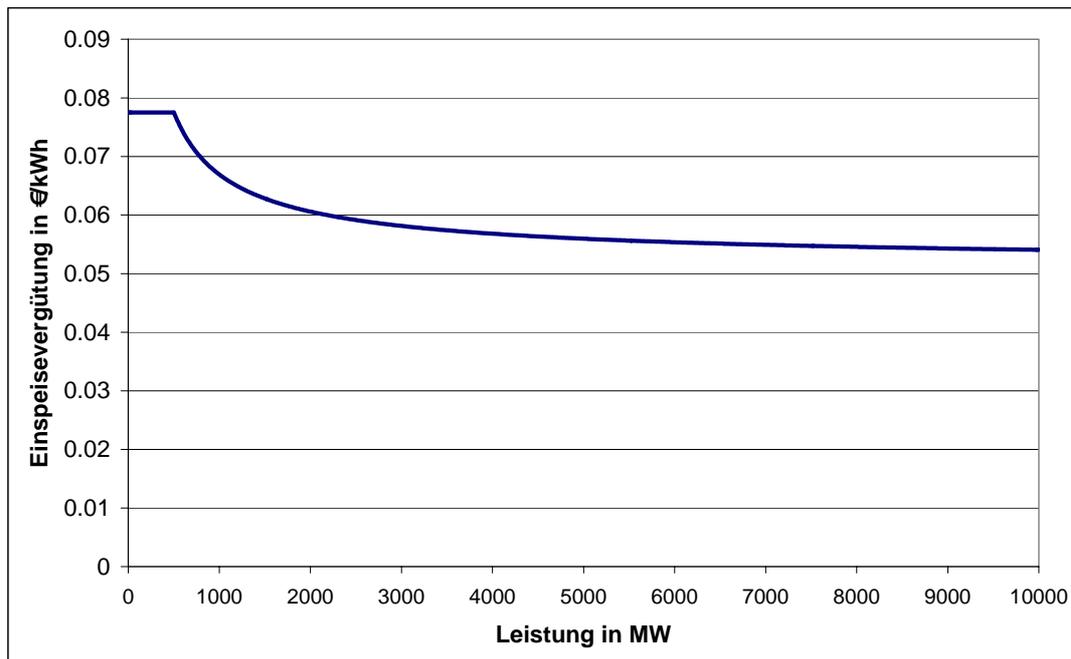


Abbildung 4-1: Grafische Darstellung der Höhe der Einspeisevergütung nach der Verordnung vom 14.10.2005 in Abhängigkeit der installierten Leistung.

Auch bei Technologien zur Konversion von Biomasse in Strom ist das Erreichen von Kostendegressionen wie in der Verordnung vorgesehen nicht zu erwarten. Allenfalls bei den Komponenten mit dem Charakter von Anlagen im Sinne der Verfahrenstechnik wie z.B. bei Fermentern sind Kostendegressionen in Abhängigkeit der Leistung ( $P$ ) im Bereich von  $P^{0,78-0,85}$  zu erreichen. Bei den in der Regel verwendeten Motoren zur Umsetzung in elektrische Energie werden dagegen eher Abhängigkeiten im Bereich von  $P^{0,95}$  beobachtet. Wenn sich also bei Biomasetechnologien nicht erhebliche Effizienzgewinne im Betrieb größerer Anlagen ergeben, ist aufgrund dieser Überlegungen eine geringere Profitabilität bei größeren Anlagen zu erwarten.

Im Rahmen der Verordnung wird für Anlagen, die Strom aus Biomasse, Klärgas und Biogas erzeugen, eine zusätzliche Vergütung von 0,025 €/kWh gewährt. Diese zusätzliche Vergütung ist mit der so genannten Ökoprämie kumulierbar, dessen Gewährung mit der Verordnung vom 3.8.2005 neu geregelt wurde und der eine Prämie in gleicher Höhe (0.025 €/kWh) darstellt. Somit setzt sich für diese Anlagen der Biomasse die auf produzierte Energie ausgerichtete Förderung aus drei Elementen zusammen und zwar aus der Einspeisevergütung, dem Bonus und der Ökoprämie.

PV-Anlagen die von natürlichen Personen betrieben werden, deren Leistung 30 KWp nicht

überschreitet und deren Errichtung aufgrund der Verordnung vom 3.8.2005<sup>7</sup> gefördert wurde, erhalten eine Einspeisevergütung von 0,56 €/kWh. PV-Anlagen, die von Kommunen betrieben werden erhalten eine Einspeisevergütung von 0,28 €/kWh. Alle Anlagen, die diese Bedingungen nicht erfüllen, erhalten lediglich eine Vergütung, die dem Großhandelspreis für Strom entspricht. Die Tarife der Einspeiseverordnung vom Jahr 2005 sind im Überblick in Tabelle 4-1 dargestellt.

Tabelle 4-1: Netzeinspeisetarife entsprechend den verschiedenen RES-Technologien

Technologie	Bedingungen/Beschreibung	Tarif
alle außer PV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1-500 kW (Kategorie 1):</li> <li>- 501-10000 kW (Kategorie 2):</li> </ul>	0,0776 €/kWh $M=(1,95+(500/P)^{0,75}) * 2,63/100$ €/kWh
zusätzlich: Biomasse, Biogas, Klärgas und Deponiegas	1-10.000 kW	0,025 €/kWh
Photovoltaik		
nicht-gemeindliche Anlagen	<30 kW:	0,56€/kWh
gemeindliche Anlagen	1-50 kW	0,28 €/kWh

Eine Bewertung der Wirksamkeit der Verordnung aufgrund von Marktbeobachtungen ist noch nicht möglich, weil die Verordnung dazu noch nicht lange genug in Kraft ist. In der vorangegangenen Förderperiode 2001-2004 erzielte das Vorläuferprogramm<sup>8</sup> vor allem einen starken Zuwachs im Bereich der PV aber auch signifikantes Wachstum bei Biogas und Wind. Hier wuchs der Menge eingespeisten abgerechneten Stroms von 0,040 GWh im Jahr 2000 auf 9,20 GWh in 2004. An dieser Stelle ist natürlich zu beachten, dass der so deutliche Zuwachs bei der PV aus dem Zusammenspiel einer hohen Investitionsförderung mit hohen Einspeisevergütungen resultierte.

Merklich verhaltener sah der Erfolg bei anderen erneuerbaren Technologien aus. Im Bereich der Wasserkraft hat zwischen den Jahren 2002 und 2004 keine Veränderung der Kapazität stattgefunden, was jedoch sicherlich auch daran liegt, dass neue Wehre für komplett neue

<sup>7</sup> Am 3.8.2005 wurden zwei Verordnungen die erneuerbaren Energien betreffend beschlossen: Die eine behandelt die Gewährung von Investitionszuschüssen für die Errichtung von Anlagen, auf welche an dieser Stelle Bezug genommen wird. Die andere behandelt eine zusätzliche Einspeisevergütung (ehemals „grüner Franken“) für bestimmte Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien.

<sup>8</sup> Es handelt sich im strengen Sinne nicht um ein einzelnes Programm, sondern um die Kombination der Maßnahmen aus der Verordnung vom 30. Mai 1994 und der Verordnung vom 28. Dezember 2001.

---

Anlagen kaum genehmigungsfähig wären.<sup>9</sup> Die Kapazität der Windenergie stieg in der Zeit von 2002 bis 2004 dagegen von 16,4 MW auf 52,5 MW. Die Leistung der Biogasanlagen stieg in dem Zeitraum dagegen nur von 3,0 MW auf 4,8 MW an und erreichte damit eine deutlich geringere Zuwachsrate.

Auch ohne eine gesicherte marktseitige Reaktion beobachten zu können lassen sich dennoch einzelne Elemente der Verordnung bewerten. Grundsätzlich zeigt die Erfahrung aus anderen Ländern, dass es in der Regel nicht zielführend ist, die Höhe einer Einspeisevergütung technologieunabhängig festzulegen. Im Bestreben alle erneuerbaren Energien möglichst effizient zu fördern, sollten jeweils technologiespezifische Einspeisevergütungen festgelegt werden, da sich die technologiespezifischen Erzeugungskosten noch beträchtlich voneinander unterscheiden. Nur so kann – dies aber auch nur wenn es gelingt die Fördermaßnahme für alle Technologien sinnvoll zu kalibrieren – einerseits ein möglichst ausgeprägtes Wachstum aller Technologien zur Nutzung der erneuerbaren Energien erreicht werden und andererseits eine effiziente Verwendung der Fördermittel sichergestellt werden in dem Sinne dass bei keiner Technologie die Tarife zu einer überhöhten Förderung und zu großen Extraprofiten führen.

Die Veränderung der Förderstruktur mit der Einspeiseverordnung von 2005 hatte vor allem für den Bereich der PV deutliche Auswirkungen. Während in den Jahren 2001 bis 2004 der Hauptanteil der Vergütung von erzeugtem PV-Strom aus den Mitteln der Ökoprämie stammte, resultiert der Hauptteil der Förderung seit 2005 aus der Einspeisevergütung. Die Gewährung der Ökoprämie war für einen Zeitraum von 20 Jahren garantiert, während die Einspeisevergütung nur für zwei Jahre garantiert ist und danach jährlich gekündigt werden kann.

Die sichere Gewährung einer Förderung über eine festgelegte Zeitperiode ist ein Kernelement der erfolgreichen Fördersysteme mit Einspeisevergütung. Zwar sind durchaus verschiedene Modelle der Einspeisevergütung denkbar, die auch mehr Marktelemente enthalten können, wie zum Beispiel Prämien, die zusätzlich zu einem am Markt erzielbaren Großhandelspreis gezahlt werden, aber die Schaffung eines Risikos, dass der ursprüngliche „Markt“ (der öffentliche Aufkäufer, der die Einspeisevergütung auszahlt) im Prinzip jederzeit und unvorhersehbar wegfallen könnte, dürfte für viele Investoren prohibitiv wirken. Diese Unsicherheit könnte eventuell sogar stärker für den sich anscheinend abzeichnenden drastischen Einbruch bei der Errichtung von PV-Anlagen verantwortlich sein als die weniger hohen monetären Anreize.

### **Veränderte Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005 zur Einrichtung eines Förderprogramms für natürliche Personen hinsichtlich der Förderung der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien**

Mit der Verordnung vom 3.8.2005 wurde eine Nachfolgeregelung zu dem Ende 2004 ausge-

---

<sup>9</sup> Auch wenn neue Wehre nicht genehmigungsfähig sind, besteht immer noch ein Potenzial für eine Leistungssteigerung durch Ertüchtigung alter Anlagen, Ausstattung bestehender Wehre ohne Turbine mit Turbinen oder Stollen. Siehe Abschnitt 5.6.

laufenen Programm zur Bezuschussung von Investitionen in Anlagen zur Nutzung erneuerbare Energien getroffen. Die Verordnung erfasst alle Anlagen, deren Errichtungszeitpunkt zwischen dem 1. Januar 2005 und dem 31. Dezember 2007 liegt, so dass formal keine Lücke zu dem vorangegangenen Förderprogrammen entsteht. Allerdings ist zu beachten, dass in der ersten Jahreshälfte bis August 2005 Unsicherheit bei potenziellen Investoren darüber geherrscht haben dürfte, ob eine Nachfolgeregelung beschlossen wird und in wie weit sie auch nachträglich auf in der ersten Jahreshälfte errichtete Anlagen angewendet wird. Ausschließliche Zielgruppe dieses Förderprogramms sind natürliche Personen.

Die Förderung der Anlagen geschieht über die Gewährung von Zuschüssen auf die Investitionskosten und erstreckt sich auf die folgenden Energiearten: Solarthermie, Photovoltaik, Holzheizungen – sowohl Scheitholz als auch Hackschnitzel und Pelletheizungen, des weiteren werden unter dem Kapitel „erneuerbare Energien“ in der Verordnung die Errichtung von Niedrigenergiehäusern, die energetische Sanierung und Einrichtung der passiven Solarenergienutzung von bestehenden Wohngebäuden sowie die Errichtung von Saisonwärmespeichern. Unter dem Kapitel „Energieeffizienz“ werden effiziente Feuerungsanlagen für Wohngebäude, der Anschluss an ein Wärmenetz, Wärmepumpen sowie kontrollierte Lüftungssysteme gefördert. Je nach Sichtweise könnten dabei Wärmepumpen auch als Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien gewertet werden, auch wenn sie in dieser Verordnung als Energieeffizienztechnologie aufgeführt werden.

Für PV beinhaltet die Verordnung eine Obergrenze für die kumulierte Kapazität der geförderten Anlagen. Dabei werden die Anlagen nach dem „Windhundprinzip“ ausgewählt; das bedeutet, dass Anlagen, so lange in der Reihenfolge ihrer Registrierung bei der zuständigen Behörde die Fördermittel erhalten, bis die Kapazitätsgrenze erreicht wurde. Die geförderte Gesamtkapazität wurde bei PV-Anlagen auf 3 MWp festgelegt. Darüber hinaus wurde eine Beschränkung bei der Förderung der Errichtung von Niedrigenergiehäusern und bei der energetischen Sanierung erlassen<sup>10</sup>. Grundsätzlich ist eine Investitionsförderung mit einer Gesamt mengenbeschränkung ist auch in anderen Ländern nicht unüblich und erlaubt es das einzustellende Budget im öffentlichen Haushalt genau festzulegen. Darüber hinaus setzt dieses Verfahren übermäßigen Mitnahmeeffekten eine Grenze, wenn die individuelle Förder summe bei bestimmten Technologien irrtümlich zu hoch angesetzt wurde.

Die reine Förderung der Investition in Energietechniken wird auch durch Informationskampagnen und Fachberatung aufgewertet. Für letztere wird eine Pauschale von 125€ pro Investition bereitgestellt, über die die Kosten für fachlichen Rat z.B. von der Energieagentur oder einer anderen qualifizierten Stellen abgegolten werden können.

Über die Subventionen aus der Verordnung vom 17. Juli 2001, in der das Vorläuferpro-

---

<sup>10</sup> Mit der Verordnung vom 20. Juni 2006 wurde diese Beschränkung jedoch wieder aufgehoben.

---

gramm geregelt war, wurden im Bereich Photovoltaik über 4400 Projekte genehmigt<sup>11</sup>, im Bereich Biomasse 22 Hackschnitzelkessel, 52 Holzvergaserkessel und 30 Pelletskessel, im Bereich Solarthermie 749 Projekte und im Bereich Geothermie/Wärmepumpen 21 Projekte genehmigt. Die große Nachfrage im Bereich Photovoltaik ist vor allem auf die zusätzliche Einspeisevergütung zurückzuführen. Eine Erläuterung und Bewertung der Details für die einzelnen Energiearten finden sich in Tabelle 4-2 bis Tabelle 4-4.

---

<sup>11</sup> Es ist jedoch davon auszugehen, dass die tatsächliche Zahl der Anlagen kleiner war, da Hinweise darauf bestehen, dass größere Anlagen in kleinere Projekte aufgeteilt wurden, um dadurch in den Genuss der günstigen Förderbedingungen zu kommen. Die genaue Zahl der Projekte konnte noch nicht ermittelt werden. Stand 30.3.06 waren 4488 Projekte genehmigt.

Tabelle 4-2: Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005, Bereich Solarthermie

	<b>Beschreibung</b>
Spezifizierung des Instruments	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Investitionskostenzuschuss von 50% der anrechenbaren Kosten, bis zu einem Maximum von:</li> <li>(a) 3 000 € für thermische Solaranlagen ohne Heizungsunterstützung</li> <li>(b) 5 000 € für thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung</li> <li>(c) 38 000 € für Mehrfamilienhäuser</li> </ul> <p>Minimale spezifische Leistung: 525 kWh/m<sup>2</sup> a</p>
Vergleich zum vorigen Programm	<p>Erfahrungen und Erkenntnisse aus vorangegangenen Förderprogrammen (2001-2004) wurden bei der Gestaltung mit berücksichtigt um die Effizienz der Maßnahme zu verbessern. Das finanzielle Förderprogramm wird wie in den Vorläuferprogrammen durch Informationskampagnen und die Möglichkeit Fachberatung in Anspruch zu nehmen aufgewertet</p> <p>Programm von 2001:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Haushalte: 40%, bis zu einem Maximum von:</li> <li>(a) 2 200 € für thermische Solaranlagen ohne Heizungsunterstützung</li> <li>(b) 3 000 € für thermische Solaranlagen mit Heizungsunterstützung</li> <li>(c) 38 000 € für Mehrfamilienhäuser</li> </ul> <p>Die minimale spezifische Leistung, die die Anlagen erreichen mussten, um gefördert zu werden lag bei 350 kWh/m<sup>2</sup> a</p>
Bewertung der Effekte im Bereich Solarthermie	<p>In der Praxis wurden im vorherigen Programm fast alle Anfragen aller Technologien genehmigt. Eine Detaillierung der Erfolgsquote nach Art der erneuerbaren Energien liegt nicht vor. Auf der Basis des Förderprogramms 2001-2004 und mit Stand Januar 2005 wurden insgesamt <b>749 Projekte</b> im Bereich der Solarthermie realisiert. Das entspricht ungefähr 117 installierten Anlagen/Jahr. Für die laufende Programmperiode stellt sich die Frage, ob der Ausbau weiterhin so fortschreitet oder ob sich bereits eine Marktsättigung einstellt. Andererseits könnte die Anzahl der im vorangegangenen Förderzeitraum installierten Anlagen gemessen an rund 120 000 Wohngebäuden in Luxemburg und ca. 1000 neu errichteten Gebäuden pro Jahr auch als eher gering gewertet werden.</p> <p>Eine Bewertung der Effekte im laufenden Förderprogramm ist noch nicht auf Basis von realen Ergebnissen möglich, da noch zu wenig Daten vorliegen. Die Erhöhung der Förderrate und auch der maximalen Fördersumme könnte den Markterfolg von solarthermischen Anlagen verbessern. Die höheren technischen Anforderungen sollten dabei kein Hindernis sein und entsprechen auch den technischen Anforderungen, die z.B. vom Förderprogramm des Bundes in Deutschland erhoben werden (vgl. BAFA-Richtlinie 14.3.2006)</p>

Tabelle 4-3: Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005,  
Bereich Biomasse

	<b>Beschreibung</b>
Spezifizierung des Instruments	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizung: Holzhackschnitzel- oder Holzpellettheizung – 30% bis zu einem Maximum von 4 000 €, Holzpellettheizung Mehrfamilienhaus bis 4 000 €/Wohnung, max. 20 000 €</li> <li>• Holzvergaserheizung - 25%, bis zu einem Maximum von 2 500 €; Mehrfamilienhaus bis 2500 €/Wohnung, max. 10 000 €</li> <li>■ Holzpelletofen: Einfamilienhaus 30% bis max. 2 500 €</li> </ul>
Vergleich zum vorigen Programm	<p>Programmperiode 2001-2004:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Heizung: Zentralheizung (Hackschnitzel, Holzpellets oder Holzvergaserheizung) - 25%, bis zu einem Maximum von €3 000;</li> <li>• Hackschnitzelfeuerungsanlage zur Versorgung eines Wärmenetzes: 30% bis zu einem Maximum von 38 000 €. In Ausnahmefällen für Anlagen mit regionalem Charakter oder gewisser Bedeutung können auch mit über 50% der Kosten gefördert werden bis zu einer Obergrenze von 75 000 Euro</li> <li>• Biogasanlagen und Hygienisierungsanlagen mit 25 % bis zu einem Maximum von 38 000 €. Anlagen mit regionalem Charakter oder einer gewissen Bedeutung können auch mit über 50 % der Kosten gefördert werden bis zu einer Obergrenze von 150 000 €</li> </ul> <p>Die Förderung im Bereich Einfamilienhäuser wurde leicht verbessert, während die Bedingungen bei Mehrfamilienhäusern etwas strenger gestaltet wurden.</p>
Bewertung der Effekte	<p>Die Wirksamkeit der Vorläufermaßnahme im Bereich Biomasse ist eher als moderat einzuschätzen. Es werden nur 104 Anlagen zur Holzheizung in der Förderstatistik ausgewiesen. Aus dieser Sicht ist die Verbesserung der Förderbedingungen im Bereich von Einfamilienhäusern als positiv zu werten.</p>

Tabelle 4-4: Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005, Bereich PV

	<b>Beschreibung</b>
Spezifizierung des Instruments	Haushalte: 15% bis zu max. 900 €/kWp. max. 1kW pro erwachsene Person, Haushaltschef 1kW zusätzlich. max. 30kW pro Projekt
Vergleich zum vorigen Programm	- Programmperiode 2001-2004: (a) Einfamilienhaus: 50% bis zu einem Maximum von 5 000 €/kWp. Maximale anrechenbare Kapazität: 4 kWp pro Projekt (b) Mehrfamilienhaus: 50% mal der Anzahl an Wohnungen bis zu einem Maximum von 38 000 €
Bewertung der Effekte	Im Zeitraum 2001-2004 wurden über <b>4400 Projekte</b> durch einen Investitionszuschuss unterstützt, mit einem Betrag von insgesamt <b>54.3 M€</b> Im Zusammenspiel des Einspeisetarifs und der auf 20 Jahre angelegten Ökopremie von 0,55 €/kWh bis 0,45 €/kWh <sup>12</sup> wurde im Bereich PV keine wirtschaftlich effiziente Förderung erreicht, sondern offensichtlich große Extraprofiten bei den Investoren. Dies gilt insbesondere für die Investoren großer Anlagen, auf die das Programm offensichtlich nicht ausgerichtet gewesen war. Die im Vergleich zu den anderen erneuerbaren Energien überschäumende Aktivität ist hierfür ein deutliches Anzeichen.  Seit der Gültigkeit der Zuschussverordnung und der Einspeiseverordnung von 2005 ist die Investitionstätigkeit weitgehend zum Erliegen gekommen. Dies liegt vermutlich vor allem an der fehlenden Garantie für eine Förderdauer. Die Absenkung des Investitionszuschusses dürfte sich dagegen nicht so hemmend ausgewirkt haben sondern vielmehr auch noch die deutliche Beschränkung der Anlagengröße und der Kumulierbarkeit einzelner Projekte natürlicher Personen.

<sup>12</sup> Der Fördersatz der Ökopremie war zeitlich degressiv gestaltet. Anlagen die ab 2003 errichtet wurden erhielten 0.50 €/kWh, Anlagen die ab 2004 errichtet wurden erhielten 0,45 €/kWh.

Tabelle 4-5: Großherzogliche Verordnung vom 3. August 2005, Bereich Wärmepumpen

	<b>Beschreibung</b>
Spezifizierung des Instruments	<p>Wärmepumpenanlagen zur Raumwärmebereitstellung in Haushalten und zur Warmwasserbereitung:</p> <p>Zuschuss von 40% der Investitionskosten bis zu max. 4000 € pro Anlage bei Einfamilienhäusern</p> <p>Zuschuss von ebenfalls 40% der Investitionskosten bei Mehrfamilienhäusern, wobei sich die Maximalsumme aus dem Produkt der Anzahl der Wohneinheiten und der Summe von 4000 € errechnet, wobei ein Gesamtmaximum von 10 000 € nicht überstiegen werden darf.</p>
Bewertung der Effekte	<p>Die Investitionstätigkeit in Wärmepumpen war in der Vergangenheit in Luxemburg bisher sehr moderat, so dass hier noch nicht von einem wirklichen Erfolg der Maßnahme gesprochen werden kann.</p>

### **Gesetz vom 31. Mai 1999: Einführung eines Umweltschuttfonds für Kommunen, Gemeindeverbände und öffentliche Einrichtungen**

Der mit dem Gesetz vom 31. Mai 1999 geschaffene Fonds unterstützt Kommunen unter anderem bei der Errichtung von Anlagen zur Nutzung von erneuerbaren Energien. Die Unterstützung wird in Form von Investitionszuschüssen gewährt. Entsprechende Projekte werden einem mit der Verwaltung des Fonds beauftragten Komitee eingereicht, das über die Zuteilung der Gelder entscheidet. Voraussetzung ist das Einreichen eines formellen Antrags und der vorschriftsmäßigen Belege. Gefördert werden solarthermische Anlagen, Biomasseanlagen und PV-Anlagen. Die Höhe der Fördersätze wird jährlich festgelegt, bisher jedoch nur einmal verändert. Sie betrug für solarthermische Anlagen und Biomasseanlagen zuletzt 33 % der anrechenbaren Kosten und für PV-Anlagen 15 % der anrechenbaren Kosten.

## Gesetz vom 22. Februar 2004 zur rationellen Energienutzung und zum Einsatz erneuerbarer Energien in Unternehmen

Tabelle 4-6: Details zum Gesetz vom 22. Februar 2004

	<b>Beschreibung</b>
Erneuerbare Energiequelle	Alle
Beschreibung des Instruments	Investitionszuschüsse
Ziel des Instruments	das Angebot an erneuerbaren Energien erhöhen
Instrumenttyp	Zuschüsse
Realisierungsphase der Methode	Eingeführt
Laufzeit des Instruments	Dauer: bis 31. Dezember 2007
Spezifizierung des Instruments	Investition in Einsatz erneuerbarer Energien: maximal 40% der Investitionskosten. Für kleine und mittelständische Betriebe kann dieser Betrag um 10 Prozentpunkte erhöht werden.
Schlüsselfaktoren	gilt nicht für Betriebe im Bereich Landwirtschaft, Fischerei, Aquakultur und Schiffbau

Das Gesetz vom 22. Februar 2004 definiert erneuerbare Energien zwar in ihrer üblichen Breite, bei der Beschreibung der förderfähigen Aktivitäten werden jedoch nur die Energieeffizienz, die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und die Kraft-Wärme-Kopplung erwähnt. Die reine Wärmeerzeugung mit erneuerbaren Energien wird von dem Gesetz nicht erfasst.

Die für die Förderung anrechenbaren Kosten werden im Gesetz vom 22. Februar 2004 nicht strikt definiert. Daraus dürfte sich für potentielle Investoren einige Unsicherheit über die zu erlangende Förderung für anvisierte Projekte ergeben.

## Gesetz vom 30 Juni 2004 zur Schaffung eines Rahmens für die Förderung mittelständischer Unternehmen

Tabelle 4-7: Details zum Gesetz vom 30. Juni 2004

	<b>Beschreibung</b>
Erneuerbare Energiequelle	Alle
Beschreibung des Instruments	Investitionszuschüsse
Ziel des Instruments	das Angebot an erneuerbaren Energien erhöhen
Instrumenttyp	Zuschüsse
Realisierungsphase der Methode	Eingeführt
Spezifizierung des Instruments	Investition in Einsatz erneuerbarer Energien: maximal 40% der Investitionskosten. Dieser Betrag um 10 Prozentpunkte erhöht werden, sofern die Anlage die Versorgung eine Gemeinschaft von Nutznießern sicherstellt.

Anders als bei der Förderung von Unternehmen nach dem Gesetz vom 22. Februar 2004 ist beim Gesetz vom 30. Juni 2004 die Förderung erneuerbarer Wärme nicht ausgeklammert, so dass kleine und mittlere Unternehmen über diese Fördermaßnahme auch für Anlagen rein zur Erzeugung von Wärme aus erneuerbaren Energien Zuschüsse erhalten könnten.

Das Bestehen von zwei Fördergesetzen mit sehr ähnlichen, zum großen Teil sich überlappenden Zielsetzungen und Zielgruppen wie hier zur Förderung der Nutzung erneuerbarer Energien in Unternehmen ist im besten Fall der Entwicklung nicht weiter förderlich. Darüber hinaus könnten sich auch Ineffizienzen durch Mitnahmeeffekte ergeben, die durch die gezielte Inanspruchnahme der jeweils günstigeren Förderbedingungen durch die Unternehmen entstehen. Weiter könnten sich sowohl bei Unternehmen als auch bei Investoren Unklarheiten über die Zuständigkeiten ergeben. Außerdem wird es für die Politik noch schwieriger die erzielbare Wirkung einzelner Förderbereiche und die damit notwendigen Budgets abzuschätzen, wenn einzelne Förderprogramme miteinander konkurrieren.

## Gesetz vom 24. Juli 2001 zur Unterstützung der ländlichen Entwicklung

Tabelle 4-8: Details zum Gesetz vom 24. Juli 2001 zur Unterstützung der ländlichen Entwicklung

	Beschreibung
Erneuerbare Energiequelle	Wasserkraft, Biomasse, Biogas, Wärmepumpen
Beschreibung des Instruments	Investitionszuschüsse
Ziel des Instruments	das Angebot an erneuerbaren Energien erhöhen
Instrumenttyp	Zuschüsse
Realisierungsphase der Methode	Eingeführt; Gültigkeit von einigen Jahren erwartet
Laufzeit des Instruments	
Spezifizierung des Instruments	Investition in Wasserkraft- (<60 kW) oder Biomasseanlagen: maximal 40% der Investitionskosten (Art. 54 Abs. a). Die Gesamtsumme der Unterstützung darf in einem Zeitraum von 3 Jahren 100.000€ nicht überschreiten (zusammen mit anderen bezuschussbaren Aktivitäten unter diesem Gesetz)  Investitionen in Biogasanlagen und Wärmepumpen: zwischen 55 % und 75 % der Investitionskosten, bei einem maximalen Investitionsvolumen von 525.000€ für Haupterwerbsbetriebe und 337.500€ für Nebenerwerbsbetriebe.

### Förderung von Biotreibstoffen

Die Förderung von Biotreibstoffen geschah 2006 in Luxemburg über die Minderung der Mineralölsteuer auf Otto- und Dieselmotorkraftstoffe, wenn diesen Biotreibstoffe mit mindestens 2.93 % (Ottokraftstoffe) bzw. 2.17 (Dieselmotorkraftstoffe) beigemischt wurden<sup>13</sup>. Die Steuerbefreiung für den Biotreibstoffanteil hat nicht zu einer Erreichung des Ziels von 2,75 % Biokraftstoffanteil bezogen auf den Energieinhalt im Jahr 2006 geführt. Daher gilt ab dem 01.01.2007 eine Beimischungspflicht für Biokraftstoffe.

## 4.2 Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien

Die allgemeine Gesetzgebung bildet den Rahmen für jede wirtschaftliche Aktivität, um die es sich auch bei der Nutzung von erneuerbaren Energien handelt. Wie auch bei anderen wirtschaftlichen Aktivitäten spielen das Genehmigungsrecht, das Umwelt- und das Naturschutzrecht eine wichtige Rolle dabei die verschiedenen gesellschaftlichen Interessen zum Ausgleich zu bringen. Darüber hinaus kommen auch Gesetze aus dem allgemeinen Energiemarktrecht, dem Wasserrecht, der Landesplanung und die Klimagesetzgebung zur Anwen-

<sup>13</sup> Die Regelung der Steuer ist im Gesetz vom 23. Dezember 2005 und in der Großherzoglichen Verordnung vom 30. Dezember 2005 festgeschrieben.

dung. Dabei hat nicht nur die Gesetzgebung selbst, sondern auch die Verwaltungspraxis und die in Streitfällen hinzu gezogene Rechtsprechung einen Einfluss auf die sich real einstellenden Rahmenbedingungen für die Nutzung erneuerbarer Energien.

Die Bewertung der rechtlichen Rahmenbedingungen an dieser Stelle erfolgt im Rahmen einer technisch-wirtschaftlichen Analyse der erneuerbaren Energien. Es handelt sich nicht um ein juristisches Gutachten.

#### **4.2.1 Allgemeines zum Genehmigungsrecht**

Das Genehmigungsrecht für technische Anlagen in Luxemburg fußt auf dem „Commodo-Gesetz“.<sup>14</sup> Grundlegendes Prinzip des Genehmigungsrechtes ist dabei die Verwendung von „besten verfügbaren Technologien“<sup>15</sup>. Dieser Grundsatz zur Verwendung von „best practice“ wird nicht durch die eventuell beschränkte Verfügbarkeit solcher Techniken in Luxemburg begrenzt, sondern es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass solche Techniken eventuell außerhalb Luxemburgs beschafft werden müssen. Das „Commodo-Gesetz“ beschreibt die Verfahren der Prüfung und Genehmigung und teilt die wirtschaftlichen Aktivitäten in vier Klassen ein, die nach der Gewichtigkeit und Art der möglichen Auswirkungen der Aktivitäten unterschieden werden. Je nach Klassifizierung müssen Anlagen ein vollständiges Genehmigungsverfahren bei nach Arbeits- und Umweltrecht durchlaufen oder können in einfacheren Verfahren genehmigt werden.

Die Pflicht, beste verfügbare Techniken einzusetzen, ist für Antragsteller in so weit problematisch, als die Ausführungsbestimmungen des Luxemburger Genehmigungsrechtes nur wenig Details bezüglich der Definition der besten verfügbaren Techniken enthalten. Aufgrund der Größe des Landes ist es schlicht nicht möglich einen ähnlichen hohen Grad der Detaillierung zu erreichen, wie er z.B. in den benachbarten größeren Ländern besteht. Die Umweltverwaltung als Genehmigungsbehörde zieht deshalb fallweise passende technische Regelwerke aus anderen Ländern als Richtschnur für ihre Entscheidungen heran, ist aber dabei in keiner Weise daran gebunden, diese in diesen Fällen exakt zu übernehmen. Es steht der Genehmigungsbehörde frei, prinzipielle Anforderungen aus ausländischen Regelwerken als Grundlage für Genehmigungen zu verwenden und die spezifischen Anforderungen an die Luxemburger Gegebenheiten anzupassen.

Aufgrund dieses vergleichsweise großen Ermessensspielraums der Genehmigungsbehörden sind Antragstellern, die notwendigen technischen Anforderungen im Vorhinein oft nicht bekannt und sie sind nicht in der Lage ihre Anlagen dementsprechend zu planen und auszulegen. Darüber hinaus ist es aufgrund dieser Situation noch ein Stück schwerer belastbare Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Business-Pläne zu erstellen als es unter den Bedin-

---

<sup>14</sup> Loi du 10 Juin 1999 relative aux établissements classés

<sup>15</sup> Im französischen Original „meilleures technologies disponibles“. In Artikel 13 des Gesetzes wird die Pflicht zur Verwendung der „besten verfügbaren Technologien festgelegt und auch, dass in besonderen Fällen darüber hinaus gehende Auflagen erteilt werden können.

gungen eines komplexen Wirtschaftslebens ohnehin schon ist.

Nicht nur die Betreiber von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien sehen sich mit dieser Situation konfrontiert, sondern alle Wirtschaftstreibenden in Luxemburg. Dennoch könnte es möglich sein, dass insbesondere die Techniken der erneuerbaren Energien nachteilig betroffen sind, da es sich hierbei oft um für Luxemburg neue Techniken handelt, wo die Behörden aus Gründen der allgemeinen Risikovorsorge zunächst strengere Maßstäbe anwenden. Außerdem werden Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien oft von kleinen und mittleren Unternehmen und auch von natürlichen Personen betrieben, deren spezifische administrative und juristische Kapazität geringer ist als die großer Unternehmen. Damit sind sie weniger in der Lage, die in den Gesetzen vorhandenen Spielräume in der Auseinandersetzung mit den Behörden für sich nutzbar zu machen.

#### **4.2.2 Wasserkraft**

Jegliche Veränderung an Wasserläufen bedarf einer naturschutzrechtlichen Genehmigung (Art. 8, Gesetz vom 28. Mai 2004). Auch wenn offensichtlich noch an wenigen Standorten das Potenzial bestünde, neue Stauwehre mit Kleinwasserkraftanlagen zu errichten wären derartige Projekt aus Gründen des Naturschutzes, also des Schutzes anderer schützwürdiger Güter in Luxemburg nicht genehmigungsfähig. Aus diesen Gründen wird von einer detaillierteren Betrachtung wasserrechtlicher und naturschutzrechtlicher Genehmigungsverfahren abgesehen. Dies schließt jedoch nicht aus, dass bestehende Wehre ohne Wasserkraftanlagen genutzt werden könnten oder bestehend Anlagen zu ertüchtigen. Allgemein spielen bei all diesen Aktivitäten vor allem die Abwägung der naturschützerischen Belange eine wichtige Rolle.

#### **4.2.3 Windkraft**

Windkraftanlagen dürfen in Luxemburg nur an Standorten errichtet werden, die innerhalb so genannter „Windzonen“ liegen. Diese Regelung hat zur Folge, dass potenzielle neue Standorte entweder innerhalb solcher Zonen liegen müssen, oder aber im Rahmen der Projektentwicklung eine Umwidmung der Standortareale in Windzonen durch die lokalen Verwaltungsbehörden durchgeführt werden muss. Bei Projekten in der Vergangenheit musste in der Regel eine solche Umwidmung erreicht werden. Der Erfolg eines Verfahrens zur Umwidmung kann dabei natürlich nicht im Vorhinein sichergestellt werden. Windkraftanlagen müssen nach kommunalem Recht durch eine Baugenehmigung genehmigt werden.

#### **Betriebsgenehmigung**

Mit der Betriebsgenehmigung für eine Windkraftanlage oder für einen Windpark erteilt die öffentliche Hand dem Betreiber das Recht seine Anlage(n) zu betreiben und schützt ihn gleichzeitig vor privatrechtlichen Forderungen Dritter, die aus Einwirkungen der Anlage auf deren Rechtsgüter begründet werden. Zur Erteilung der Betriebsgenehmigung prüfen die befassen Behörden (das sind die Umweltverwaltung und das Gewerbeaufsichtsamt) im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung die Einhaltung der anzuwendenden gesetzli-

chen Bestimmungen und Einwände Dritter. Für Windkraftanlagen kommen dabei einerseits die Regelungen zur direkten technischen Sicherheit der Anlagen (Statik der Anlage, elektrotechnische Ausrüstung, Arbeitssicherheit während der Bauphase, beim Betrieb und bei der Wartung) und andererseits die Regelungen der Umweltgesetzgebung zur Anwendung, die den zulässigen Einfluss der Windkraftanlagen auf die Umwelt festlegen.

Die im Luxemburger Recht festgelegte maximale Schallimmission aus Windkraftanlagen in angrenzenden Wohngebieten von 35 dB stellen eine im europäischen Vergleich eher strenge Regelung dar. Dabei ist nicht nur das Einhalten des Wertes an sich eine Hürde im Genehmigungsverfahren, sondern auch der nominale Höhe des Wertes, der von den üblichen Prüfwerten anderer Länder abweicht, so dass Erfahrungswerte von dort nicht verwendet werden können. Darüber hinaus stellt auch das geforderte Nachweisverfahren unter Referenzbedingungen ein Hürde dar. An dieser Stelle könnte eine Veränderung der Genehmigungsanforderungen und der Verwaltungspraxis möglicherweise eine Vereinfachung für Antragsteller bewirken, ohne von den materiellen Grundlagen des Immissionsschutzes abzurücken. Darüber hinaus stünde mit einem Anforderungskatalog, der sich stärker an den Anforderungen anderer EU-Mitgliedsstaaten mit einer intensiven Windkraftnutzung orientiert, wahrscheinlich eine größere Palette an Anlagen zur Verfügung, um eine optimale energetische Nutzung der Windkraft an der beschränkten Anzahl von überhaupt in Frage kommenden Standorten in Luxemburg zu ermöglichen.

### **Naturschutzrechtliche Genehmigung**

Die Belange des Natur- und Landschaftsschutzes wiederum werden in gesonderten naturschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren geprüft. Dabei werden nicht nur die Anlagen selbst, sondern auch die Zufahrtswege und der Anschluss an das Stromnetz berücksichtigt. Wichtige Belange sind dabei die Auswirkungen auf die Avifauna, auf Naturschutzgebiete und auf das Landschaftsbild. Beispielsweise ist es in Luxemburg übliche Praxis, dass die Genehmigungsbehörde einen Netzanschluss über Erdkabel verlangt und keine Freileitungen zulässt, um die Auswirkungen auf das Landschaftsbild so gering wie möglich zu halten. Bei zukünftigen Windkraftprojekten soll der Schutz der Avifauna zudem die höchste naturschützerische Priorität erhalten. Das bedeutet, dass die Genehmigungsbehörde keine Anlagen zulassen dürfte, die wichtige Zugvogelrouten beeinträchtigt oder Brut- und Nahrungsgebiete von prioritären Arten wie dem Rotmilan beeinträchtigt. Von einigen Interessensgruppen, darunter auch von Fachleuten aus dem Gebiet des Vogelschutzes wird die Entwicklung eines Nutzungsplans für Windenergie mit der Ausweisung von Vorranggebieten gefordert. Dadurch will man in den nicht vorrangigen Gebieten eine Windenergienutzung ausschließen und gleichzeitig. Auch wenn diese Forderung im Raum steht, wird mit einiger Wahrscheinlichkeit in mittelbarer Zukunft keinen nationalen Windnutzungsplan aufgestellt werden. Das bedeutet, dass die Belange des natur- und Landschaftsschutzes weiterhin jeweils bei allen einzelnen Projekten im Detail geprüft werden müssen.

Die offenbar bisher sehr strenge Handhabung in Bezug auf Pufferzonen zu europäischen

Flora-Fauna-Habitat-Gebieten, die einen Mindestabstand von Windkraftanlagen zu diesen Gebieten von 500 m vorsah, scheint nach Aussagen von befragten Fachleuten keine echte gesetzliche Grundlage zu haben. Von daher scheint es möglich zu sein, dass zukünftige Projekte auch bis an die Grenze solcher Gebiete gebaut werden könnten.

Abgesehen von der rein formalen Gesetzeslage ergibt sich für Luxemburg das Bild einer vorsichtigen naturschutzrechtlichen Verwaltungspraxis, im Rahmen derer ein Ausbau der Windenergie in moderatem Tempo ermöglicht werden soll.

Neben der Betriebsgenehmigung und der naturschutzrechtlichen Genehmigung bedarf es für Anlagen mit einer Höhe über 100 m ein Gutachten der Flughafenverwaltung, in der die Unbedenklichkeit der Anlage für die Luftsicherheit geklärt wird.

#### **4.2.4 Heizungsanlagen mit Biomassefeuerung**

Anlagentechnisch sind Pelletheizungen, Hackschnitzelheizungen und Scheitholzheizungen als Feuerungsanlagen für Festbrennstoffe zu werten. Solche Anlagen unterliegen in Luxemburg jedoch in den meisten Fällen keiner gesetzlichen Regulierung<sup>16</sup>, solange ihre thermische Leistung unterhalb des Niveaus bleibt, bei dem die Commodo-Gesetzgebung für gewerbliche Aktivitäten greift. Die Regelungen für Heizungsanlagen in Luxemburg decken derzeit nur Anlagen mit Feuerung flüssiger Brennstoffe sowie erdgasgefeuerte Anlagen ab. Aufgrund dieser Rechtslage ist es damit möglich im Biomassefeuerungsanlagen im privaten Bereich ohne Beschränkungen zu errichten und zu betreiben.

Dieser zunächst vorteilhaft erscheinende Zustand für die Entwicklung der Nutzung der festen Biomasse, hat jedoch bedenkenswerte Implikationen. Mit dem Fehlen einer gesetzlichen Regelung, könnten im Prinzip Anlagen jeglicher Qualität errichtet werden und damit auch solche minderer Qualität, die sowohl einen schlechten thermischen Wirkungsgrad als auch schlechte Emissionswerte in Bezug auf Luftschadstoffe aufweisen könnten. Insbesondere im Hinblick auf die in Europa seit 1. Januar 2005 geltende Feinstaubrichtlinie (RL 1999/30/EG) und die dadurch wieder verstärkt in der europäischen Öffentlichkeit ausgetragene Diskussion um die Schadstoffbelastung der Luft<sup>17</sup>, kann es nicht zielführend sein, einen Ausbau der Biomassenutzung mit umweltbelastenden Anlagen zu forcieren. Schon aus grundsätzlicher Überlegung heraus darf die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien mit ihren unbestreitbaren Vorteilen nicht uneingeschränkt auf Kosten anderer schutzwürdiger Güter wie der Atmosphäre und der menschlichen Gesundheit erfolgen. Darüber hinaus könnte im Rahmen der Fortentwicklung der nationalen Gesetze der EU-Mitgliedstaaten auch in Luxemburg möglicherweise eine rechtliche Regelung von Heizungsanlagen erfolgen, die mit Festbrennstoffen befeuert werden. Je nach deren Gestaltung könnten dann auch bei schon bestehenden

---

<sup>16</sup> Zu den Details siehe auch Schmitt u. Jung (2003) S. 135 ff.

<sup>17</sup> vgl. hierzu z.B. Wochenzeitung „Die Zeit“, Nr. 19/2006, in der die Umweltauswirkungen von Festbrennstoffheizungsanlagen und insbesondere Biomasse-Heizungen diskutiert werde.

Anlagen (das wären auch solche, die von jetzt an bis zum Inkrafttreten einer solchen Regelung installiert werden) Nachrüstungen oder sogar ein Ersatz der Anlagen notwendig werden. Daher sollte ein Förderpolitik für Heizungsanlagen mit fester Biomasse auch auf die Entwicklungen von technischen Anforderungen im benachbarten Ausland eingehen, da sich Luxemburger Recht in vielen Fällen an diese Vorbilder anlehnt.

Insbesondere bei Gewerbebetrieben stellen sich die rechtlichen Rahmenbedingungen anders dar, da sich die Genehmigungspflicht in Betrieben, die unter die Commodo-Gesetzgebung fallen auf alle dort betriebenen Anlagen erstreckt<sup>18</sup>. Das bedeutet, dass z.B. Biomassekessel in Holzbearbeitungsbetrieben unter die Genehmigungspflicht fallen. Hiervon sind auch Schreinereien betroffen, die teilweise nicht in reinen Gewerbegebieten liegen und wo dann vergleichsweise strenge Anforderungen an Anlagen gestellt werden, die in benachbarten Wohngebäuden ohne weitere rechtliche Beschränkung betrieben werden können. Für Holzfeuerungsanlagen in diesen Betrieben werden vergleichsweise niedrige Staubemissionswerte zur Anwendung gebracht. Weitere Anforderung resultieren aus den geforderten Abständen zu benachbarten Wohngebäuden und aus der Unterschreitung von Lärmimmissionsgrenzwerten (35 dBA), die über ein Kontingentierungsverfahren den Emissionsquellen zugerechnet werden. Die gesetzlichen Anforderungen werden dabei von den Betroffenen als zu weich formuliert angesehen, so dass die Genehmigungsfähigkeit einer Anlage nur schlecht abzuschätzen sei. Darüber hinaus sind die Anforderungen an die Abnahmeprüfung der Anlagen nicht standardisiert. Es wird davon berichtet, dass zum Teil sehr aufwändige und damit teure Analysen gefordert wurden, die damit sogar die Wirtschaftlichkeit einer Anlage merklich beeinflussen können. Andererseits konnte auch festgestellt werden, dass die Auslegbarkeit der Bestimmungen von größeren Unternehmen, die über eine entsprechende administrative und technische Kompetenz verfügen, auch aktiv zu ihrem Vorteil genutzt wird.

#### **4.2.5 Biogas**

Biogasanlagen werden von der Commodo-Gesetzgebung erfasst, wobei das Verzeichnis der genehmigungspflichtigen Betriebe Speicher für Biogas und Anlagen, die mit Biogas betrieben werden aufführt. Die Fermenter selbst sind nicht direkt aufgeführt. Da jedoch alle Biogasanlagen zumindest einen gewissen Speicherraum für das produzierte Gas im Fermenter enthalten und bisher in der Regel das Biogas auch direkt in Gasmotoren umgesetzt wird ergibt sich im realen Leben eine faktische Genehmigungspflicht für Biogasanlagen.

Von den Betreibern von Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich wird die Genehmigungspraxis hinsichtlich der Verwendung unbedenklicher Abfälle kritisiert. Die Verwendung von Abfällen jeglicher Art – unabhängig davon ob es sich um unbedenkliche Abfälle oder bedenkliche Abfälle handelt – muss detailliert nicht nur nach Gesamtmenge sondern nach Menge und Art der jeweiligen Stoffe im Vorhinein genehmigt werden. Das bedeutet, dass Anlagenbetreiber nicht in der Lage sind, kurzfristig auf Angebote auf dem durchaus vorhan-

---

<sup>18</sup> Die Genehmigungspflicht nach der Commodo-Gesetzgebung trifft auch auf andere Einrichtungen zu, wie z.B. auf Schulen.

denen Markt für landwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe zu reagieren. An dieser Stelle könnte es lohnend sein zu prüfen, ob die Genehmigungen nicht ein Stück weit pauschalisiert über Mengenkontingente für größere Stoffklassen erteilt werden könnten. Über die bereits vorhandene Dokumentationspflicht der Anlagenbetreiber könnte weiterhin ex post die Einhaltung der Genehmigungsbedingungen geprüft werden.

#### **4.2.6 Solaranlagen**

Solaranlagen sind vom Genehmigungsrecht nicht gesondert erfasst. Da die meisten Solaranlagen – sowohl thermische Solaranlagen als auch PV-Anlagen – auf Gebäudedächern installiert werden bzw. in diese integriert werden, kommt dem Baurecht die Rolle der wichtigsten gesetzlichen Rahmenbedingungen zu. Der große Zuwachs an PV-Anlagen im Zeitraum zwischen 2001 und 2004 sind ein deutliches Indiz dafür, dass der Errichtung solcher Anlagen keine großen Hindernisse entgegen stehen.

#### **4.2.7 Geothermie**

Der gemessen an den Anforderungen für die Geothermienutzung allgemein niedrige geothermische Gradient in Luxemburg hat zur Folge, dass - wenn überhaupt - vor allem Projekte mit flacher Geothermie in Frage kommen. Dabei würde es sich um Bohrungen bis in einen Tiefenbereich von 120 bis 150 m handeln. In diesem Bereich liegen in Teilen Luxemburgs auch die Aquifere, aus denen die Trinkwasserversorgung des Landes sichergestellt wird. Das bedeutet, dass Bohrungen, welche diese Tiefe erreichen, zu hydraulischen Verbindungen verschiedener Grundwasserstockwerke führen können. In folge dessen könnte tiefes und relativ gut geschütztes Grundwasser in Kontakt mit oberflächennahem Grundwasser geraten, das oft vergleichsweise nitratreich ist. Damit ergibt sich an dieser Stelle ein Nutzungskonflikt zwischen der Geothermie und der Trinkwassergewinnung, wobei die Trinkwassergewinnung naturgemäß höher zu bewerten ist. Das Wasserwirtschaftsamt wertet Gebiete mit Grundwasservorkommen, die für die Trinkwassergewinnung genutzt werden, als Sperrgebiete für das Niederbringen von Bohrungen für die Geothermienutzung.

Das Abteufen von Bohrungen für die Geothermienutzung ist Genehmigungspflichtig nach der Commodo-Gesetzgebung. wobei Anlagen bis zu einer thermischen Entnahmeleistung von 15 kW nach Commodo-Klasse 3 behandelt werden. Größere Anlagen werden nach Klasse 1 behandelt. Wärmepumpen, die aufgrund der Natur der luxemburgischen Ressourcen bei Nutzung der Geothermie notwendig sind, genehmigungspflichtig nach Commodo-Klasse 1, wenn sie eine thermische Leistung größer als 20 kW aufweisen oder mehr als 30 kg Kältemittel verwenden. Die Notwendigkeit bei größeren Anlagen ein Genehmigungsverfahren durchführen zu müssen, dürfte insbesondere bei der eher skalierbaren Technologie im Bereich der Geothermie zu einer stärkeren Nutzung kleiner Einzelanlagen führen.

Unter folgenden Auflagen könnte eine Lockerung des Verbots für Tiefenbohrungen in Grundwasserschutzgebieten aus wasserwirtschaftlicher Sicht denkbar sein: 1. Qualität (Abdichtung) der Tiefenbohrungen müssen sichergestellt sein 2. Kältemittel sollen wenn möglich biologisch abbaubar und nicht toxisch sein 3. wegen Grundwasserschutz können mehre-

---

re kürzere Bohrungen vorgeschrieben werden.

#### **4.2.8 Überblick über förderlich wirkende und hemmend wirkende Aspekte der rechtlichen Rahmendbedingungen**

Wie in der Einleitung zum Abschnitt 4.2 bereits erläutert, wird durch die rechtlichen Rahmenbedingungen ein Ausgleich verschiedener Interessen erreicht wie z.B. schutzwürdiger Interessen des Naturschutzes oder der Interessen der Gewerbeausübung. Diese Studie soll nicht die Situation in Luxemburg hinsichtlich des Ergebnisses solche Interessensausgleiche bewerten. Dennoch lassen sich fördernde und hemmende Aspekte hervorheben, bei denen Veränderungen möglich wären, ohne andere Interessen zu tangieren und gleichzeitig die zukünftige Entwicklung der erneuerbaren Energien besser zu fördern.

##### **Förderliche Aspekte des Genehmigungsrechtes**

- Regelungsfreiheit für private Heizungsanlagen, die mit Festbrennstoffen befeuert werden und unterhalb des Leistungsniveaus von Commodo-pflichtigen Anlagen bleiben.<sup>19</sup>

##### **Hemmende Aspekte des Genehmigungsrechtes**

- Oft fehlende Definition der „besten verfügbaren Technologien“, die in der Commodo-Gesetzgebung gefordert werden.
- Ein hoher Ermessensspielraum der Genehmigungsbehörden bei der Auslegung der Anforderungen an „beste verfügbare Technologien“ erzeugt Planungsunsicherheit.
- Aufwändige und lange Genehmigungsprozeduren bei Windenergieanlagen durch die Summe der zu betrachtenden Aspekte, verfahrensspezifische Anforderungen und deren Wechselwirkungen.
- Abnahmeprüfungen von Biomassefeuerungsanlagen nicht standardisiert

---

<sup>19</sup> Das Fehlen einer Regulierung für private Heizungsanlagen, die mit Festbrennstoffen befeuert werden, ist nicht uneingeschränkt positiv zu werten. Siehe hierzu Abschnitt 4.2.4.

## 5 Potenziale und Kosten der erneuerbaren Energien

### Kurzfassung

Die Kenntnis der Potenziale Erneuerbarer Energie in Luxemburg ist als Grundlage für energiepolitische Entscheidungen und für die Strategieentwicklung des Landes von großer Bedeutung. Der gegenständliche Abschnitt der vorliegenden Arbeit untersucht vor diesem Hintergrund unterschiedliche Kategorien von Potenzialen Erneuerbarer Energie in Luxemburg. Die über die jeweiligen Erscheinungsformen der Endenergie bzw. über die Bereitstellungstechnologien definierten **9 Potenzialgruppen** sind hierbei:

- Feste biogene Energieträger
- Flüssige biogene Energieträger
- Gasförmige biogene Energieträger
- Geothermie
- Kleinwasserkraft
- Photovoltaik
- Solarthermie
- Wärmepumpen
- Windkraft

Für die einzelnen Potenzialgruppen, welche je nach Zusammensetzung der jeweiligen Potenziale weitere dokumentierte Untergruppen aufweisen können, werden **5 Potenzialtypen** untersucht und dokumentiert:

- Status quo des Jahres 2005
- Realisierbares Potenzial im Jahr 2010
- Realisierbares Potenzial im Jahr 2020
- Technisches Potenzial
- Theoretisches Potenzial

Für die Berechnung aller Potenzialtypen wurden folgende Annahmen getroffen:

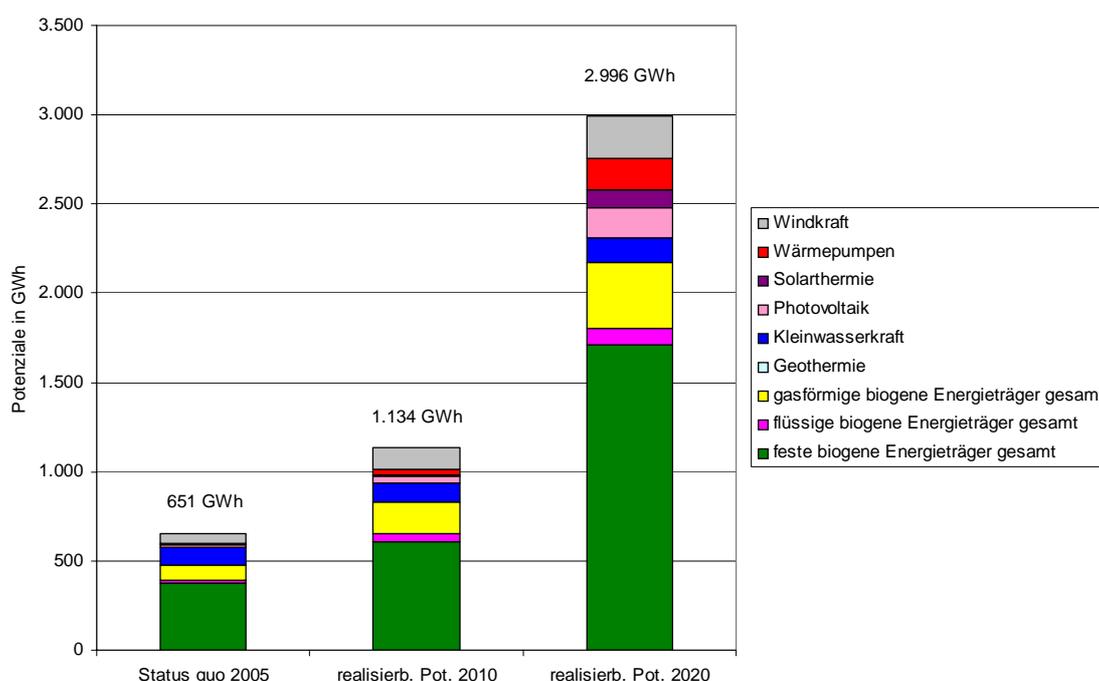
- Die grobe Gliederung der Landesfläche von Luxemburg (Waldflächen, landwirtschaftliche Nutzflächen und sonstige Flächen) bleibt für alle Potenzialtypen unverändert.
- Die Nutzung der erneuerbaren Ressourcen geschieht nachhaltig, d.h. in den Potenzialzahlen wird das jeweilige „Kapital“, welches manchen Ressourcen zu Grunde liegt, nicht abgebildet (z.B. wird nur das nachwachsende Energieholz einkalkuliert, nicht jedoch der Waldbestand).
- Flächenkonkurrenzen der Potenzialgruppen untereinander werden für alle Potenzialtypen berücksichtigt (z.B. Anbau von Energiepflanzen zur Bereitstellung unterschiedlicher Endenergieträger; Gebäudeflächen für Photovoltaik und Solarthermie). Die Werte der Potenziale sind somit für jeden Potenzialtyp über die jeweils 9 Potenzialgruppen summierbar.

Der Status quo des Jahres 2005 repräsentiert das in diesem Jahr tatsächlich bereits umgesetzte Potenzial. Das realisierbare Potenzial im Jahr 2010 bzw. 2020 gibt jenes Potenzial an, welches

unter realistischen technischen, strukturellen, legalen und energiepolitischen Rahmenbedingungen bis zum Jahr 2010 bzw. 2020 umgesetzt werden kann. Das technische Potenzial ergibt sich unter Berücksichtigung von technischen und strukturellen Gesichtspunkten. Das theoretische Potenzial berücksichtigt schlussendlich ausschließlich grobe strukturelle Aspekte.

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Die Art der jeweiligen Endenergie ist in den Fußnoten spezifiziert. Prinzipiell kann zwischen 2 Potenzialgruppen unterschieden werden: a) die Endenergieträger werden in der Folge der Nutzungskette typischer Weise einem thermischen Prozess zugeführt (z.B. feste biogene Energieträger, gasförmige biogene Energieträger,...) – es erfolgt die Angabe des Heizwertes des jeweiligen Endenergieträgers; b) bei der bereitgestellten Endenergie handelt es sich aus prozess-technischen Gründen immer um elektrischen Strom (z.B. Wasserkraft, Photovoltaik,...) – es erfolgt die Angabe des in das Netz eingespeisten elektrischen Stromes. Unter diesem Aspekt muss die Summenbildung über alle Potenzialgruppen zur Angabe eines Gesamtpotenzials kritisch betrachtet werden.

Abbildung 5-1 veranschaulicht den Status quo des Ausbaus der Erneuerbaren Energie Potenziale in Luxemburg im Jahr 2005 sowie die realisierbaren Potenziale in den Jahren 2010 und 2020. Die realisierbaren Potenziale steigen hierbei von einem Ausgangswert von 651 GWh im Jahr 2005 um 74% auf 1134 GWh im Jahr 2010. Daraufhin ist eine weitere Steigerung um 164% (bezogen auf den Wert 2010) auf 2996 GWh im Jahr 2020 möglich. Der Potenzialschwerpunkt ist und bleibt dabei im Bereich der biogenen Energieträger, welche im Jahr 2005 in Summe 73% des Gesamtpotenzials stellen, im Jahr 2010 ebenfalls 73% und im Jahr 2020 72% ausmachen. Bei den Potenzialwerten, die als Bandbreiten vorliegen (Solarthermie und Photovoltaik) wurde dabei jeweils der ambitioniertere Wert herangezogen.



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-1: Status quo Erneuerbare Energie und realisierbare Potenziale 2010/2020 in Luxemburg

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Potentialberechnung; Quelle: eigene Berechnungen

Alle Angaben in GWh/a	Angaben in Energieform	Verstromung möglich ?	Status quo 2005	realisierbares Potenzial 2010	realisierbares Potenzial 2020	technisches Potenzial	theoretisches Potenzial
<b>feste biogene Energieträger gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>20</sup></b>	<b>ja</b>	<b>379</b>	<b>610</b>	<b>1.713</b>	<b>4.872</b>	<b>7.027</b>
Energieholz	Heizwert	ja	64	117	517	2.137	2.536
Alt- und Restholz	Heizwert	ja	200	270	481	481	604
Energiepflanzen	Heizwert	ja	0	71	284	1.422	2.891
biogener Müllanteil	Heizwert	ja	115	138	151	174	174
feste landwirtschaftliche Reststoffe	Heizwert	ja	0	14	280	658	822
<b>flüssige biogene Energieträger gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>21</sup></b>	<b>ja</b>	<b>15</b>	<b>41</b>	<b>88</b>	<b>326</b>	<b>660</b>
Energiepflanzen	Heizwert	ja	12	27	60	298	628
Altspeseöle und -fette	Heizwert	ja	3	14	28	28	32
<b>gasförmige biogene Energieträger gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>22</sup></b>	<b>ja</b>	<b>79</b>	<b>176</b>	<b>369</b>	<b>1.281</b>	<b>2.351</b>
Gülle	Heizwert	ja	26	52	117	152	168
Grünschnitt und Landschaftspflege	Heizwert	ja	18	36	81	120	133
Bioabfälle	Heizwert	ja	1	16	36	36	40
Schlachtabfälle	Heizwert	ja	0	0	2	2	2
Energiepflanzen	Heizwert	ja	21	42	95	930	1.963

<sup>20</sup> Die Angaben betreffen den unteren Heizwert des einsatzbereiten Brennstoffs.

<sup>21</sup> Die Angaben betreffen den unteren Heizwert der flüssigen biogenen Energieträger (also RME, Bioethanol und AME).

<sup>22</sup> Die Angaben betreffen stets den unteren Heizwert des gewonnenen Gases.

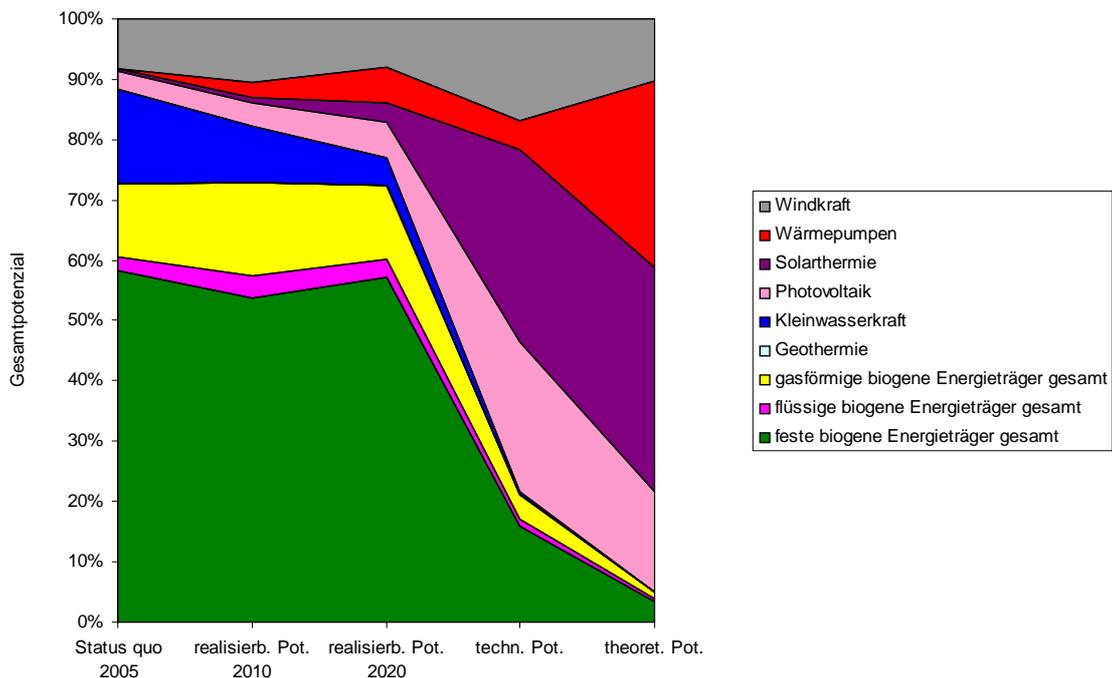
Alle Angaben in GWh/a	Angaben in Energieform	Verstromung möglich ?	Status quo 2005	realisierbares Potenzial 2010	realisierbares Potenzial 2020	technisches Potenzial	theoretisches Potenzial
Klärgas	Heizwert	ja	13	29	37	39	43
Deponiegas	Heizwert	ja	0	1	1	2	2
Geothermie	-	-	0	0	0	0	0
Kleinwasserkraft	Strom	-	102	106	137	140	175
Photovoltaik	Strom	-	19	26 - 43	59 - 176	7.607	33.167
Solarthermie	Heizwert <sup>23</sup>	nein <sup>24</sup>	3	7 - 10	31 - 96	9.738	74.200
Wärmepumpen	Heizwert <sup>25</sup>	nein	1	30	180	1.516	61.743
Windkraft	Strom	-	53	118	237	5.146	20.584
Summe total	Str./Heizw.	-	651	1.114 - 1.134	2.814 - 2.996	30.626	199.907

<sup>23</sup> Die Angaben betreffen die in den Puffer/Boiler eingebrachte Wärme

<sup>24</sup> Die Verstromung von Solarthermie ist prinzipiell möglich, wird für den Standort Luxemburg aus Energieeffizienzgründen jedoch nicht in Betracht gezogen.

<sup>25</sup> Die Angaben betreffen den Anteil an gewonnener Umweltwärme; die Antriebsenergie der Aggregate ist in den Angaben nicht enthalten.

Die anteilmäßige Struktur der Potenzialtypen nach Potenzialgruppen ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die strukturellen Unterschiede zwischen der Gruppe der realisierbaren Potenziale (Status quo 2005, 2010, 2020) und dem technischen bzw. theoretischen Potenzial. Die realisierbaren Potenziale weisen einen starken Schwerpunkt im Bereich biogener Energieträger auf, das technische bzw. das theoretische Potenzial weist einen hohen Anteil an direkter Nutzung der Solarstrahlung (Photovoltaik und Solarthermie) sowie hohe Anteile von Wärmepumpen und Windkraftnutzung auf. Es können diese strukturellen Unterschiede als Hinweis auf einen möglichen langfristigen zukünftigen Pfad gewertet werden, welcher deutlich über den betrachteten Zeithorizont von 2020 hinausgeht.

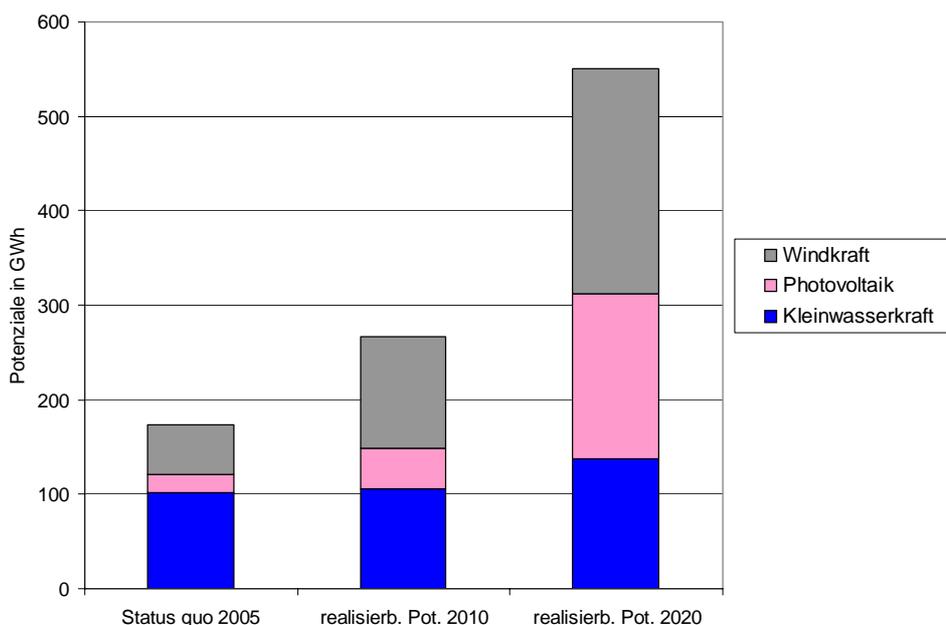


Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-2: Anteilmäßige Struktur der Potenzialtypen nach Potenzialgruppen

Wie oben bereits angemerkt, repräsentieren die Angaben über das energetische Potenzial der einzelnen Potenzialgruppen unterschiedliche Endenergieträger. Die Potenzialgruppen Kleinwasserkraft, Photovoltaik und Windkraft repräsentieren dabei elektrischen Strom, alle anderen Potenzialgruppen sind als Heizwert des jeweiligen Energieträgers erfasst. Natürlich können jene Energieträger, welche in der Regel einem thermischen Prozess zugeführt werden prinzipiell auch verstromt werden (z.B. in einer Kraft-Wärme-Kopplung), wie dies zurzeit im Bereich gasförmiger biogener Energieträger obligat ist. Die Effizienz des Einsatzes einer Kraft-Wärme-Kopplung ist jedoch von der Nachfrage nach den einzelnen Koppelprodukten abhängig. Steht z.B. der Wärmeproduktion einer Kraft-Wärme-Kopplung kein entsprechender Wärmebedarf gegenüber, so sinkt der Gesamtwirkungsgrad der Anlage auf den (relativ geringen) Verstromungswirkungsgrad.

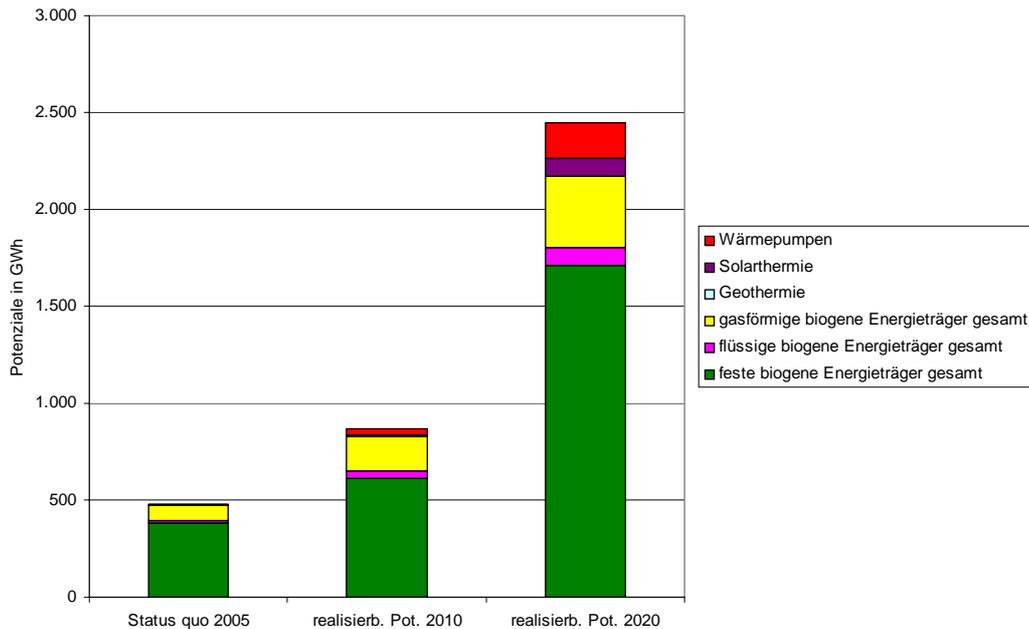
Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, zeigt Abbildung 5-3 die Potenziale der „Stromtechnologien“ Kleinwasserkraft, Photovoltaik und Windkraft. Deutlich ist hier die strukturelle Änderung vom Schwerpunkt Wasserkraft beim Status quo 2005 zum Schwerpunkt Windkraft, aber auch Photovoltaik im Jahr 2020 zu sehen. Der Bereich der Photovoltaik ist in der Darstellung durch das ambitionierte Wachstumsszenario dieser Technologie repräsentiert. Das Potenzial an Kleinwasserkraft kann im Jahr 2020 als vollständig ausgebaut im technischen Sinne betrachtet werden.



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-3: Die Potenziale der „Stromtechnologien“ Kleinwasserkraft, Photovoltaik und Windkraft

Die Potenziale der „Wärmetechnologien“ sind in Abbildung 5-4 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist das mögliche Wachstum im Bereich der biogenen Energieträger, wobei in diesen Potenzialgruppen wiederum die festen biogenen Energieträger die tragende Rolle spielen. Ein weiterer Bereich abseits der biogenen Energieträger mit einem gewissen Wachstumspotenzial im betrachteten Zeitraum ist die Wärmepumpentechnologie.



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-4: Die Potenziale der „Wärmetechnologien“

Die Analyse der Potenziale Erneuerbarer Energieträger in Luxemburg zeigt bis zum Jahr 2020 die Möglichkeit einer Steigerung der Nutzung Erneuerbarer Energie um den Faktor 4,6 mit Bezug auf den Status quo von 2005. Dies führt einerseits die großen Chancen der zukünftigen Nutzung Erneuerbarer Energie vor Augen, zeigt andererseits aber auch die Systemträgheit auf, mit welcher bei der Marktdiffusion der entsprechenden Technologien gerechnet werden muss. Natürlich sind all jene realisierbaren Potenziale, welche im Jahr 2020 noch deutlich unter den technischen Potenzialen liegen auch weiter ausbaubar. Die hier dokumentierten Potenziale wurden auf Basis einer nationalen und internationalen Kontinuität der Wirtschaft und der Energiepreise fossiler Energie berechnet. Sollte z.B. der Energiepreis fossiler Energieträger in der betrachteten Zeitperiode deutlich über die historische Entwicklung hinaus ansteigen, so können dort, wo dies technisch möglich ist, auch wesentlich größere Potenziale als die hier ausgewiesenen umgesetzt werden, da sich die betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Nutzung Erneuerbarer Energie drastisch ändern und auch der gesellschaftliche Aufwand z.B. zur Förderung der Technologien sinkt.

## 5.1 Untersuchungsgegenstand, Definitionen und Daten

Dieser Abschnitt analysiert die Potenziale Erneuerbarer Energie in Luxemburg. Es werden in diesem Zusammenhang theoretische Potenziale, technische Potenziale und realisierbare Potenziale diskutiert, wobei diese Begriffe in Abschnitt 5.1 definiert werden. Darüber hinaus werden technologische Entwicklungspotenziale thematisiert und Kosten der Technologien dokumentiert.

Für eine systematische Darstellung des gesamten Technologiefeldes Erneuerbare Energie erfolgt die Darstellung in den nachfolgenden Unterabschnitten nach Technologien in alphabetischer Reihung:

- 
- Biomasse – feste biogene Energieträger
  - Biomasse – flüssige biogene Energieträger
  - Biomasse – gasförmige biogene Energieträger
  - Geothermie
  - Kleinwasserkraft
  - Photovoltaik
  - Solarthermie
  - Wärmepumpen
  - Windkraft

In jedem technologischen Unterabschnitt werden die Themen

- Theoretische Potenziale der Technologie
- Technische Potenziale der Technologie
- Technologisches Entwicklungspotential der Technologie
- Realisierbares Potenzial der Technologie
- Kosten der Technologie

behandelt. Die zeitlichen Horizonte der Betrachtungen sind jeweils die Jahre 2010 und 2020. Realisierbare Potenziale werden beispielsweise vor diesem zeitlichen Hintergrund betrachtet.

Im Bereich feste biogene Energieträger wird weiters kurz auf das Potenzial an Klärschlamm eingegangen. Da es sich beim Potenzial im Bereich Klärschlammnutzung nicht um ein Potenzial Erneuerbarer Energie handelt, aber der ausdrückliche Wunsch seitens der luxemburgischen Auftraggeber bestand, diese Thematik mit zu behandeln, werden die entsprechenden Potenziale dokumentiert, die Potenzialwerte werden jedoch nicht gemeinsam mit den Potenzialen Erneuerbarer Energie dargestellt.

### **5.1.1 Untersuchungsgegenstand**

Der geografische Untersuchungsbereich ist das Landesgebiet von Luxemburg. Alle Aussagen in Bezug auf Potenziale beziehen sich auf dieses geografische Gebiet. Wenn Importpotenziale dokumentiert werden, so wird dies an der gegebenen Stelle stets explizit vermerkt. Wesentliche geografische Daten Luxemburgs, welche in den folgenden Kalkulationen Verwendung finden sind:

- Landesfläche: 2586 km<sup>2</sup>
- Geografische Lage: 49° 45´ Nord, 6° 10´ Ost
- Tiefster Punkt: Zusammenfluss Mosel-Sauer 133 m
- Höchster Punkt: Buurgplaat 559 m
- Hauptstadt: Luxemburg

Wesentliche sozioökonomische und strukturelle Daten Luxemburgs, welche ebenfalls in einzelnen Kalkulationen Verwendung finden sind:

- Bevölkerung: 459.500 (01.01.2006; Quelle: Statec; [www.statistiques.public.lu](http://www.statistiques.public.lu)); Luxemburgs Bevölkerung weist aus Gründen der Immigration eine steigende Tendenz auf;
- Anzahl der Haushalte: 171.953 (2001)
- Anzahl der Unternehmen: 26.932 (2005)
- Bruttoinlandsprodukt: 24.900 Millionen Euro (2004)

Eine Karte des Landesgebiets ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

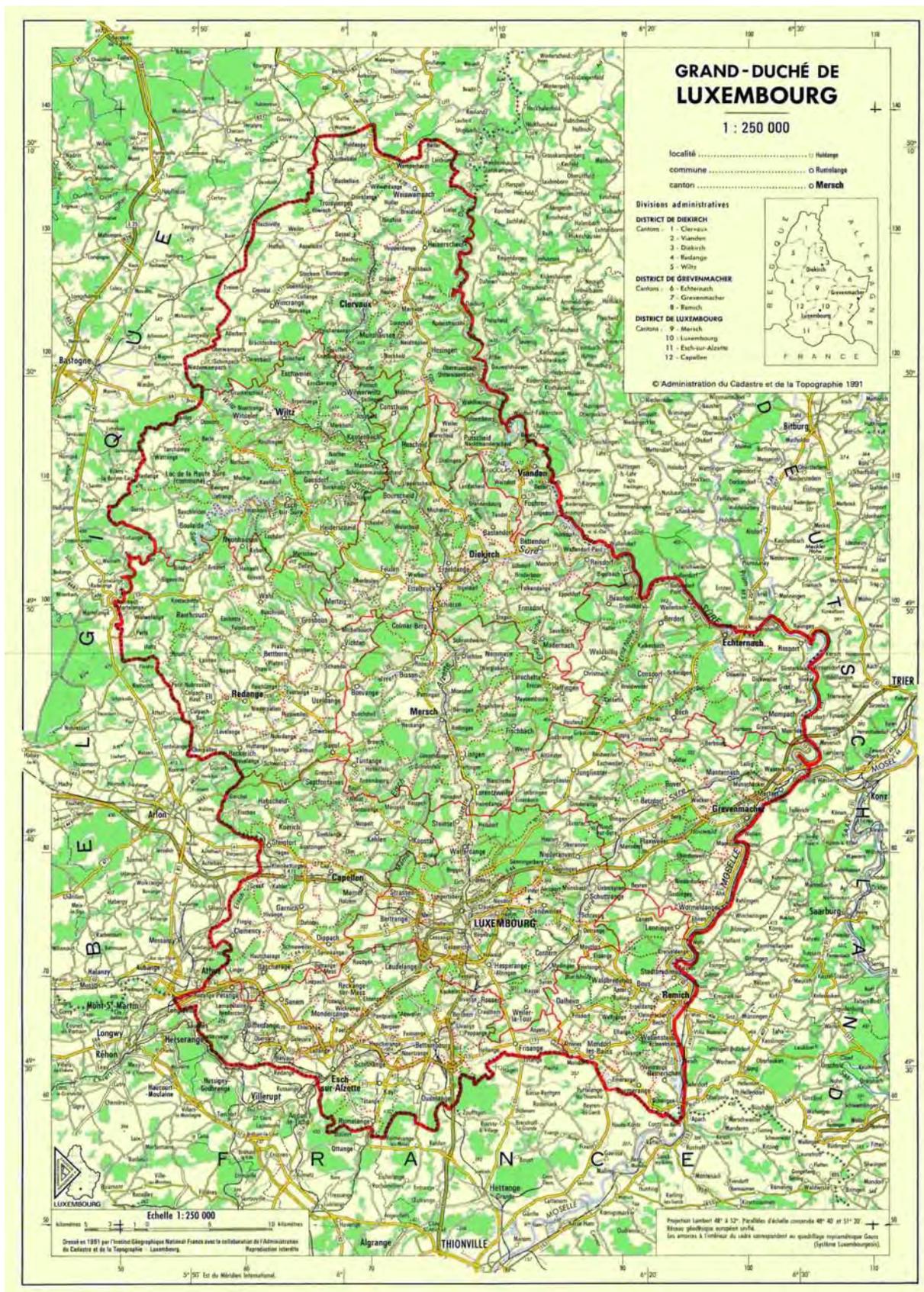
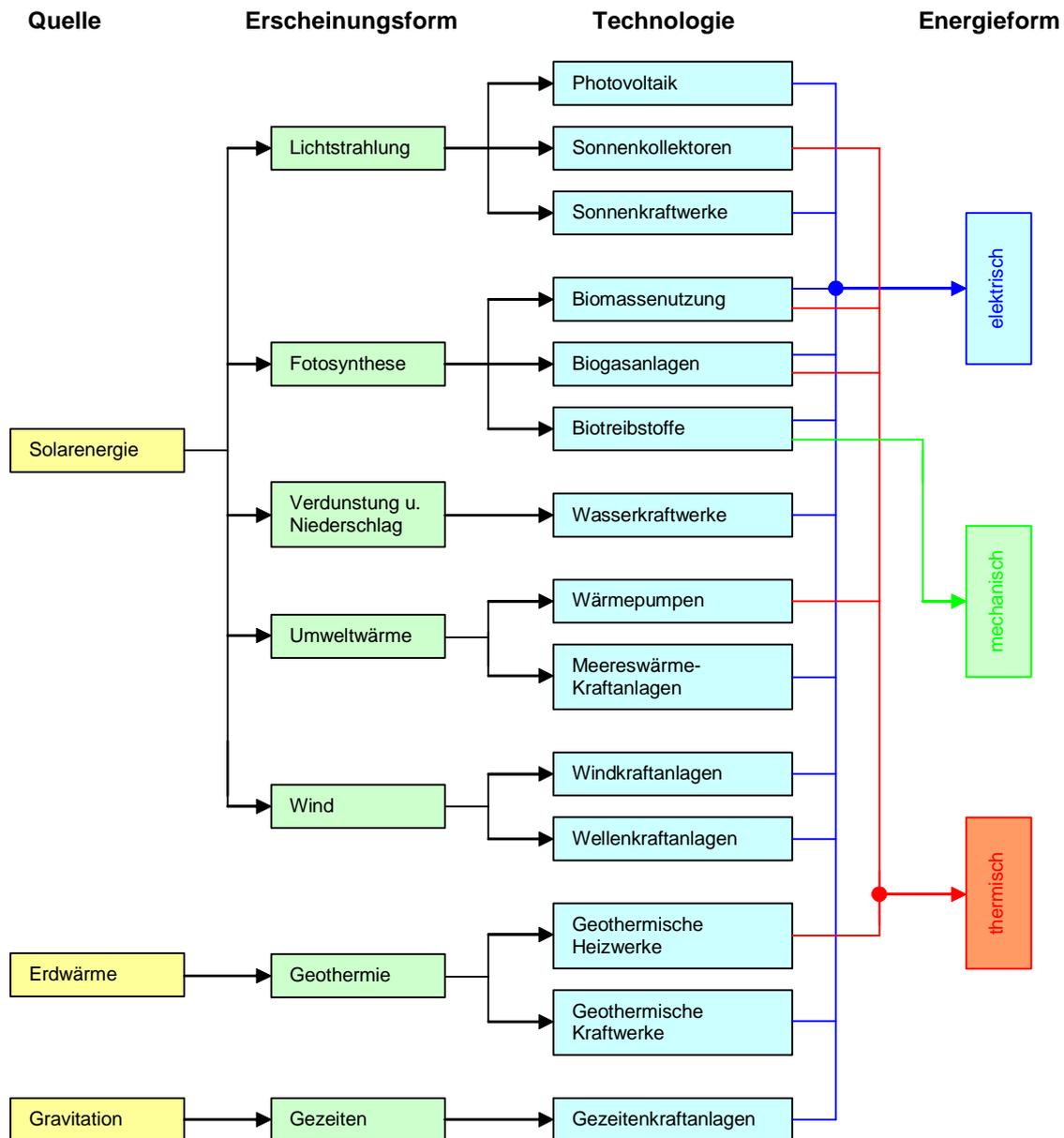


Abbildung 5-5: Landkarte Luxemburg

Eine systematische Darstellung erneuerbarer Energieträger und der Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energie ist in Abbildung 5-6 ersichtlich. Für Luxemburg sind im Weiteren die bereits oben angeführten 9 Technologien von Interesse, welche im Prinzip alle benötig-

ten Energiedienstleistungsbereiche qualitativ abdecken können. Inwiefern die verfügbaren Potenziale zur quantitativen Deckung des Energiebedarfes in Luxemburg ausreichen, ist Thema der folgenden Technologieabschnitte.

### Erneuerbare Energieträger



Quelle: Haas et al. (2006)

Abbildung 5-6: Überblick über Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energie und mögliche Energiedienstleistungen

#### 5.1.2 Definition der Potenziale

Die Definition der Potenziale beinhaltet die Begriffe "Theoretisches Potenzial", "Technisches

---

Potenzial“ und “Realisierbares Potenzial“.

### **Theoretisches Potenzial**

Das theoretische Potenzial beschreibt das in einer Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot unter der Berücksichtigung einzelner wesentlicher struktureller Restriktionen wie der geografischen Flächenstrukturen. Das theoretische Potenzial ist damit weitestgehend physikalisch bestimmt, wobei Landesstrukturen (Waldflächen, urbane Flächen,...) berücksichtigt und die strukturelle Mehrfachnutzung von Ressourcen vermieden wird. In diesem Sinne wird die nutzbare Landesfläche von Luxemburg bezüglich jener Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energieträger, welche auf Flächennutzung angewiesen sind, gleichmäßig aufgeteilt. Das theoretische Potenzial kann in der Regel wegen technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Randbedingungen auch langfristig nur zu sehr geringen Teilen erschlossen werden.

### **Technisches Potenzial**

Das technische Potenzial beschreibt jenen Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung gegebener technischer (konkrete Technologien) und ökologischer Randbedingungen nutzbar ist. Zusätzlich werden hier detaillierte strukturelle Restriktionen berücksichtigt. Einige der genannten Einflussfaktoren auf die Höhe des technischen Potenzials können sich mit der Zeit ändern, wie dies beispielsweise bei technischen Wirkungsgraden der Fall ist. Diese allfälligen Änderungen werden in entsprechenden Modellen berücksichtigt.

### **Realisierbares Potenzial**

Unter dem realisierbaren Potenzial erneuerbarer Energie wird der Anteil des technischen Potenzials verstanden, der unter Berücksichtigung von weiteren Hemmnissen und fördernden Faktoren genutzt werden kann. Diese Faktoren sind struktureller (tatsächliche Eignung von Flächen), legaler (Gesetze, Verordnungen), ökonomischer (Entwicklung der Kosten), soziologischer (Technologiediffusion) und psychologischer (wahrgenommene Vorteile bzw. Nachteile) Natur. Das realisierbare Potenzial wird weiters stark von konventionellen Vergleichssystemen beeinflusst, mit welchen erneuerbare Energie im Wettbewerb steht. Das realisierbare Potenzial ist in der Regel deutlich geringer als das theoretische und das technische Potenzial. In der gegenständlichen Studie werden die realisierbaren Potenziale für die Jahre 2010 und 2020 berechnet und dargestellt. Die Gesamtauswirkungen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen in Luxemburg wurden bis zum Jahr 2020 mit 20% der Ackerfläche begrenzt, wobei diese Fläche zu gleichen Teilen den festen, flüssigen und gasförmigen Energieträgern zugänglich ist, um nationale Prioritäten nicht vorwegzunehmen.

### **5.1.3 Wesentliche allgemeine Annahmen**

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse zu den Potenzialen erneuerbarer Energien in Luxemburg basieren neben detaillierten technologiespezifischen Annahmen auf allgemeinen Voraussetzungen, welche den durchgeführten Analysen zugrunde liegen. Diese grundsätz-

lichen Annahmen sind:

- Die Grobstruktur der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung der Landesfläche Luxemburgs bleibt erhalten (35% Waldflächen, 49% landwirtschaftliche Flächen, 16% sonstige Flächen).
- Die Nutzung aller erneuerbaren Ressourcen geschieht nachhaltig (keine Verwendung des Kapitals).
- Die Flächenkonkurrenz unterschiedlicher Energieträger wird schon beim theoretischen Potenzial berücksichtigt, d.h. die Potenzialgruppen sind jeweils addierbar.
- Landwirtschaftliche Nutzflächen werden bis 2020 zu 20% für den Energiepflanzenanbau genutzt.
- es werden jeweils gleiche Flächenressourcen für feste, flüssige und gasförmige biogene Energieträger vorgesehen.
- Restriktionen durch Vorgaben des Natur- u. Umweltschutzes werden bei den realisierbaren Potenzialen berücksichtigt.

## **5.2 Biomasse – feste biogene Energieträger**

### **5.2.1 Allgemeine Aspekte der Biomassenutzung**

Biomasse stellt gespeicherte Sonnenenergie dar, die mittels Pflanzen über den Prozess der Photosynthese in organische Materie umgewandelt wird und in dieser Form direkt oder indirekt energetisch genutzt werden kann. Diese Eigenheit unterscheidet die Biomassenutzung grundsätzlich von anderen Technologien zur Nutzung der direkten oder indirekten Sonnenenergie, wie zum Beispiel der Windkraft, der Photovoltaik aber auch der Solarthermie. Biomasse als Energieträger ist aus technischer und wirtschaftlicher Sicht gut mittel- bis langfristig speicherbar und unterliegt damit keinen kurzfristigen Angebotsschwankungen, welche oft als Nachteil unterschiedlicher Arten erneuerbarer Energie genannt werden.

Je nach Ablauf der biochemischen Reaktionen im Verlauf der Photosynthese, die unter anderem von Lerch (1991) dargestellt werden, unterscheidet man zwischen  $C_3$  und  $C_4$ -Pflanzen. Die meisten einheimischen europäischen Kulturpflanzen stellen dabei so genannte  $C_3$ -Pflanzen dar, die als erstes Photosynthese-Produkt eine Verbindung mit 3 Kohlenstoffatomen bilden.  $C_4$ -Pflanzen, welche meist aus subtropischen Regionen stammen (z.B. Mais, Zuckerrohr, Chinaschilf) können durch abweichende Licht- u. Dunkelreaktionen mehr  $CO_2$  assimilieren und damit einen höheren Nutzeffekt der Photosynthese erreichen.

Der Nutzeffekt der Photosynthese beschreibt, wie viel Prozent der Strahlung von Pflanzen durch die Photosynthese in Form von chemischer Energie gespeichert werden kann. An Einzelblättern erreicht die Strahlungsausnutzung der Photosynthese unter günstigen Bedingungen bei einheimischen Pflanzen bis zu 15%, bei  $C_4$ -Gräsern bis 24%. Unter praxisrelevanten Bedingungen liegt der Wirkungsgrad jedoch nur bei etwa 5% und darunter.

Bezogen auf den gesamten Pflanzenbestand und unter Berücksichtigung der zeitlich und örtlich wechselnden Assimilationsbedingungen schwankt die photosynthetische Effizienz

verschiedener Pflanzengesellschaften zwischen 0,04% in Wüstenregionen bis 1,5% in Regenwäldern. Die Effizienz von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen während ihrer Wachstumszeit liegt nach Cralle und Vietor (1989) zwischen 1% und 3%.

Zu den Wachstumsfaktoren pflanzlicher Biomasse zählen die solare Strahlung, die Versorgung mit Wasser, die Temperatur, die Bodenbeschaffenheit und das Nährstoffangebot sowie pflanzenbauliche Maßnahmen. Die flächenspezifischen Erträge können vor allem auf Grund variabler Bodenbeschaffenheit stark schwanken. Die Werte für die Flächenerträge unterschiedlicher Pflanzen in Tabelle 5-2 sind deshalb als Werte für mittlere Böden im mitteleuropäischen Raum zu verstehen. Es wird im Zuge der gegenständlichen Analysen auf die Quelle Kaltschmitt (2000) zurückgegriffen, da diese eine wissenschaftliche und unabhängige Basis darstellt. Abweichungen zu den jeweiligen ortsspezifischen Verhältnissen sind möglich, diese werden sich jedoch in der Praxis einerseits durch beispielsweise gute versus schlechte Lagen bzw. intensive versus extensive Bewirtschaftung ausgleichen bzw. liegen mögliche Abweichungen im allgemeinen Tolleranzbereich modellhafter zukünftiger Potenzialkalkulationen.

Strasburger und Sitte (1983) zeigen weiters die Stoffbilanz einer Pflanzengesellschaft am Beispiel eines Hainbuchenwaldes. Durch Ausnutzung von 1% der eingestrahnten Sonnenenergie von 39,6 TJ/(ha\*a) werden 24 t/a Biomasse (Trockenmasse) pro Hektar gebildet. Davon gehen 12 t/(ha\*a) für die Atmung der Pflanzen verloren, 0,3 t/(ha\*a) werden durch Pflanzenfresser konsumiert, 0,8 t/(ha\*a) entfallen auf die Verrottung des Laubes, 2,8 t/(ha\*a) werden als Humus zersetzt, 2,4 t/(ha\*a) entfallen auf die Neubildung von Wurzelmasse und werden somit unterirdisch gespeichert und 5,7 t/(ha\*a) werden netto als oberirdische Biomasse gespeichert.

Tabelle 5-2: Flächenerträge unterschiedlicher Pflanzenarten

Pflanze	Flächenertrag in t TS/ha
Wirtschaftswald (Hainbuchenwald)	5,7
Kurzumtriebswald	10-12
Stroh (mittlere Getreidesorte)	5,5
Mais	9,5
Raps (Rapssaat)	2,3-2,6
Getreide (Kornanteil)	6,75
Energiegras (Sudangras)	15
Sonnenblumen	2,5

Abkürzung: TS Trockensubstanz

Quelle: Neubarth und Kaltschmitt (2000)

Weitere empirische Erfahrungswerte für die Produktivität des öffentlichen Waldes in Deutschland für unterschiedliche Baumarten sind in Tabelle 5-3 dokumentiert.

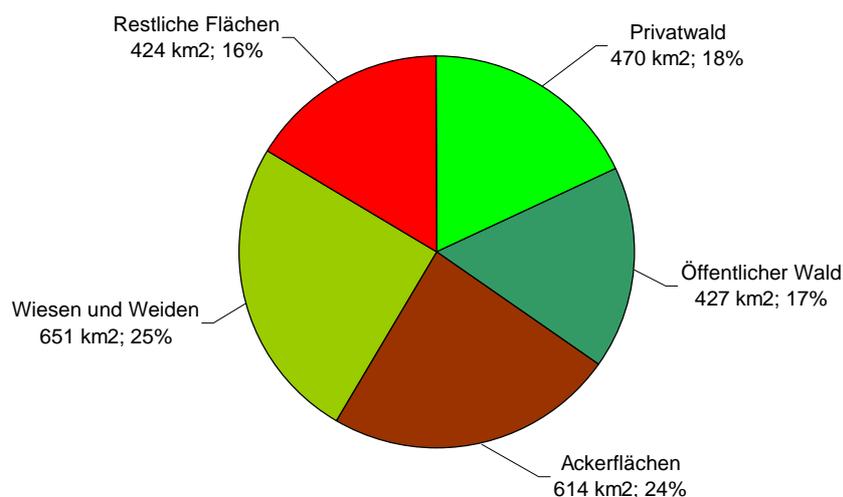
Tabelle 5-3: Zuwachsraten des öffentlichen Waldes in Deutschland

	Mittelwert	Bandbreite
	in Erntefestmeter ohne Rinde /(ha*a)	
Laubbäume		
Eiche	3,7	3,5-5,2
Buche	5,4	4,4-6,6
Nadelbäume		
Fichte	8,2	6,9-9,4
Tanne	7,9	6,2-14,1
Kiefer	4,7	4,0-6,4

Quelle: Kaltschmitt und Hartmann (2001)

Die in obenstehenden Tabellen dokumentierten Werte dienen in der Folge als Richtwerte bei der Kalkulation von Potenzialen. Die Aufteilung der Landesfläche von Luxemburg in Flächen unterschiedlicher Nutzung ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Gut ein Drittel der Landesfläche besteht aus Wald (insgesamt ca. 35%). Dabei handelt es sich ca. jeweils zur Hälfte um Privatwald und öffentlichen Wald. Rund die Hälfte der Landesfläche besteht aus landwirtschaftlichen Flächen (insgesamt ca. 49%), wobei wiederum jeweils die Hälfte auf Ackerflächen bzw. Wiesen und Weiden entfällt. Die restliche Landesfläche im Ausmaß von ca. 16% der Gesamtfläche entfällt auf den urbanen Raum, Flächen der Transportinfrastruktur, Wasserflächen und sonstigen öffentlichen und privaten Flächen.

Diese prinzipielle Flächenstruktur Luxemburgs wird bei der Kalkulation aller Kategorien von Potenzialen berücksichtigt und als über die Zeit konstant angenommen. Eine "Umwidmung" von großen Landesflächen im Betrachtungszeitraum 2010/2020 erscheint im Zuge der Potenzialdiskussion realitätsfern und wird deshalb nicht in Betracht gezogen.



Quelle: Statec (2004), recensement agricole du 15 mai;

---

Abbildung 5-7: Verteilung der Landesfläche von Luxemburg auf unterschiedliche Flächentypen

Im Sinne einer systematischen Strukturierung und Begriffsdefinition zeigt die umseitige Tabelle 5-4 die in weiterer Folge verwendete Nomenklatur und die Zuordnung der stofflichen Erscheinungsformen der Biomasse zu den Verwertungslinien feste, flüssige und gasförmige biogene Energieträger.

Tabelle 5-4: Einteilung des Sektors Biomasse nach Stoffgruppen:

Kategorie	Unterkategorie / Stoffe	Verwertung (prioritär)		
		Thermisch	Vergasung	Treibstoff
1. Forstwirtschaftliche Produkte	a. Ungenutzter Holzzuwachs	✓		
2. Forstwirtschaftliche Reststoffe	a. Durchforstungsrückstände	✓		
	b. Industrieholz	✓		
	c. Altholz	✓		
	d. Sägenebenprodukte	✓		
3. Landwirtschaftliche Produkte	a. Energiepflanzen (ein- u. mehrjährige)	✓	✓	✓
	a. Stroh und Ernterückstände	✓		
4. Landwirtschaftliche Reststoffe	b. Sonderkulturen (Weinstöcke, Baumschnitt)	✓		
	c. Landschaftspflege (Holzanteil)	✓		
	d. Altöle und Fette	✓		✓
5. Biogener Müllanteil	a. Müllanteil für die thermische Verwertung	✓		
	a. Gülle		✓	
6. Landwirtschaftliches Biogas	b. Grünschnitt		✓	
	c. Landschaftspflege (Grünanteil)		✓	
	d. Bioabfälle (Biotonne priv. u. gewerbl.)		✓	
	e. Schlachtabfälle (künftige Entwicklung?)		✓	
	a. Klärschlamm		✓	
7. Klärgas			✓	
8. Deponiegas	b. Ungenutzter Deponiebestand		✓	

## Maßeinheiten und Energieinhalte für Brennholz

Übliche Maßeinheiten der Forst- und Holzwirtschaft für Brennholz sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst. Umrechnungsfaktoren der unterschiedlichen Handelsformen fester Biomasse sind in Tabelle 5-6 dokumentiert und die Definition der Größenklassen von Holzhackschnitzel ist in Tabelle 5-7 ersichtlich.

Tabelle 5-5: Maßeinheiten für Brennholz

Maßeinheit	Zeichen	Definition
1 Festmeter	fm	1 Kubikmeter feste Holzmasse
1 Raummeter	rm	Geschichtete oder geschüttete Holzteile, die unter Einschluss der Luftzwischenräume ein Gesamtvolumen von einem Kubikmeter füllen.
1 Schichtraummeter	rm	1 Raummeter geschichteter Holzstücke (Scheiter, Rollen, Prügel usw.)
1 Schüttraummeter	Srm	1 Raummeter geschütteter Holzteile (Stückholz, Hackgut, Sägespäne Pellets usw.)
1 Tonne absolut trocken	t atro	1 Tonne absolut trockener Holzmasse

Quelle: Jonas et al. (2005)

Tabelle 5-6: Umrechnungszahlen gebräuchlicher Brennholzsortimente

Maßeinheit	fm	rm	rm	Srm	Srm	Srm
			Stückholz		Hackgut	
Sortiment	Rundholz	Scheitholz	geschichtet	geschüttet	G30 (fein)	G50 (mittel)
1 fm Rundholz	1,00	1,40	1,20	2,00	2,50	3,00
1 rm Scheitholz, 1 m lang, geschichtet	0,70	1,00	0,80	1,40	1,75	2,10
1 rm Stückholz, ofenfertig, geschichtet	0,85	1,20	1	1,7	-	-
1 Srm Stückholz, ofenfertig, geschüttet	0,50	0,70	0,60	1	-	-
1 Srm (Wald)-Hackgut G30 (fein)	0,40	0,55	-	-	1	1,20
1 Srm (Wald)-Hackgut G50 (mittel)	0,33	0,50	-	-	0,80	1
1 Tonne Hackgut (G30, Wassergehalt 35%) entspricht rd. 4 Srm Weichholz (Fichte) oder 3 Srm Hartholz (Buche)						

Sägenebenprodukte (SNP)	entspricht Festmeter:
1 rm Spreißeil, Schwarten gebündelt	0,65 fm
1 Srm Sägehackgut, G50 (mittel)	0,35 fm
1 Srm Sägespäne (bis 5mm Stückgröße)	0,33 fm
1 Srm Hobelspäne	0,20 fm
1 Srm Rinde (unzerkleinert)	0,30 fm
Pellets (Länge 5-30mm, Durchmesser 5-10mm, Wassergehalt 8-10%, Dichte: 650 kg/Srm)	

Quelle: Jonas et al. (2005)

Tabelle 5-7: Definition der Größenklassen von Holzhackschnittel

Gesamtmasse 100 %	Hackgut-Größenklassen				
			G 30 fein	G 50 mittel	G 100 grob
Grobanteil Max. 20 %	Querschnitt max. cm <sup>2</sup>		3	5	10
	Länge max. cm		8,5	12	25
	Grobsieb-Nennmaschenweite	mm	16	31,5	63
Hauptanteil 60 % bis 100 %	Mittelsieb-Nennmaschenweite	mm	2,8	5,6	11,2
Feinanteil (inkl. Feinstanteil) max. 20%	Feinsieb-Nennmaschenweite	mm	1	1	1

Quelle: Rathbauer, und Wörgetter (1999)

Schüttdichte-Klassen werden anhand der Schüttdichte im wasserfreien Zustand festgelegt. Geringe Schüttdichte (bis 160 kg/m<sup>3</sup>) hat z.B. Hackgut von Pappel, Weide oder Tanne, mittlere Schüttdichte (160 bis 200 kg/m<sup>3</sup>) hat Hackgut von Kiefer, Lärche, Birke, Erle. Harthölzer wie Buche, Eiche und Robinie fallen in die Klasse hohe Schüttdichte (größer 200 kg/m<sup>3</sup>).

### Der Heizwert von Holz in Abhängigkeit des Wassergehaltes

Je mehr Wasser im Holz enthalten ist, desto geringer ist sein Heizwert, da das enthaltene Wasser bei der Verbrennung verdampft werden muss (Verdampfungswärme von Wasser: ca. 0,68 kWh/kg das sind 2,44 MJ/kg). Rechenwerte für den Heizwert von Biomasse sind:

- Heizwert für alle Holzarten in Trockensubstanz: 5,2 kWh/kg (19 MJ/kg)
- Heizwert für gut luftgetrocknetes Holz (Wassergehalt: 20%): 4 kWh/kg (14,4 MJ/kg)
- Heizwert für Pellets (Wassergehalt: 0%): ≥ 5,0 kWh/kg

- Heizwert für Pellets (Wassergehalt: 10%; entspricht Maximalwert): ca. 4,8 kWh/kg

### Zusammenfassung der in den Kalkulationen verwendeten Heizwerte

Brennstoff	Heizwert	Exakte Einheit
Holz Trockensubstanz	5,2	kWh/kg
Holz luftgetrocknet (w=20%)	4,0	kWh/kg
Pellets absolut trocken	5,0	kWh/kg
Pellets handelsüblich (w≤10%)	4,8	kWh/kg

## Potenziale fester biogener Energieträger in Luxemburg

Das Potenzial fester Biomasse in Luxemburg setzt sich aus den Teilbereichen

- Nachwachsendes Energieholz
- Alt- und Restholz
- Energiepflanzen (ein- u. mehrjährige)
- Müllanteil für die thermische Verwertung
- Feste landwirtschaftliche Reststoffe

zusammen. Diese 5 stofflichen Bereiche werden im Folgenden jeweils in Hinblick auf die unterschiedlichen Potenzialkategorien analysiert. Randbedingungen und Annahmen, welche im Zuge der Berechnungen berücksichtigt bzw. angenommen wurden, werden an den inhaltlich relevanten Stellen dokumentiert.

### 5.2.2 Potenziale im Bereich nachwachsendes Energieholz

#### Theoretisches Potenzial nachwachsendes Energieholz

Die Flächen- und Stoffkonkurrenz von Energiepflanzen zu anderen Nutzungsformen, wie die stoffliche Nutzung und die Nahrungsmittelproduktion, werden im Zuge der Berechnung des theoretischen Potenzials nicht berücksichtigt. Das heißt, der Wert für das theoretische Potenzial beruht auf der Annahme der absoluten Fokussierung auf die Energieträgerbereitstellung. Es wird bei der Kalkulation des theoretischen Potenzials weiters davon ausgegangen, dass die aktuell existierenden forstwirtschaftlichen bzw. landwirtschaftlichen Flächen in ihrer Verteilung und Größe erhalten bleiben und sich nur die Art der Nutzung ändert.

Das theoretische Potenzial an Energieholz fußt auf der verfügbaren Luxemburger

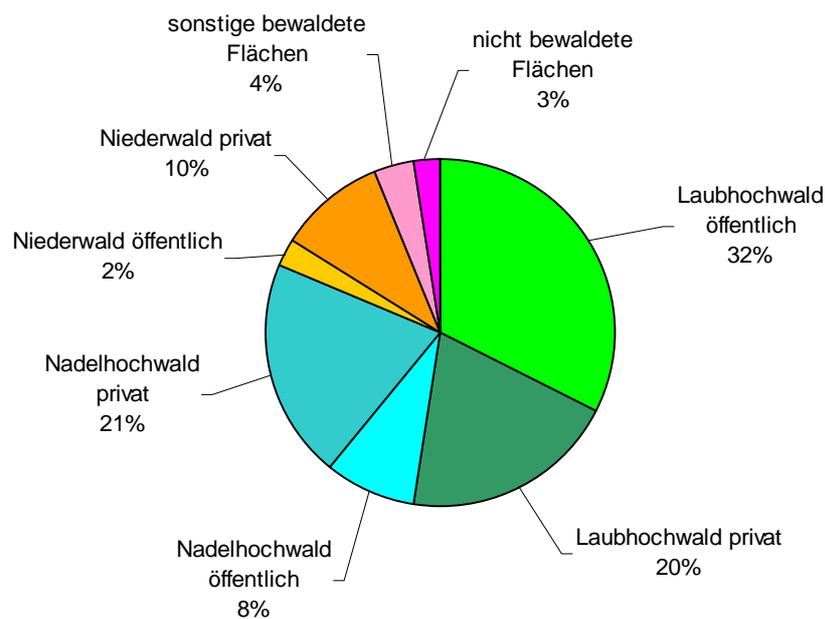
Waldfläche. Diese betrug im Jahr 2002 insgesamt 90.050 ha und setzte sich dabei aus den in Tabelle 5-8 und Abbildung 5-8 dokumentierten Anteilen zusammen. Die zeitliche Entwicklung der Waldflächen in Luxemburg seit dem Jahr 1990 zeigt eine weitgehend konstante Gesamtfläche und eine ebenso konstante Verteilung über die unterschiedlichen Waldarten. Die entsprechenden Flächen werden auch für die nachfolgenden Betrachtungen als konstant angenommen.

Zur Ermittlung des theoretischen Potenzials wird angenommen, dass mittelfristig 95% der gesamten zur Verfügung stehenden Waldfläche mit Hochwäldern aufgeforstet wird, wobei 60% dieser Fläche auf belaubte Hochwälder und 40% auf Nadelhochwälder entfallen. Die verbleibenden 5% der Gesamtwaldfläche werden für die nötige Wegeinfrastruktur veranschlagt, welche natürlich nicht bewaldet ist. Da nur nachhaltig nutzbare Potenziale betrachtet werden sollen, wird der **Bestand an sich nicht zum Potenzial gezählt**, sondern nur die nachwachsende Holzmasse in der Kalkulation berücksichtigt.

Tabelle 5-8: Waldflächen in Luxemburg

<b>Waldflächen in Luxemburg</b>	<b>Fläche in ha</b>
Laubhochwald öffentlich	29350
Laubhochwald privat	17850
Nadelhochwald öffentlich	7650
Nadelhochwald privat	18550
Niederwald öffentlich	2100
Niederwald privat	8950
sonstige bewaldete Flächen	3300
nicht bewaldete Flächen	2300
Summe	90050

Quelle: Rondeux Jacques et al. (2003), „La forêt luxembourgeoise en chiffres“



Quelle: Rondeux Jacques et al. (2003), „La forêt luxembourgeoise en chiffres“  
 Abbildung 5-8: Waldflächen in Luxemburg

Zur Kalkulation des theoretischen Potenzials aus nachwachsendem Energieholz wird im Mittel in Anlehnung an Neubarth und Kaltschmitt (2000) ein oberirdisch nachwachsender Netto-Biomasseertrag<sup>26</sup> von 5,7 Tonnen Trockensubstanz pro Hektar Waldfläche und Jahr angenommen. In diesem Wert sind das Stammholz und der gesamte Schlagabraum enthalten, das heißt, es wird in der Kalkulation von der vollständigen Nutzung des Biomasseertrages ausgegangen. Der Heizwert des Holzes wird mit einem Wert von 5,2 kWh/kg Trockensubstanz angenommen. Diese Annahmen führen zu einem theoretischen Potenzial an nachwachsendem Energieholz mit einem Gesamtheizwert von 2.536 GWh/a.

### Technisches Potenzial nachwachsendes Energieholz

Im Zuge der Berechnung des technischen Potenzials bleibt die Annahme aufrecht, dass eine reine energetische Nutzung des produzierten Energieholzes erfolgt und keine Konkurrenz zur stofflichen Nutzung auftritt. Wie auch beim theoretischen Potenzial wird davon ausgegangen, dass die Waldfläche konstant zum Status quo bleibt. Ebenso wird angenommen, dass die Infrastruktur zur forcierten Waldnutzung in Form von Wegenetzen, Lager- und Umladeflächen und Flächen für die Weiterverarbeitung (z.B. für die Hackgutherstellung) 5% der gesamten Waldfläche

<sup>26</sup> Exklusive Wurzelholz, Stubben, Laub, Entnahme durch Pflanzenfresser, Verrottung

beansprucht.

Für jene Flächen, welche zurzeit mit Niederwald bewachsen sind, oder als sonstige Waldflächen ausgewiesen sind, wird angenommen, dass diese zu 70% mit Hochwald aufgeforstet werden können. Die restlichen 30% dieser Niederwald- und sonstigen Waldflächen sind in steilen Hanglagen angesiedelt und entziehen sich damit der weiteren Nutzung.

Im Bereich des bestehenden Hochwaldes sind ebenso Flächen vorhanden, welche eine Nutzung verhindern. Das Forstinventar<sup>27</sup> weist diesbezüglich eine Fläche von 4650 ha aus, die eine Neigung größer als 60% aufweist. Es wird hier angenommen, dass eine technisch rationelle Bewirtschaftung in entsprechenden Hanglagen entfällt.

Nach Angaben der Luxemburger Forstverwaltung werden mittelfristig ca. 5% der Luxemburger Waldfläche (das heißt ca. 4500 ha) als Naturwald ausgewiesen. Da eine Bewirtschaftung dieser Flächen in der Folge entfällt, wird diese Fläche ebenfalls als Abschlag berücksichtigt. Es könnte in diesem Bereich der Fall eintreten, dass Naturschutzflächen zumindest teilweise in den oben beschriebenen Abschlagsflächen enthalten sind. Da sich dies jedoch nicht quantifizieren lässt, soll an dieser Stelle aus Sicherheitsgründen der Abschlag von der nutzbaren Waldfläche erfolgen. Unter den getroffenen Annahmen beträgt das technische Potenzial an nachwachsendem Energieholz in Luxemburg 2.137 GWh/a.

Die Annahmen zur Abschätzung des Flächenpotentials zur Berechnung des technischen Potenzials aus nachwachsendem Energieholz sind in Tabelle 5-9 zusammengefasst.

Tabelle 5-9: Abschätzung des Flächenpotentials zur Berechnung des technischen Potenzials fester biogener Biomasse aus Holz.

Waldflächen	Fläche in ha
Gesamtwaldfläche	90.050
Abschlag Infrastruktur	4.503
Abschlag nicht steiler Niederwald	4.305
Abschlag steile Hanglage Hochwald	4.650
Abschlag Naturschutz	4.500
Waldfläche für die energetische Nutzung	72.093

<sup>27</sup> „La forêt luxembourgeoise en chiffres – résultats de l’inventaire forestier national au Grand-Duché de Luxembourg 1998-2000“ S. 78 und 81 : Statistik Topographie

## **Technisches Entwicklungspotenzial nachwachsendes Energieholz**

Generell müssen im Bereich der energetischen Holznutzung Produktionstechnologien zur Bereitstellung des Energieträgers und Anwendungstechnologien zur Umwandlung des Energieträgers in Nutzenergie betrachtet werden.

Die Bereitstellung des Energieträgers Holz ist vor allem durch eine Mechanisierung der Holzbringung geprägt, wobei immer leistungsfähigere und effizientere Erntegeräte eine rationelle Bringung des Rohstoffes ermöglichen. Innovationen im Bereich der Brennstoffbereitstellung betreffen hier vor allem die Herstellung von Hackschnitzel am Ort der Biomasseernte. Größere und effizientere Pelletieranlagen sind bei einer entsprechenden Marktentwicklung prinzipiell möglich, doch dürfen hier in absehbarer Zeit keine Innovationen im engeren Sinn erwartet werden. Die Weiterverarbeitung des primären Rohstoffes Holz zu Hackschnitzel für den mittleren und hohen Leistungsbereich und Holzpellets für den kleinen Leistungsbereich dient der Normierung des Brennstoffes für den Einsatz in automatisierten biogenen Heizsystemen oder Kraft-Wärmekopplungsanlagen. Im Bereich Holz ist dieser Trend sicherlich für die Zeit bis 2020 richtungweisend, wobei vor allem die Aufweitung des möglichen Leistungsbereiches von dezentralen Kleinanlagen mit wenigen kW thermisch bis zu Kraft-Wärmekopplungen im 100 MW Bereich zukunftsweisende Möglichkeiten eröffnet.

In Bezug auf die Brennstoffbereitstellung werden in Luxemburg Überlegungen zur Errichtung eines Biomassehofes zur effizienten Abwicklung der Brennstofflogistik angestellt. Die Machbarkeit dieses innovativen Ansatzes wurde von Kalmes et al. (2006) in einer „Machbarkeitsstudie eines Biomassehofes in Luxemburg“ detailliert untersucht, wobei klare Randbedingungen eines wirtschaftlichen Betriebes einer solchen Einrichtung herausgearbeitet werden. Den Ergebnissen der Studie zu Folge wäre ein Energieholzdurchsatz von 7.000 bis 10.000 m<sup>3</sup> erforderlich, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen, was aus der Sicht der Potenziale ohne weiteres möglich ist. Das momentane Problem ist diesbezüglich nicht im Bereich der Angebotsseite zu sehen, sondern alleine durch die möglicher Weise mangelhafte Nachfrage gegeben. Dabei stellt eine abgesicherte und planbare Nachfrage ein wesentliches Kriterium dar.

Zentrale Innovationen im Bereich der Anwendungstechnologien zur Nutzung von Energieholz sind vor allem in der Automatisierung der Brennstoffzufuhr (Hackschnitzeltechnologie) und in der zusätzlichen Normierung des Brennstoffes (Pelletstechnologie) zu sehen. Aus diesen Innovationen resultierte einerseits der wesentlich verbesserte Einsatz von Regelungstechnik und Prozessoptimierung, da die Brennstoffzufuhr und somit die Verbrennungsparameter sowie die Kesselleistung automatisiert beeinflussbar und damit optimierbar wurden. Andererseits ist der

Bedienungskomfort von Biomasse-Zentralheizungsanlagen durch die Möglichkeit der Automatisierung deutlich angestiegen und heute mit Gas- oder Ölkessel vergleichbar. Im Bereich der Stückgutkessel ist die Entwicklung des Saugzugkessels als wesentliche Innovation zu nennen.

Innovationen selbigen Umfanges sind in absehbarer Zeit nicht mehr zu erwarten. Verbesserungsinnovationen zur weiteren Steigerung von Wirkungsgraden und die Optimierung der Regelungen finden laufend statt, stellen aber keine systemtechnischen Neuerungen dar.

Im Bereich von Klein- und Kleinstfeuerungsanlagen stellt der Einsatz solcher Systeme in energieeffizienten Gebäuden wie Niedrigenergie- und Passivhäusern eine zukünftige Herausforderung dar. Die entsprechenden Anforderungen der kleinen Leistung bzw. guten Regelbarkeit werden dabei vor allem von Pelletsystemen erfüllt.

Biomasse Heizsysteme mittlerer Leistung werden in Zukunft vermehrt zur Wärmebereitstellung in Mehrfamilienwohnhäusern herangezogen. Die Optimierung des Gesamtsystems (Mikronetz) zur Warmwasserbereitung und Raumheizung, vor allem in Kombination mit weiteren Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energie wie der Solarthermie ist ein Thema zukünftiger technologischer Weiterentwicklung.

Bei großen Anlagen ist ein Trend zu immer größeren Anlagenleistungen zu beobachten. Die Verbindung der Wärmeproduktion mit der Stromerzeugung (Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung) drängt sich bei dem systembedingt hochexergetisch betriebenen Prozess der Niedertemperaturbereitstellung förmlich auf und wird in Hinkunft sicherlich einen höheren Stellenwert einnehmen. Dabei ist in Zukunft der breite Einsatz von Anlagengrößen in einem Bereich von 10 bis 30 MW thermisch zu erwarten. Ein weiterer zukünftiger Trend liegt in einem steigenden Biomasseanteil in Fernwärmesystemen, wobei sich die Einbindung von Biomasse KWK - Anlagen besonders gut umsetzen lässt.

Die ökonomischen Lerneffekte der Biomassetechnologien wurden in den letzten 10 Jahren in die Weiterentwicklung der technischen Komponenten investiert, bzw. wurden Teuerungen der Rohstoffe in der Fertigung kompensiert, was in der Folge zu weitgehend konstanten Kessel-Endverbraucherpreisen geführt hat. Für den Konsumenten bietet der Biomassekessel dadurch heute ein unvergleichlich höheres Komfortniveau.

### **Realisierbares Potenzial nachwachsendes Energieholz**

Die bei der Abschätzung des technischen Flächenpotenzials getroffenen Annah-

men müssen im Bereich des realisierbaren Potenzials nicht mehr ergänzt werden. Alle Waldflächen, die aus Gründen der mangelhaften topografischen Eignung, des mangelnden Bewuchses oder aus Gründen der nötigen Infrastruktur oder des Naturschutzes keinen Beitrag zum Potenzial leisten können, wurden bereits berücksichtigt. Das Flächenpotential kann also im Zuge der Diskussion über das realisierbare Potenzial mit einem Wert von 72.093 ha beibehalten werden.

Eine Reihe von Hemmnissen behindert im Weiteren die tatsächliche Nutzung des technischen Potenzials, wobei diese Hemmnisse im Bereich des öffentlichen Waldes und im Bereich des Privatwaldes unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Die zentralen Hemmnisse im Bereich des Privatwaldes sind:

- Die Forstflächen sind vor allem im Bereich der privaten Waldbesitzer kleinräumig strukturiert und mangelhaft aufgeschlossen.
- Der ökonomische Anreiz für ein Engagement von privaten Waldbesitzern ist gering.
- Die Bereitschaft der privaten Waldbesitzer zur Bewirtschaftung und zur systematischen Aufschließung der Waldflächen mittels forstwirtschaftlichen Wegenetzes ist gering. Mögliche Gründe dafür liegen im Mangel an Interesse, da der Bezug zum Wald verloren gegangen ist, an den kleinräumigen Strukturen und der geringe Bereitschaft zur Zusammenarbeit mit anderen Waldbesitzern, dem Informationsmangel, der mangelnden Organisation (insgesamt 13.000 Privatwaldbesitzer, davon 10% (50% der Fläche) in Vereinigung organisiert) und am geringen ökonomischen Anreiz.
- Es existiert ein Informationsmangel der Waldbesitzer in Bezug auf Möglichkeiten der forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung und Vermarktung sowie auf Marktpreise.
- Die Machbarkeit eines "Biomassehofs" welcher eine strukturierte professionelle Vermarktung des Rohstoffes Energieholz ermöglichen würde, wurde in einer Studie der Forstverwaltung EFOR untersucht. Unter gewissen Rahmenbedingungen, vor allem der Sicherung der Nachfrage, scheint ein solches Projekt wirtschaftlich durchführbar. Zurzeit scheitert die Durchführung noch am mangelnden Interesse der Privatwaldbesitzer bzw. auch am mangelnden Interesse der Forstverwaltung an der Errichtung eines Holzmarktes. Einige kleinere Holzhofprojekte auf privater Basis werden jedoch bereits geplant bzw. stehen vor der Durchführung.
- Die Kosten einer Holzbringung in Luxemburg sind tendenziell höher als in den Nachbarländern, was einen Wettbewerbsnachteil im Bereich des grenzüberschreitenden Holzhandels mit sich bringt.

Die zentralen Hemmnisse im Bereich des öffentlichen Waldes sind:

- Es herrscht geringes Interesse an einer flächendeckend optimierten Logistik mit

der Integration eines Holzhofes.

- Ein Hemmnis ist durch den fehlenden Markt im Holzbereich in Luxemburg gegeben.
- Konzepte werden nur auf kommunaler Ebene entwickelt. Eine landesweite Vernetzung fehlt.

Die Entstehung eines luxemburger Energieholzmarktes im Bereich moderner Energieholzformen (Hackschnitzel und Holzpellets) ist nicht zuletzt an einen inländischen Absatzmarkt gebunden. Da aus historischer Sicht der Einsatz von modernen Energieholzformen in Luxemburg nicht etabliert ist, fehlen hier auch die treibenden Kräfte der Nachfrage. Die Diffusion der (modernen) Technologien zur Nutzung von Energieholz befindet sich somit in Luxemburg in der Eingangsphase, in der aus diffusionstheoretischer Sicht vor allem Innovatoren und eine frühe Minderheit Investitionen wagen. Fördernde Faktoren sind hierbei vor allem in der Publikation von gelungenen luxemburger Anlagen und der Verbreitung von strukturierten Informationen an wesentliche Zielgruppen (Waldbesitzer, Konsumenten welche vor einer Investitionsentscheidung stehen, kommunale Einrichtungen) zu sehen.

Der Status quo der energetischen und stofflichen Holznutzung in Luxemburg ist in Tabelle 5-10 dokumentiert. Laut Forstverwaltung ist das Potenzial des öffentlichen Waldes jedenfalls mit 200.000-250.000 m<sup>3</sup>/a (stofflich und energetisch) anzunehmen, wovon 100.000-125.000 m<sup>3</sup>/a (Industrieholz und Brennholz) energetisch genutzt werden könnten (Stammholz ausgeschlossen). In Baurekalenner (2005), „Brennholznutzung früher und heute“ wird geschätzt, dass in Luxemburg rund ein Viertel der nachwachsenden Holzmenge nachhaltig als Energieholz genutzt werden könnte, das sind rund 165.000 m<sup>3</sup>/a, wobei davon im Minimum 60.000 m<sup>3</sup>/a kurzfristig verfügbar sind.

Tabelle 5-10: Status quo der Waldnutzung in Luxemburg

	<b>Öffentlicher Wald Einschlag in m<sup>3</sup></b>	<b>Privatwald Einschlag in m<sup>3</sup></b>
Industrieholz (stofflich)	66.541	45.038
Stammholz (stofflich)	60.016	65.475
Brennholz (energetisch)	7.265	9.750
Summen	133.822	120.263
Total	254.085	

Quelle: Statec (2003)

Die Anteile der stofflichen bzw. energetischen Holznutzung regelt der Holzmarktpreis. Der momentan dominante Holzabnehmer Luxemburgs, die Papierindustrie, ist auf die luxemburger Rohstoffe nicht angewiesen und wird sich am internationalen Markt bedienen, wenn die luxemburger Holzpreise relativ steigen. Das

---

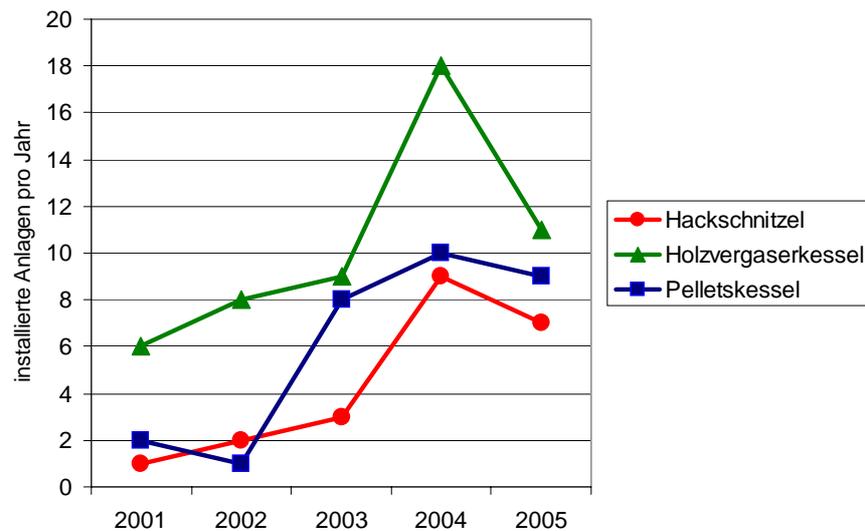
heißt, dass die Holzressourcen prinzipiell der energetischen Nutzung zur Verfügung stehen, wenn die Nachfrage dies erfordert und ein Marktpreis gezahlt wird, der jenen konkurrenzierender Nachfragen (stoffliche Nutzung) übersteigt.

In Hinblick auf das realisierbare Potenzial aus Energieholz kann somit ohne Berücksichtigung von zeitlichen Restriktionen (also sehr langfristig) das technische Potenzial angegeben werden. Das bis zum Jahr 2010 bzw. 2020 realisierbare Energieholzpotenzial ist weitestgehend von der bereits oben diskutierten Entwicklung der Nachfrage abhängig. Die Nachfrage wiederum wird maßgeblich von der Preisentwicklung der fossilen Energieträger, der zukünftigen Energiepolitik (z.B. anreizorientierte Instrumente) sowie strukturellen und legalen Randbedingungen (z.B. Emissionsstandards) beeinflusst.

Da es sich im Fall des realisierbaren Energieholzpotenzials in Luxemburg bis zum Jahr 2010 bzw. 2020 somit um ein Nachfragepotenzial handelt, müssen in der Folge Annahmen bezüglich der Entwicklung und Diffusion von Holzheizanlagen in Luxemburg getroffen werden. Im Folgenden sind der Ausgangspunkt (Status quo) und die angenommene weitere Entwicklung dokumentiert.

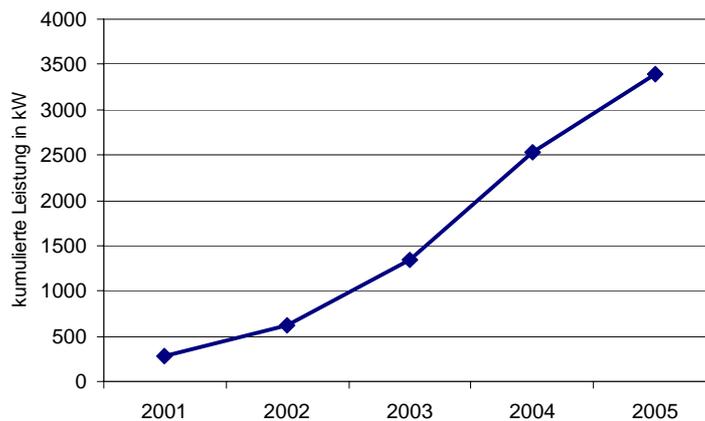
### **Private Kleinanlagen**

Die Entwicklung der Marktdiffusion von (bezuschussten) privaten Kleinanlagen ist in Abbildung 5-9 dokumentiert. Im Zeitraum 2001 bis 2005 wurden in Luxemburg 22 Hackschnitzelkessel, 52 Holzvergaserkessel und 30 Pelletskessel bezuschusst. Die kumulierte installierte Leistung der genannten Anlagen beträgt dabei im Jahr 2005 einen Wert von 3390 kW. Die zeitliche Entwicklung ist in Abbildung 5-10 dargestellt.



Quelle: Umweltverwaltung

Abbildung 5-9: In Luxemburg im Zeitraum 2001 bis 2005 bezuschusste automatisierte biogene Heizsysteme



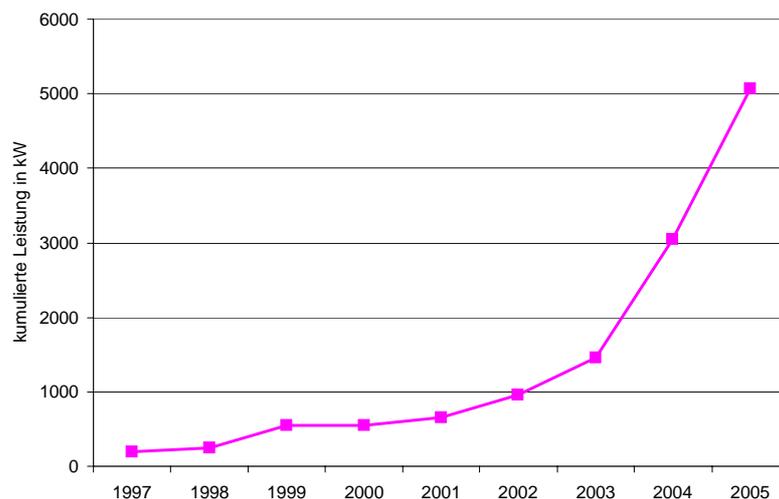
Quelle: Umweltverwaltung

Abbildung 5-10: Kumulierte Leistung der im Zeitraum 2001 bis 2005 in Luxemburg bezuschussten automatisierten biogenen Heizsysteme

### Kommunale Anlagen, Großanlagen

Die historische Entwicklung der in Luxemburg installierten Leistung von kommunalen Hackschnitzelkesseln (mittlere bis große Anlagen) ist in Abbildung 5-11 dargestellt. Bis zum Jahr 2005 wurden in Luxemburg 16 Anlagen mit einer mittleren Anlagenleistung von 316 kW realisiert, wobei der Gesamt-Brennstoffverbrauch pro Jahr ca. 14.000 Srm Hackschnitzel betrug.

Laut einer Einschätzung der luxemburger Forstverwaltung werden bis zum Jahr 2010 weitere 40 Hackschnitzelfeuerungen auf kommunaler Ebene im gleichen Leistungsbereich umgesetzt. Weiters wird angenommen, dass bis zum Jahr 2010 noch 4 größere private Hackschnitzelanlagen hinzukommen. Für den Zeitraum von 2010 bis 2020 wird die Realisierung von weiteren 100 kommunalen Anlagen und 50 privaten Anlagen im Leistungsbereich von 300 kW angenommen.



Quelle: Luxemburger Forstverwaltung - Administration des Eaux et Forêts;

Abbildung 5-11: Installierte kumulierte Leistung von Hackschnitzelkessel in Luxemburg

Im Bereich Hackschnitzel können im betrachteten Zeithorizont weiters Biomasse-KWK-Anlagen umgesetzt werden. Diese Anlagen müssen nach logistischen Gesichtspunkten und gemäß der Wärmenachfrage dimensioniert werden und weisen heute typischer Weise Leistungen von 1 MW bis 30 MW auf. Die Standortsuche ist dabei das zentrale Thema, vor allem in Hinblick auf geeignete neue Wärmenetze. Dennoch soll angenommen werden, dass im Zeitraum von 2010 bis 2020 insgesamt 3 Anlagen zu je 10 MW thermisch errichtet werden um das nachfrageseitige Potenzial einschätzen zu können. Mit einer Volllaststundenzahl von 6500 Stunden pro Jahr ergibt sich in Summe eine energetische Nachfrage von 195 GWh Energieholz.

Die Abschätzung des Status quo der Scheitholzheizungen in Luxemburg und deren Energieverbrauch stützt sich auf die Angaben zur Beheizung der Gebäude. Die nationale Gebäudestatistik nennt für das Jahr 2001 eine Zahl von 2210 luxemburgischen Haushalten, welche mit Holz beheizt werden. Die Holzheizungen finden sich dabei hauptsächlich im alten Gebäudebestand. In neu errichteten Gebäuden der vergangenen 10 Jahre wurden kaum Holzheizungen installiert. In rezenter Ver-

gangenheit ist die Nachfrage nach Holzöfen zwar wieder angestiegen, es wird jedoch vermutet, dass es sich bei diesen Holzöfen um Zweitsysteme handelt, welche nur einen geringen Teil des jeweiligen Heizwärmebedarfes decken. Das zur Beheizung eingesetzte Holz ist dem Scheitholz zuzuordnen. Zur Hochrechnung des bestehenden Energieverbrauches aus Scheitholz wird im Schnitt ein Jahresheizenergieverbrauch der entsprechenden Haushalte von 20.000 kWh Heizwert angenommen. Dies ergibt ein aktuelles (Nachfrage)Potenzial für Scheitholz von 44,2 GWh.

Die weitere Entwicklung von Pellets und Scheitholz ist schwierig zu beurteilen, da die Marktdiffusion bei Pellets in Luxemburg zurzeit in geringem Umfang begonnen hat und sich somit zur Trendextrapolation nicht eignet und der Status quo im Bereich Scheitholz kaum dokumentiert ist. International ist im Bereich der biogenen Heizsysteme ein deutlicher Trend in Richtung automatisierte Heizsysteme feststellbar. Für das (Nachfrage)Potenzial im Bereich Pellets wird eine Verdreifachung des Bestandes von 2005 im Jahr 2010 angenommen und eine Verachtfachung des Bestandes 2010 für das Jahr 2020. Im Bereich Scheitholz wird eine Steigerung der Brennstoffnachfrage bis 2010 um 20% bezogen auf den Wert von 2005 angenommen und eine weitere Steigerung um 50% bis zum Jahr 2020 bezogen auf den Wert von 2010. Diese Steigerungen mögen gering wirken, es ist jedoch speziell im Sektor Scheitholz der nötige Kesseltausch aus technischen Gründen (es sind zahlreiche alte Scheitholzkessel im Bestand vorhanden) und der geringe Komfort bei der Handhabung des Brennstoffs zu berücksichtigen. Diese Faktoren lassen höhere Steigerungsraten als unrealistisch erscheinen.

Die Berechnungen der realisierbaren Potenziale aus Energieholz sind in Tabelle 5-11 dargestellt. Der Status quo im Jahr 2005 beträgt somit 64,4 GWh, das realisierbare Potenzial bis zum Jahr 2010 beträgt 116,7 GWh und das realisierbare Potenzial bis zum Jahr 2020 beträgt 517 GWh Endenergie (Heizwert) Energieholz.

Tabelle 5-11: Zusammenfassung der Potenzialabschätzung Energieholz in Luxemburg

	Installierte Leistung		Volllaststunden		Energiebedarf	
2005 Biomasse KWK	0,0	kW	0	h	0	GWh
2005 Hackschnitzel groß	5.062,0	kW	2474	h	12,5	GWh
2005 Hackschnitzel klein	1.014,0	kW	2300	h	2,3	GWh
2005 Holzvergaser klein	1.709,0	kW	2300	h	3,9	GWh
2005 Pellets	646,0	kW	2200	h	1,4	GWh
2005 Scheitholz u. nicht bezuschusste	24.550,0	kW	1800	h	44,2	GWh
Summen	32.981,0	kW			64,4	GWh
2010 Biomasse KWK	0,0		0	h	0,0	GWh
2010 Hackschnitzel groß	18.966,0	kW	2474	h	46,9	GWh
2010 Hackschnitzel klein	2.028,0	kW	2300	h	4,7	GWh
2010 Holzvergaser klein	3.418,0	kW	2300	h	7,9	GWh
2010 Pellets	1.938,0	kW	2200	h	4,3	GWh
2010 Scheitholz u. nicht bezuschusste	29.460,0	kW	1800	h	53,0	GWh
Summen	55.810,0	kW			116,7	GWh
2020 Biomasse KWK	30.000,0	kW	6500	h	195,0	GWh
2020 Hackschnitzel groß	63.966,0	kW	2474	h	158,3	GWh
2020 Hackschnitzel klein	8.112,0	kW	2300	h	18,7	GWh
2020 Holzvergaser klein	13.672,0	kW	2300	h	31,4	GWh
2020 Pellets	15.504,0	kW	2200	h	34,1	GWh
2020 Scheitholz u. nicht bezuschusste	44.190,0	kW	1800	h	79,5	GWh
Summen	175.444,0	kW			517,0	GWh

Quelle: eigene Berechnungen

Wie die Berechnungen der realisierbaren Potenziale aus der Sicht der Nachfrage zeigen, liegen diese Potenziale deutlich unter den angebotsseitigen Werten. Aus der Sicht der Nachfrage ist damit die Nutzung von Energieholz bis zum Jahr 2020 unbegrenzt möglich.

### 5.2.3 Potenziale im Bereich Alt- und Restholz

#### Theoretisches Potenzial Alt- und Restholz

Das Potenzial an Alt- und Restholz in Luxemburg kann aufgrund von verfügbaren nationalen Statistiken und weiteren Informationen aus der holzverarbeitenden In-

dustrie abgeschätzt werden. Die Handelsbilanz betreffend Holz ist in Tabelle 5-12 dargestellt. Es wird gut ersichtlich, dass der inländische Verbrauch die inländische Produktion bei weitem übersteigt, womit es zu einem massiven Holzimport kommt. Dieser Hintergrund ist für die Erklärung des Alt- und Restholzpotenzials von zentraler Bedeutung.

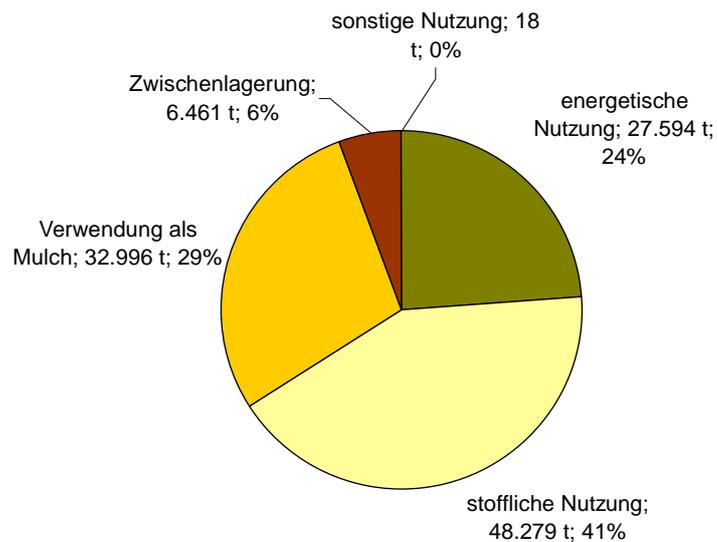
Tabelle 5-12: Produktion, Import und Export von Holz in Luxemburg im Jahr 2003

	<b>Holz in 1000m<sup>3</sup></b>
Produktion	254,1
Import	1475,3
Export	218,5

Quelle: Administration des Eaux et Forêts

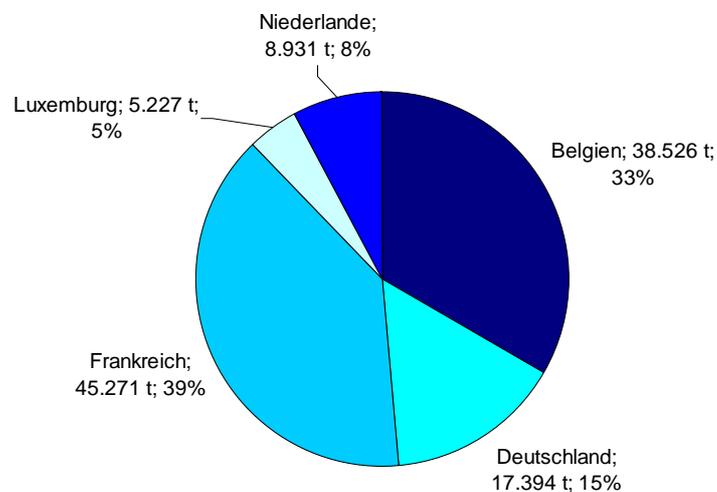
In Summe werden in der nationalen Statistik 115.349 Tonnen transportiertes (!) Alt- und Restholz deklariert. Diese Masse setzt sich aus unterschiedlichen Fraktionen mit unterschiedlichen stofflichen und energetischen Merkmalen zusammen. Die Statistik weist einen momentanen Einsatz des Alt- und Restholzes aus, wie dies in Abbildung 5-12 dargestellt ist. Der größte Anteil von 41% entfällt dabei auf die stoffliche Nutzung. Die Verwendung als Mulch mit 29% und die energetische Nutzung mit 24% sind weitere wesentliche Bereiche.

Der größte Anteil des luxemburger Alt- und Restholzes wird zurzeit jedoch in den Nachbarländern Luxemburgs genutzt, wie dies in Abbildung 5-13 dargestellt ist. Hauptabnehmer sind in diesem Zusammenhang Frankreich mit 39% und Belgien mit 33%. Luxemburg selbst nutzt nur 5% seines Alt- und Restholzes.



Quelle: Administration de l'environnement

Abbildung 5-12: Verwendungskategorien von Alt- und Restholz aus Luxemburg



Quelle: Administration de l'environnement

Abbildung 5-13: Verteilung der Nutzungsorte von luxemburgischem Alt- und Restholz

Ein weiteres Aufkommen von Alt- und Restholz betrifft innerbetriebliche Abläufe. Der Holzwerkstoffproduzent Kronospan verfügt über Anlagen zur innerbetrieblichen Wärmeproduktion aus Alt- und Restholz im Umfang von 28 MW thermisch. Einer Abschätzung zu Folge, wurde alleine an diesem einen Standort im Jahr 2005 eine

Alt- und Restholzmenge von 200 GWh umgesetzt. Weitere Anlagen zur innerbetrieblichen energetischen Nutzung von Alt- und Restholz sind nicht bekannt, wobei deutlich kleinere Anlagen, beispielsweise in Schreinereibetrieben, nicht ausgeschlossen werden können.

Zur Abschätzung des theoretischen energetischen Potenzials aus Alt- und Restholz wird die gesamte ausgewiesene transportierte Holzmasse von 115.349 Tonnen berücksichtigt, auch wenn einzelne Fraktionen selbst für eine energetische Nutzung mindere Qualität aufweisen. Dieser Umstand wird durch die Annahme eines tendenziell geringen Heizwertes von 3,5 kWh/kg berücksichtigt, welcher etwa für Holz mit einem Wassergehalt von 30% anzusetzen ist. Weiters wird die oben beschriebene Nutzung von Alt- und Restholz der Firma Kronospan berücksichtigt. Die Kalkulation ergibt ein theoretisches energetisches Potenzial aus Alt- und Restholz von 604 GWh/a.

### **Technisches Potenzial Alt- und Restholz**

Wie im Zuge der Berechnung des theoretischen Potenzials aus Alt- und Restholz ausgewiesen, beträgt das jährliche Aufkommen in diesem Bereich in Luxemburg ca. 115.000 t. Ein Anteil von ca. 33.000 t von diesem Gesamtaufkommen wird zurzeit einer stofflichen Nutzung als Mulch zugeführt. Im Sinne der Abschätzung eines technischen Potenzials wird von der energetischen Verwertung dieser Fraktion Abstand genommen, da die Verbrennung bzw. die Aufbereitung für die Verbrennung samt nachgelagerter Abgasreinigung ein großes technisch-wirtschaftliches Hemmnis darstellt. Vom verbleibenden Massenpotential werden weitere 10% für umwelttechnisch problematische und somit aus technisch-wirtschaftlicher Sicht nicht energetisch nutzbare Fraktionen (lackiertes oder sonderbehandeltes Holz) abgezogen. Da das verbleibende Aufkommen an Alt- und Restholz einer Sammellogistik und einer inländischen energetischen Nutzung in Luxemburg zugänglich ist, wird die verbleibende Masse an Alt- und Restholz von ca. 74.000 t dem technischen Potenzial zugerechnet. Der Energiegehalt des verbleibenden Alt- und Restholzes wird in Hinblick auf den Zustand dieses Rohstoffes weiterhin vorsichtig mit 3,8 kWh/kg bewertet. Diese Annahmen führen in der Folge unter der Berücksichtigung der Firma Kronospan zu einem technischen energetischen Potenzial aus Alt- und Restholz von 481 GWh.

### **Realisierbares Potenzial Alt- und Restholz**

Die Abschätzung des technischen Potenzials aus Alt- und Restholz hat einen Wert von 481 GWh ergeben. Berücksichtigt wurden dabei alle aus technischer Sicht thermisch nutzbaren Alt- und Restholzfraktionen unter der Annahme, dass die

Sammel- und Logistikinfrastruktur eine Nutzung in zentralen Anlagen ermöglicht. Das energetische technische Potenzial entspricht einer hypothetisch installierten thermischen Brennstoffdauerleistung von 55 MW. Diese Leistung könnte in der Praxis in ein bis drei großen Holz-KWK-Anlagen installiert werden. Die zentralen Fragen sind in diesem Bereich durch die nötige Brennstofflogistik und durch den oder die Anlagenstandorte gegeben. Wie bei KWK-Anlagen im Allgemeinen stellt der Wärmeabsatz eine besondere Herausforderung im Zuge der Standortdiskussion dar. Das Potenzial als solches kann bei entsprechenden Bemühungen bis zum Jahr 2020 umgesetzt werden, das umsetzbare Potenzial aus Alt- und Restholz bis zum Jahr 2020 wird somit mit einem Wert von 481 GWh festgelegt.

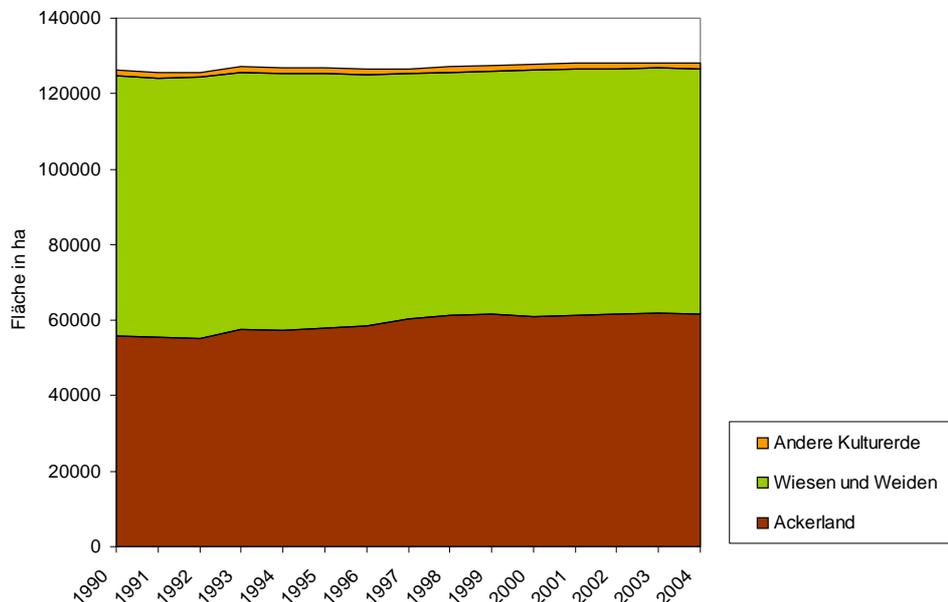
Das entsprechende realisierbare Potenzial bis 2010 ist davon abhängig, ob es gelingt, ein entsprechendes Projekt vor 2010 in Betrieb zu nehmen. Ein konkretes Projekt der Firma Kronospan in Kooperation mit Luxenergie wurde bereits diskutiert, jedoch wegen administrativer Barrieren (Genehmigungsprozedur mit Einbeziehung der Öffentlichkeit) nicht weiter verfolgt. Es soll jedoch trotzdem angenommen werden, dass ein über die bereits vorhandene Nutzung hinausgehendes moderates KWK-Projekt mit einer thermischen Brennstoffleistung von 10MW bis zum Jahr 2010 umgesetzt werden kann. Unter der Berücksichtigung einer Volllaststundenzahl von 7000 Stunden für diese Anlage und der Berücksichtigung der bestehenden Nutzung ergibt dies ein realisierbares Potenzial aus Alt- und Restholz im Jahr 2010 von 270 GWh.

#### **5.2.4 Potenziale im Bereich Energiepflanzen (ein- und mehrjährige)**

##### **Theoretisches Potenzial Energiepflanzen**

Als Energiepflanzen werden an dieser Stelle alle Pflanzen gewertet, welche auf landwirtschaftlichen Flächen von landwirtschaftlichen Betrieben in Luxemburg produziert werden können. Typische Vertreter von Energiepflanzen, welche in Mitteleuropa produziert werden können sind Mais, Raps, Getreide, Sonnenblume, Zuckerrüben, Energiegräser (z.B. Sudangras, Chinaschilf) und Kurzumtriebswälder. Nach der Definition des gegenständlichen Kapitels sollen an dieser Stelle nur jene Energiepflanzen betrachtet werden, die einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Entsprechende Pflanzen sind vor allem Energiegräser, Stroh bzw. Getreide und der Kurzumtriebswald. Die weiteren angeführten Pflanzen werden hauptsächlich in Vergasungsprozessen oder zur Herstellung von Biotreibstoffen genutzt und werden im Bereich der Potenziale flüssiger und gasförmiger Biomasse diskutiert.

Wie schon bei der Kalkulation des Energieholzpotentials werden bei der Berechnung des theoretischen Energiepflanzenpotentials zunächst keine stofflichen oder sonstigen Konkurrenzen berücksichtigt. Um die Kalkulation des theoretischen energetischen Potenzials zu ermöglichen, wird die theoretisch nutzbare Landfläche festgestellt. Im Jahr 2004 waren in Luxemburg 128.073 ha landwirtschaftliche Fläche verfügbar, wobei sich diese Fläche aus 61.538 ha Ackerland, 65.068 ha Wiesen und Weiden und 1.467 ha sonstigen landwirtschaftlichen Flächen zusammensetzt. Die historische Entwicklung dieser Flächen ist in Abbildung 5-14 dargestellt und zeigt im Zeitraum von 1990 bis 2004 eine geringe Verschiebung der Nutzung in Richtung Ackerland.



Quelle: Ministère de l'Agriculture, de la Viticulture et du Développement rural

Abbildung 5-14: Entwicklung der Luxemburger Landwirtschaftsflächen;

Für die Ermittlung der theoretischen Potentiale an Energiepflanzen für die Bereiche feste, flüssige und gasförmige Energieträger wird angenommen, dass die gesamte landwirtschaftliche Fläche dem Energiepflanzenanbau gewidmet wird. Da auch im Bereich der theoretischen Potentiale diese Werte summierbar bleiben sollen, wird angenommen, dass die Landwirtschaftsfläche zu gleichen Teilen auf die genannten Energieträgerbereiche aufgeteilt wird. Die Gesamtfläche steht somit zu je einem Drittel der Produktion von festen (zur thermischen Verwertung vorgesehenen), von flüssigen (hauptsächlich für den Verkehrsbereich vorgesehenen) und von gasförmigen Energieträgern zur Verfügung. Dies sind pro Bereich 42.691 ha.

Für die thermische Verwertung, welche hier zur Diskussion steht, werden die ertragreichsten Energiepflanzen vorgesehen, wobei wiederum zu je einem Drittel der Fläche, also auf jeweils 14.230 ha, Kurzumtriebswald (12 t TS/(ha\*a)), Energiegras (15 t TS/(ha\*a)) und Getreide (12,3 t TS/(ha\*a)), angebaut werden soll.

Die Kalkulation ergibt eine jährliche Ausbeute von ca. 559.252 Tonnen Trockensubstanz Energiepflanzen. Unter der Berücksichtigung eines mittleren Heizwertes von 5,17 kWh/kg TS errechnet sich in der Folge ein Gesamtheizwert der für die thermische Nutzung produzierten Energiepflanzen von 2.891 GWh pro Jahr.

### **Technisches Potenzial Energiepflanzen**

Das Flächenpotenzial für die Produktion von Energiepflanzen für die thermische Nutzung wurde im Sinne des theoretischen Potenzials mit einem Drittel der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche angenommen (die beiden anderen Drittel stehen im Sinne einer Summierbarkeit den flüssigen und gasförmigen Energieträgern zur Verfügung). Bei der Betrachtung des technischen Potenzials werden strukturelle Gegebenheiten dieser Flächen im Sinne einer Flächenkonkurrenz berücksichtigt. Da an dieser Stelle keine energiepolitische Strategie diskutiert werden soll, wird die verfügbare landwirtschaftliche Fläche in Luxemburg für alle weiteren Betrachtungen in Bezug auf technische Potenziale wie folgt aufgeteilt:

- Wiesen und Weiden bleiben der Viehzucht, vor allem der Rinderhaltung und auch in Hinblick auf eine Wahrung des landschaftlichen Erscheinungsbildes widmungsgemäß unverändert erhalten (dies ist der tiefgreifendste Einfluss auf die Höhe des technischen Potenzials).
- Das nutzbare Ackerland wird (für die Bereiche feste, flüssige und gasförmige Energieträger gemeinsam) um 2.300 ha reduziert. Diese Fläche wird zur Erhaltung der Biodiversität (Programme national de la protection de la nature) nicht bewirtschaftet.

Der bereits bei der Abschätzung des theoretischen Potenzials angewandte Mix an Energiepflanzen soll auch bei der Kalkulation des technischen Potenzials beibehalten werden. Demnach werden auf je einem Drittel der Fläche Kurzumtriebswald, Energiegras und Getreide angebaut. Der energetische Gesamtertrag aus den beschriebenen Produktionslinien beträgt 1.422 GWh/a.

### **Technisches Entwicklungspotenzial Energiepflanzen**

Die Produktion von Energiepflanzen für die thermische Verwertung baut einerseits auf traditionelle Nutzungsformen (z.B. Strohnutzung in Nahwärmanlagen) auf und tendiert andererseits zu besonders ertragreichen Pflanzenarten, deren gesamtökologische Auswirkungen bei einem großtechnischen Einsatz Gegenstand aktueller

Forschung und Entwicklung sind. In diesem Bereich ist auch die Frage einer energetisch günstigen Gesamtlösung für das Anforderungsprofil der Energiedienstleistungsnachfrage interessant, das heißt, mit welchen Pflanzen auf welchen Flächen zukünftig welche Art von Sekundärenergieträger (fest, flüssig, gasförmig) produziert werden sollen. Die Behandlung dieser Thematik geht deutlich über den Rahmen der vorliegenden Studie hinaus.

### **Realisierbares Potenzial aus Energiepflanzen für die thermische Verwertung**

Das technische Potenzial aus Energiepflanzen wurde zu 1.422 GWh/a berechnet. Wird die bestehende Flächenkonkurrenz zu nicht energetischen Produkten (vor allem Nahrungsmittelproduktion) außer Acht gelassen, und werden die produzierten Energiepflanzen auf dem Markt nachgefragt, so könnte dieses Potenzial relativ kurzfristig umgesetzt werden. In der Praxis sind diese Randbedingungen aber auch die größten hemmenden Faktoren. Einerseits wird ein Landwirt jene Pflanzen produzieren, bei denen er den größten ökonomischen Anreiz hat (unter Berücksichtigung aller verfügbaren Optionen zur Förderung), andererseits ist ein solcher Anreiz nur in einem real existierenden Markt denkbar (sofern dieser nicht zur Gänze aus Subventionen bestehen soll) der im Falle der Energiepflanzen für die thermische Verwertung in Luxemburg (noch) nicht existiert.

Da Energiepflanzen für die thermische Verwertung auch in Konkurrenz zu den anderen biogenen Energieträgern für die thermische Verwertung (also z.B. Energieholz oder Alt- und Restholz) stehen, beeinflusst aus marktwirtschaftlicher Sicht das jeweilige Preisniveau auch den nachgefragten Brennstoffmix.

Weitere hemmende Faktoren für eine intensive Produktion von Energiepflanzen sind das Bestreben landwirtschaftliche Stilllegungsflächen nicht wieder zu bewirtschaften bzw. auch die Extensivierung der Produktion an sich. In diesem Zusammenhang ist die Frage der gesamtenergetischen Bewertung von Energiepflanzen im konkreten Fall zu prüfen, da hohe Erträge oftmals nur unter massivem Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmittel zu Stande kommen, welche ihrerseits wieder einen hohen Energieaufwand verursachen.

Aus der Sicht des Natur- und Umweltschutzes muss der Einfluss des Energiepflanzenanbaus sowie der Landwirtschaft im Allgemeinen auch auf die Qualität der Wasservorräte, die Bodenqualität und die Biodiversität Rücksicht nehmen, was zusätzliche Restriktionen mit sich bringt.

In Hinblick auf die Bestrebungen und Zielsetzungen der luxemburgischen Landwirtschaft und des Umweltschutzes wird deshalb das Flächenpotential zur Produktion von Energiepflanzen mit 20 % der im technischen Potenzial enthaltenen Flä-

che angenommen. Diese 20% sollen bis zum Jahr 2020 erschlossen werden. Im Hinblick auf den Umstand, dass im Status quo (Basis 2005) keine Energiepflanzenproduktion für die thermische Verwertung ausgewiesen ist, wird das realisierbare Potenzial bis zum Jahr 2010 auf der Basis 5% der nutzbaren Fläche berechnet.

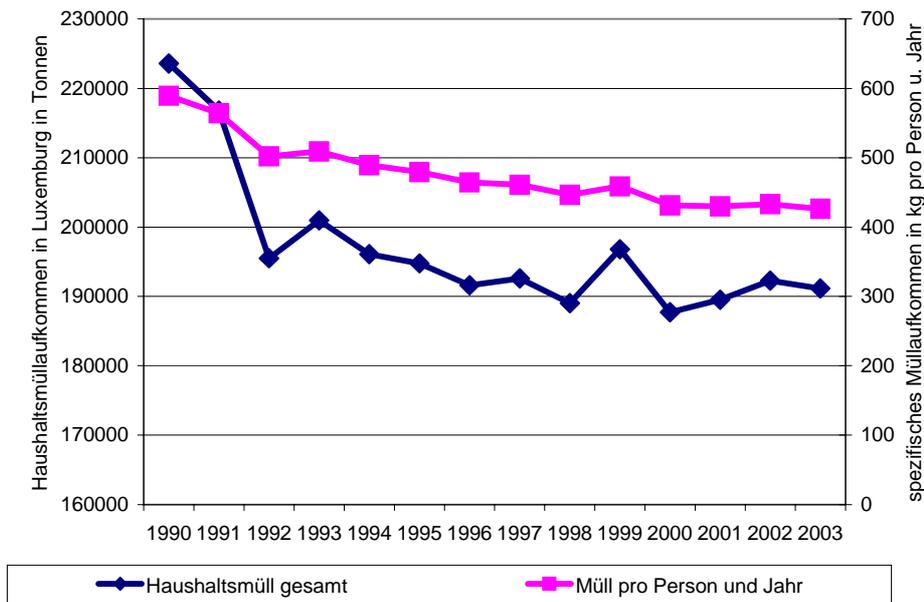
Die getätigten Annahmen und Berechnungen führen in der Folge zu einem Potenzial aus Energiepflanzen für die thermische Verwertung für das Jahr 2010 von 71 GWh und für das Jahr 2020 von 284 GWh.

### **5.2.5 Potenziale im Bereich biogener Müllanteil für die thermische Verwertung**

#### **Theoretisches Potenzial Müllanteil**

Ein weiteres theoretisches energetisches Potenzial, welches dem Bereich fester biogener Energieträger zugerechnet werden kann, ist durch das Luxemburger Müllaufkommen gegeben. Die Erfahrungen aus der bestehenden Müllverbrennung in Luxemburg durch SIDOR weisen einen biogenen Anteil in der zur thermischen Verwertung herangezogenen Müllfraktion von 36,78% aus. Dieser Wert wird in der Folge auch für alle weiteren Berechnungen des biogenen Anteils im luxemburgischen Müll herangezogen, zumal sich der genannte Wert auch mit internationalen Erfahrungen deckt.

Die zur Berechnung des theoretischen Potenzials betrachteten Müllfraktionen sind der Haushaltsmüll und der gewerbliche Müll. Die historische Entwicklung des Haushaltsmüllaufkommens in Luxemburg im Zeitraum von 1990 bis 2003 ist in Abbildung 5-15 dargestellt. Sowohl das absolute als auch das relative Müllaufkommen je Einwohner ist im Betrachtungszeitraum gesunken, wobei in den letzten Jahren das relative Aufkommen konstant ist und das absolute Müllaufkommen durch die wachsende Einwohnerzahl wieder einen leichten Aufwärtstrend zeigt.



Quelle: Administration de l'Environnement

Abbildung 5-15: Entwicklung des Luxemburger Haushaltsmüllaufkommens

Der Status quo der Luxemburger Müllverbrennung im Jahr 2005 lag nach Angaben von Sidor bei 125.000 t verbranntem Müll. Unter Berücksichtigung des oben angeführten biogenen Anteils und einem spezifischen Heizwert von 2,5 kWh/kg Müll ergibt sich ein Heizwert der biogenen Müllfraktion von 115 GWh.

Im Jahr 2001, welches als Referenzjahr für die weitere Berechnung herangezogen wird, da auch die Messung des biogenen Anteils in diesem Jahr durchgeführt wurde und das Müllaufkommen auch für die späteren Jahre repräsentativ ist (siehe auch Abbildung 5-15), konnte ein Müllaufkommen von 189.520 Tonnen registriert werden. Diese Masse beinhaltet das gesamte Haushaltsmüllaufkommen (Restmüll und Sperrmüll) und das gesamte Gewerbemüllaufkommen. Das genannte Müllaufkommen entspricht einem Pro-Kopf Aufkommen von 430 kg pro Jahr. Die Summe der prinzipiell energetisch verwertbaren Abfälle beläuft sich somit auf 189.520 Tonnen. Der mittlere spezifische Energieinhalt des momentan in Luxemburg der thermischen Verwertung zugeführten Mülls bewegt sich nach Auskunft von Sidor in einem Bereich von 10-12 MJ/kg, das sind 2,8-3,3 kWh/kg (unterer Heizwert). Für die weiteren Berechnungen wird angenommen, dass durch einen Einsatz von zusätzlichem Müll auch energetisch minderwertigere Fraktionen in den Verbrennungsprozess gelangen wodurch der mittlere spezifische Energieinhalt des Mülls tendenziell sinkt. Es wird deshalb in einem konservativen Ansatz generell ein spezifischer Energieinhalt von 2,5 kWh/kg (unterer Heizwert) angenommen, welcher sich auch mit internationalen Erfahrungen deckt.

Aus den getätigten Annahmen ergibt sich ein theoretisches energetisches Gesamtpotential aus Müll (erneuerbare plus nicht erneuerbare Fraktionen) von 474 GWh/a bzw. ein erneuerbares Potenzial von 174 GWh/a. Dieser energetische Ertrag steht prinzipiell als theoretisches Potenzial zur Verfügung. Je nach Strategie der Verwertung kann ein Anteil dieser Energie zur Stromerzeugung mittels KWK herangezogen werden. Der Stromanteil ist hierbei von den jeweiligen Verstromungswirkungsgraden abhängig.

### **Technisches Potenzial Müllanteil**

Die Berechnung des theoretischen Potenzials aus der Müllverbrennung in Luxemburg basierte auf einem jährlichen Müllaufkommen (Haushalts- und Gewerbemüll) von ca. 189.520 t. Weiters wurde angenommen, dass der biogene Anteil des Mülls 36,78% und der mittlere Heizwert 2,5 kWh/kg beträgt.

Prinzipiell wird das gesamte Müllaufkommen Luxemburgs der bestehenden Entsorgungsinfrastruktur zugeführt, wobei eine Vorselektion durch Mülltrennung und eine Sortierung vor der allfälligen Deponierung erfolgt. Das heißt, dass aus technischer Sicht eine thermische Entsorgung möglich ist, wobei die zentralen Fragen im Bereich des Standortes entsprechender Verbrennungsanlagen und im Bereich der nachfrageseitigen Wärmeabnahme zu sehen sind. Da diese Restriktionen jedoch im Zusammenhang mit den realisierbaren Potenzialen thematisiert werden, wird das theoretische Potenzial aus der thermischen Müllverwertung für das technische Potenzial übernommen. Die tendenziell geringere Energiedichte des aktuell noch nicht thermisch genutzten Mülls wurde bereits durch die Wahl eines konservativen spezifischen unteren Heizwertes berücksichtigt. Das technische erneuerbare energetische Potenzial aus der thermischen Müllverwertung beträgt somit 174 GWh/a.

### **Realisierbares Potenzial Müllanteil**

Die Abschätzung des technischen Potenzials aus der thermischen Müllverwertung ergab 174 GWh/a. Aus technischer Sicht entspricht dieses energetische Potenzial einer installierten thermischen Brennstoffdauerleistung von 20 MW. Diese Anlagengröße kann in der Praxis in ein bis drei KWK-Anlagen untergebracht werden. Hierbei sind die Brennstofflogistik, die Anlagenstandorte und die damit verknüpfte Wärmeabnahme von zentraler Bedeutung. Da für den Müll als Rohstoff in Luxemburg bereits eine funktionierende Sammellogistik existiert und die Müllverbrennung in Luxemburg als Technologie bereits etabliert ist, könnte prinzipiell das gesamte technische Potenzial im Zeitraum bis 2020 umgesetzt werden. Da jedoch durch die Organisation SIGRE Mülldeponierung auf der SIGRE Deponie stattfindet, und dies voraussichtlich über den Zeitraum bis 2020 hinaus durchgeführt wird, muss bei

einer realistischen Betrachtung der deponierte Müllanteil vom Gesamtmüllaufkommen abgezogen werden. Die von SIGRE pro Jahr deponierte mittlere Abfallmenge beträgt 25.000 Tonnen. Diese Menge wird im Weiteren zur Kalkulation verwendet.

Die Kalkulation ergibt unter Berücksichtigung des SIGRE-Einflusses ein realisierbares energetisches Potenzial aus dem biogenen Müllanteil bis zum Jahr 2020 von 151 GWh/a. Diese Zahl ist jedoch nur unter der Randbedingung gültig, dass es gelingt, in diesem Zeitraum auch die Wärme aus den KWK zu nutzen.

Die SIDOR führt zurzeit Müllverbrennung (biogener Anteil) in einem energetischen Umfang von 115 GWh/a durch. Dies ist ein namhafter Anteil des Gesamtpotenzials, wobei zurzeit nur ein kleiner energetischer Anteil in Form von elektrischem Strom (20,7 GWh im Jahr 2004) auch tatsächlich genutzt wird und der größere Teil der thermischen Energie als Abwärme ungenutzt verloren geht. Der elektrische Wirkungsgrad der Verstromung der SIDOR-Müllverbrennungsanlage liegt nach Angaben von SIDOR bei ca. 17% bis 19%. Die Modernisierung der SIDOR-Verbrennungsanlage ist in Planung und soll bis 2008 abgeschlossen sein. Nach dem aktuellen Planungsstand soll die Kapazität der Anlage auf 150.000 t/a gehoben werden, eine neue Turbine von 14-17 MW<sub>el</sub> installiert werden und die Wärme an ein Fernwärmenetz ausgekoppelt werden. Bei einem Abschluss der Arbeiten bis 2010 kann diese Kapazitätserweiterung auf einen Heizwert aus biogenem Müll von 138 GWh als entsprechendes realisierbares Potenzial ausgewiesen werden.

## **5.2.6 Potenziale im Bereich feste landwirtschaftliche Reststoffe**

### **Theoretisches Potenzial feste landwirtschaftliche Reststoffe**

Zur Abschätzung des Potenzials aus landwirtschaftlichen Reststoffen sind jene landwirtschaftlichen Flächen von Interesse, auf welchen Pflanzen produziert werden, deren Reste sich für eine thermische Verwertung eignen. Die thermische Verwertung fester landwirtschaftlicher Reststoffe ist international hauptsächlich durch die Verbrennung von Stroh in Heizwerken oder KWK-Anlagen charakterisiert.

In Luxemburg wurden im Jahr 2003 auf 28.908 ha Ackerfläche unterschiedliche Getreidesorten angebaut, bei deren Produktion zwangsläufig Stroh anfällt. Der Rohstoff Stroh wird dabei zurzeit in Luxemburg nicht energetisch genutzt. Eine stoffliche Nutzung des Rohstoffs erfolgt im Zuge der Tierhaltung (Schweine- und Rindermast) als Einstreu. Die weiteren in Luxemburg angebauten Feldfrüchte enthalten kein nennenswertes Potenzial an thermisch verwertbaren landwirtschaftlichen Reststoffen, zumal entweder gar keine Reststoffe anfallen (zur Gänze ver-

wertete Futterpflanzen) oder es sich bei Reststoffen um einen Grünanteil handelt, der sich am ehesten als Fermentat im Zuge der Biogasproduktion eignen würde, welche hier jedoch nicht zur Diskussion steht.

Zur Abschätzung eines theoretischen Potenzials wird sämtliches in Luxemburg anfallendes Stroh herangezogen. Dabei wird angenommen, dass ein Strohertrag von 5,5 t TS/ha vorliegt. Der mittlere Energieinhalt pro kg TS wird mit 5,17 kWh angenommen. Diese Annahmen führen zu einem theoretischen Potenzial an thermisch verwertbaren landwirtschaftlichen Reststoffen mit einem Heizwert von 822 GWh.

### **Technisches Potenzial landwirtschaftliche Reststoffe**

Prinzipiell steht einer Nutzung des theoretischen Potenzials aus technischer Sicht nichts im Wege, zumal der Rohstoff Stroh im Zuge der landwirtschaftlichen Produktion auch heute gehandhabt werden muss. Mit einer entsprechenden Sammel- und Transportlogistik kann das gesamte verfügbare Strohpotenzial in Anlagen zur thermischen Nutzung eingebracht werden. Auch die Anlagen zur Strohverbrennung selbst und die angeschlossenen Rauchgasreinigungsanlagen sind am internationalen Markt als Technologie verfügbar. Als Abschlag des zu Grunde liegenden Flächenpotenzials muss jedoch die bereits zur Energiepflanzenproduktion angesetzte Fläche von 20 % der Ackerfläche proportional berücksichtigt werden. Es ergibt sich dabei ein technisches Flächenpotenzial von 23.126 ha, was wiederum ein technisches energetisches Potenzial von 658 GWh repräsentiert.

### **Realisierbares Potenzial landwirtschaftliche Reststoffe**

Das realisierbare Potenzial aus landwirtschaftlichen Reststoffen ist in der Praxis durch umwelttechnische Auflagen in Bezug auf die Rauchgasreinigung, der Akzeptanz in Bezug auf mögliche Anlagenstandorte, der Wärmeabsatzmöglichkeiten im Falle einer KWK-Anlage und nicht zuletzt aufgrund der Konkurrenz zur stofflichen Nutzung der Reststoffe in der Landwirtschaft selbst begrenzt. Die Brennstoffdauerleistung des technischen Potenzials entspricht einem Wert von ca. 94 MW. Dies bedeutet, dass der gesamte Brennstoff nach heutigem Anlagenstandard in einigen großen oder vielen kleineren Anlagen umgesetzt werden könnte.

Da die thermische Nutzung von Stroh in Luxemburg noch nicht etabliert ist, wird angenommen, dass bis zum Jahr 2010 eine erste Pilot- und Demonstrationsanlage kleineren Umfanges mit einer Brennstoffleistung von 2 MW umgesetzt werden kann. Für eine stärkere kurzfristige Diffusion werden vor allem die umwelttechnischen Aspekte als zentrales Hemmnis gesehen. Dies entspricht bei der Annahme von 7000 Vollaststunden einem jährlichen Gesamtheizwert von 14 GWh.

Für das Jahr 2020 wird angenommen, dass eine Gesamtleistung von Anlagen zur thermischen Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe im Umfang von 40 MW installiert werden kann. Das restliche technische Potenzial wird für die stoffliche Nutzung belassen. Bei der Annahme von ebenfalls 7000 Volllaststunden ergibt sich damit für das Jahr 2020 ein Gesamtheizwert von 280 GWh.

### **5.2.7 Potenziale im Bereich Klärschlammnutzung**

Da es sich beim Potenzial im Bereich Klärschlammnutzung nicht um ein Potenzial Erneuerbarer Energie handelt, aber der ausdrückliche Wunsch seitens der luxemburgischen Auftraggeber bestand, diese Thematik mit zu behandeln, werden die entsprechenden Potenziale in der Folge dokumentiert. Die Potenzialwerte werden jedoch nicht gemeinsam mit den Potenzialen Erneuerbarer Energie dargestellt.

#### **Theoretisches Potenzial Klärschlamm**

Die in Luxemburg im Jahr 2004 produzierten Klärschlammengen werden von der Umweltverwaltung im „Jahresbericht der klärschlamm-spezifischen Abfälle“ dokumentiert. Alle weiteren Angaben beziehen sich auf dieses Dokument.

Nach den Angaben der erfassten und ausgewerteten Kläranlagen werden ca. 8.027 t Trockensubstanz im Jahr 2004 an Klärschlamm produziert. Eine spezifische Auswertung bezogen auf die Einwohnerwerte ergibt Werte zwischen 2 und 55 kg TS/EW/a mit einem Mittelwert von ca. 13,5 kg TS/Einwohnerwert/Jahr und einem Medianwert von ca. 10,9 kg TS/Einwohnerwert/Jahr, wenn man die gesamte Eigenproduktion des Klärschlammes von 8.027 t im Jahr 2004 mit einem Anschlusswert von ca. 594.000 Einwohnern ins Verhältnis setzt. Auffällig ist, dass bei den größeren Kläranlagen ein relativ homogenes Bild der spezifischen Klärschlammproduktion mit Werten von ca. 12-20 kg TS/EW/a vorhanden ist.

Die größten Abweichungen nach unten sind bei kleineren Kläranlagen festzustellen. Dies beruht offensichtlich darauf, dass bei diesen Kläranlagen keine Schlamm-trennung vorhanden ist und der Klärschlamm häufig als Nassschlamm entweder ausgebracht oder auf andere Kläranlagen transportiert wird. Eine TS-Gehalt-Bestimmung wird nicht vorgenommen, der TS-Gehalt wurde in vielen Fällen abgeschätzt, so dass sich in der Statistik durch diese Abschätzung ein falsches Bild ergeben kann.

Nachdem die Werte der großen Kläranlagen jedoch plausibel sind, wird der Wert von 8.027 t TS im Jahr 2004 als Basis für die Berechnung des theoretischen Potenzials herangezogen. Der Heizwert von trockenem Klärschlamm entspricht weitestgehend jenem von Braunkohle und hängt von der stofflichen Zusammensetzung ab.

zung des Schlammes ab. Ist der Klärschlamm nicht absolut trocken, so reduziert sich der entsprechende Heizwert, da das enthaltene Wasser vor der eigentlichen Verbrennung verdampft werden muss. Eine positive Energietönung ist dabei ab einem TS-Gehalt von 30% gegeben. Es wird für die Kalkulation im Weiteren von der Verwendung eines absolut trockenen Klärschlammes ausgegangen und ein Heizwert für Klärschlamm von 3 kWh/kg angesetzt. Damit ergibt sich ein theoretisches energetisches Potenzial an Klärschlamm in Luxemburg von 24 GWh/a.

### **Technisches Potenzial Klärschlamm**

Die in der Beschreibung des theoretischen Potenzials genannte jährliche Menge von 8.027 t TS an Klärschlamm fällt in den Kläranlagen Luxemburgs an. Das heißt, dass dieser Stoff in wenigen Anlagen zentral anfällt und auch vollständig für eine weitere Verwertung zur Verfügung steht. Prinzipiell kann der Klärschlamm ohne weitere Behandlung als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Hier liegt somit eine Konkurrenzsituation zu einer stofflichen Nutzung vor. Für die energetische Nutzung kommt in erster Linie die Verbrennung in Frage. International erfolgt die Klärschlammverbrennung in erster Linie in Form von Zuschlag des Klärschlammes zur Kohle in kalorischen Kohlekraftwerken oder beispielsweise als Brennstoffzuschlag bei der Zementherstellung oder allgemein in der Schwerindustrie. Um den Klärschlamm energetisch nutzen zu können, ist eine Trocknung des primären Schlammes erforderlich. Die Trocknung wird dabei meist mehrstufig vollzogen, wobei einer mechanischen Pressung eine weitere Trocknung über z.B. solare Trocknungsanlagen erfolgt.

Wird die stoffliche Konkurrenzsituation außer Acht gelassen, so kann das technische energetische Potenzial an Klärschlamm in der Höhe des theoretischen Potenzials angegeben werden, also mit 24 GWh/a.

### **Realisierbares Potenzial Klärschlamm**

Klärschlamm wird in einem luxemburgischen Zementwerk bereits als Zuschlagsstoff bei der Feuerung eingesetzt. Der Klärschlammstaub substituiert dabei Kohlestaub als Energieträger. Die Möglichkeit der Zufeuerung (in der internationalen Literatur werden hierbei Standardwerte um 5 % der Gesamtbrennstoffmasse genannt) stellt sicherlich die wirtschaftlichste Lösung der Verwendung von Klärschlamm dar. Natürlich ist auch die Verbrennung in eigenen Verbrennungsanlagen möglich, welche ausschließlich mit Klärschlamm befeuert werden.

Aus Gründen des geringen Umfanges des technischen Potenzials an Klärschlamm kann davon ausgegangen werden, dass eine 100%ige Verwertung dieses Rohstoffs bis zum Jahr 2020 prinzipiell möglich ist. Das realisierbare energetische Po-

tenzial aus Klärschlamm im Jahr 2020 beträgt somit 24 GWh. Welcher Anteil davon bis zum Jahr 2010 umgesetzt werden kann, hängt im Wesentlichen von der nationalen Bewertung des Klärschlammes ab. Dieser kann als Wertstoff in Form von Dünger für die Landwirtschaft ebenso gesehen werden wie als zu entsorgender Abfall, welcher Entsorgungskosten verursacht. Die energetische Verwertbarkeit hängt, wie bereits oben angemerkt, vom Grad der Trocknung des Klärschlammes ab, was jedoch wieder mit Trocknungskosten einhergeht. Es wird somit auch in Hinblick auf die bereits etablierte energetische Anwendung von einem realisierbaren energetischen Potenzial aus Klärschlamm im Jahr 2010 in der Höhe von 12 GWh/a ausgegangen.

### **5.2.8 Zusammenfassung Potenziale fester biogener Energieträger**

Die Ergebnisse aus der Potenzialberechnung bezüglich fester biogener Energieträger sind in Tabelle 5-13 zusammengefasst. Untersucht wurden die Bereiche

- Energieholz
- Alt- und Restholz
- Energiepflanzen
- Biogener Müllanteil
- Feste landwirtschaftliche Reststoffe

Der Status quo im Jahr 2005 weist eine Nutzung der genannten Ressourcen im Umfang von 379 GWh aus. Bis zum Jahr 2010 scheint ein Potenzial von insgesamt 610 GWh realisierbar. Eine deutliche Steigerung auf 1.713 GWh wird für das Jahr 2020 für realisierbar eingeschätzt. Das technische Potenzial, welches aus technisch-strukturellen Restriktionen resultiert, wird mit einem Wert von 4.872 GWh berechnet. Die bloße Berücksichtigung physikalisch-struktureller Randbedingungen führt zu einem theoretischen Potenzial von 7.027 GWh.

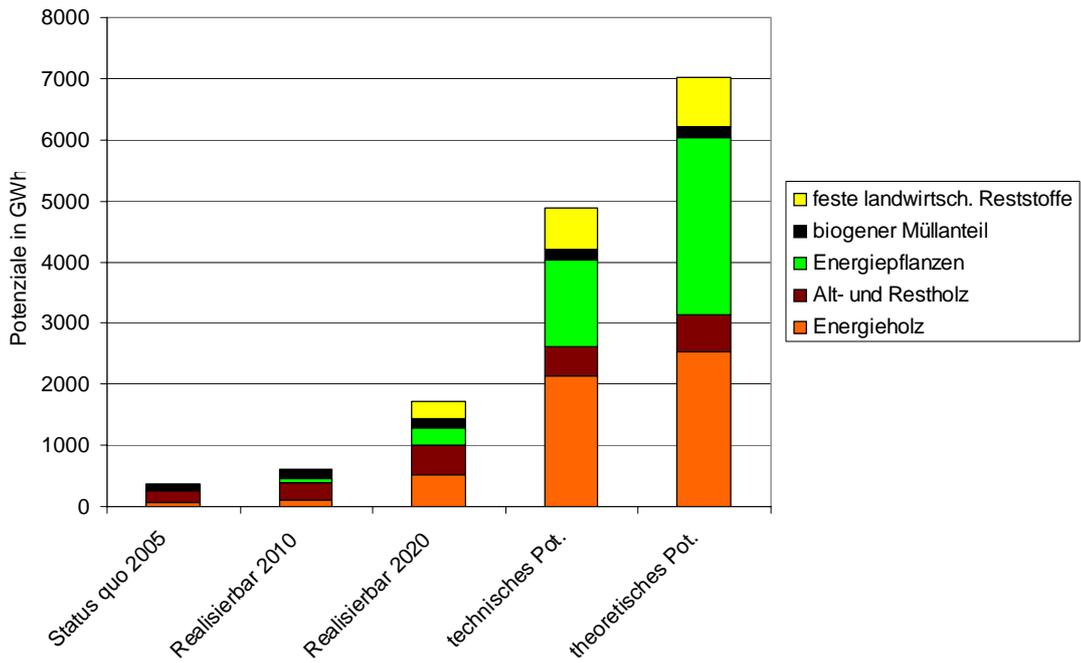
Tabelle 5-13: Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich fester biogener Energieträger

	Potenziale (Angaben in GWh)				
	Status quo 2005	Realisierbar 2010	Realisierbar 2020	technisches Potenzial	theoretisches Potenzial
Energieholz	64	117	517	2.137	2.536
Alt- und Restholz	200	270	481	481	604
Energiepflanzen	0	71	284	1.422	2.891
biogener Müllanteil	115	138	151	174	174
feste landwirtsch. Reststoffe	0	14	280	658	822
Summen	379	610	1.713	4.872	7.027

Quelle: eigene Berechnungen

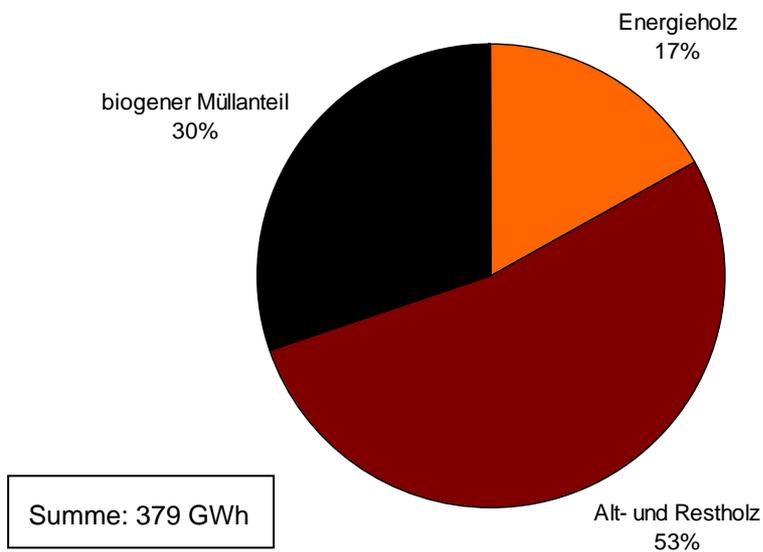
Wie in Abbildung 5-16 ersichtlich wird, unterscheiden sich die Schwerpunkte der aktuellen Nutzung von festen biogenen Energieträgern und die großen Potenziale der Zukunft strukturell voneinander. Stehen im Jahr 2005 vor allem die Nutzung von Alt- u. Restholz sowie die Nutzung des biogenen Müllanteils im Vordergrund, so liegen die großen Zukunftspotenziale vor allem im Bereich des Energieholzes und der Energiepflanzen.

Abbildung 5-17 bis Abbildung 5-19 veranschaulichen die Strukturen des Status quo im Jahr 2005 sowie der Potenziale 2010 und 2020. Zu beobachten ist neben dem Anstieg des aggregierten Potenzials eine zunehmende Diversifikation in Bezug auf die eingesetzten Energieträger.



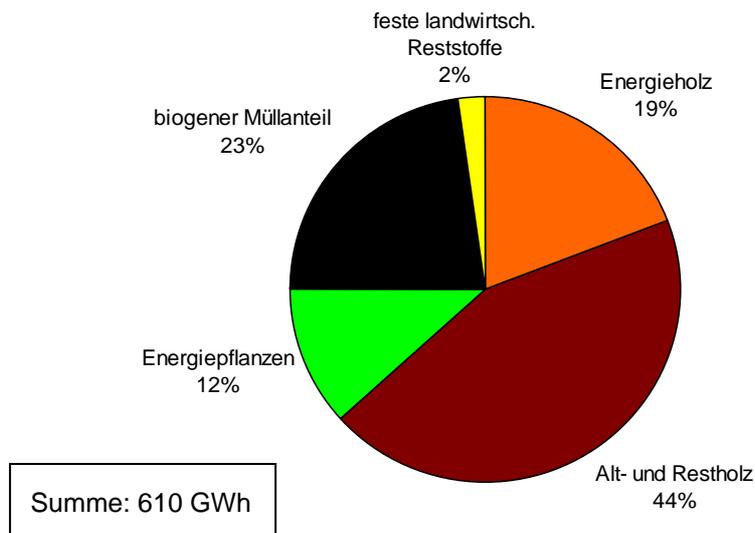
Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-16: Darstellung der Potenzialkategorien nach Rohstofftypen



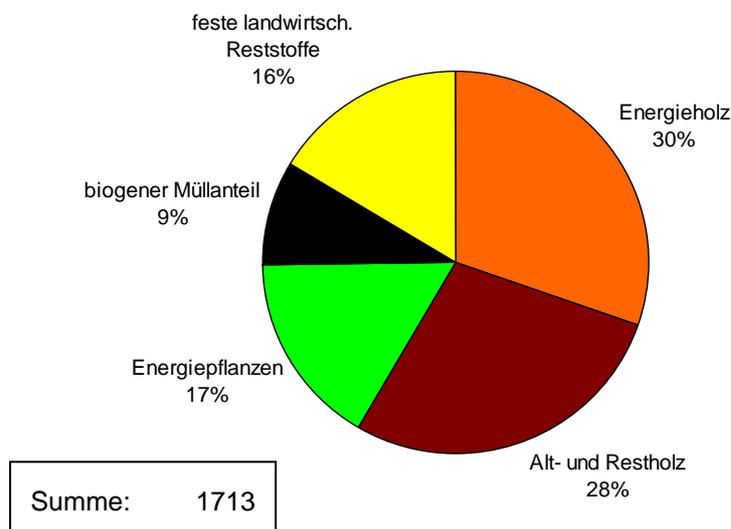
Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-17: Darstellung des Status quo im Jahr 2005



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-18    Abbildung 5.2.18: Darstellung des realisierbaren Potenzials bis zum Jahr 2010



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-19:    Darstellung des realisierbaren Potenzials bis zum Jahr 2020

## **5.2.9 Kosten der Bereitstellung und Nutzung fester biogener Energieträger**

Die Kosten der Bereitstellung fester biogener Energieträger sind ein wesentlicher Einflussfaktor in Bezug auf die heute gegebene und zukünftige Nutzung dieser Ressourcen. Mögliche erzielbare Preise von Rohstoffen bzw. auch die Wirtschaftlichkeit von entsprechenden Projekten sind auch vom Preisniveau der fossilen Energieträger abhängig. Da auch in Zukunft mit einem Anstieg der Preise im fossilen Bereich gerechnet werden muss, begünstigt dieser Trend in Zukunft tendenziell die Wirtschaftlichkeitsaspekte von Anlagen zur Nutzung Erneuerbarer Ressourcen.

Die Preise der Energieträger werden in jedem Fall durch die geografische Größe Luxemburgs und dem freien Handel vom internationalen Markt stark beeinflusst. Jeder Energiekonsument hat die Möglichkeit, entsprechende Energieträger vom benachbarten Ausland zu beziehen. Es wird im Folgenden versucht, Kosten für die oben diskutierten Energieträger anzugeben:

### **Energieholz**

Nach Aussagen des Ingenieurbüros EFOR und der Vereinigung der privaten Waldbesitzer Luxemburgs GSL ist die kleinste Handelseinheit Energieholz bzw. Industrieholz 300 fm. Beim Verkauf des Holzes auf dem Stock ist mit Kosten von 5 Euro pro fm Holz zu rechnen. Hinzu kommen die Kosten der Holzbringung. Die Kosten von Schnittware bewegen sich zwischen 15 Euro und 18 Euro pro fm. Bei geliefertem Industrieholz bzw. Energieholz muss mit Kosten von 25 Euro bis 26 Euro pro Tonne gerechnet werden. Energieholz bzw. Industrieholz werden von der Papier- und Spanplattenindustrie nachgefragt. Der Preis setzt sich aus dem Holzwert von 5 Euro/fm und den Bereitstellungskosten von 20 EUR/fm zusammen. Die Bereitstellungskosten sind dabei wegen höherer Lohnkosten in Luxemburg höher als in den Nachbarländern. Der Holzwert für Schnittholz beträgt 12-18 Euro/fm).

Nach einer Auskunft der Administration des Eaux et Forêts (2006) lag der Durchschnittspreis für Industrieholz im Jahr 2004 bei 21,36 Euro/m<sup>3</sup>. Der Gestehungspreis für Holzhackschnitzel aus Waldfrischholz liegt bei etwa 20-22 Euro/Srm (Kosten für Häckseln, Transport zum Zwischenlager, Transport zum Bunker)

Das Forstrestholz, welches beispielsweise nach einem Kahlschlag vor Ort verbleibt, kann in der Regel nicht abgesetzt werden. Es stünde quasi zu minimalen Rohstoffkosten vor Ort zur Verfügung.

Für die Situation in Österreich können sehr detaillierte Angaben über einzelne Kostenträger der Holzbereitstellung gemacht werden. Jonas et al. (2005) geben einen

detaillierten Überblick, der in Tabelle 5-14 zusammengefasst ist. Die Kostensituation ist vor allem im Bereich der Lohnkosten nur bedingt auf die luxemburger Verhältnisse übertragbar und muss gegebenenfalls entsprechend angepasst werden. Die Erzeugungskosten werden von zahlreichen Faktoren beeinflusst, wie Durchmesser der Hölzer, Hart- oder Weichholz, verwendete Maschinen usw. In diesem Sinne zeigt Tabelle 5-14 ungefähre Kosten für die Brennholzerzeugung. Der für die Berechnung verwendete Lohnansatz beträgt 8 bis 10 Euro pro Stunde ohne Umsatzsteuer. Grundsätzlich ergibt sich ein Kostenvorteil für Hartholz gegenüber Weichholz, da bei relativ gleichen Erzeugungskosten Hartholz auf Grund der höheren Energiedichte einen höheren Erlös erzielt. Zusätzlich zu den in Tabelle 5-14 dokumentierten Kosten müssen noch die Lagerkosten (zweijährige Verzinsung) und der allfällige Transport zum Kunden in Rechnung gestellt werden.

Tabelle 5-14: Kosten der Brennholzerzeugung in Österreich

	<b>Leistung rm/h</b>	<b>Maschinenkosten Euro/rm</b>	<b>Lohnkosten Euro/rm</b>	<b>Gesamtkosten Euro/rm</b>
Schlägern	2,5-3,5	2-1,4	4-2,9	4,3-6
Rücken	6,5	5,8	1,5	7,3
Ablängen	5-7	1-0,7	2-1,4	2,1-3
Spalten, Stoß aufrichten	3-5	5,8-3,5	8-4,8	8,3-13,8
Erzeugung 1-Meter-Scheiter (exkl. Ust)				22-30,1
Stückholz schneiden	3,5-5	0,6-0,4	4,5-3,2	3,6-5,1
Ofenfertiges Holz (exkl. Ust)				25,6-35,2

Quelle: Jonas et al. (2005)

Jonas et al. (2005) geben weiters für die Waldhackgutgewinnung im Zuge einer Erstdurchforstung im Fichtenwald in Österreich Erzeugungskosten von 14,85 Euro/Srm an, wobei in diesen Kosten auch Transportkosten vom Ort der Durchforstung zum Hacker von 30 km enthalten sind.

### **Alt- und Restholz**

Die Kosten des Alt- und Restholzes sind weitestgehend durch die konkurrenzierende stoffliche Nutzung definiert. Im Prinzip handelt es sich um zu entsorgende Abfälle, welche jedoch im Sinne eines Wertstoffes keine negativen Kosten aufweisen müssen. Informationen über aktuelle Preise, welche zurzeit für großteils exportiertes luxemburgisches Alt- und Restholz bezahlt werden stehen nicht zur Verfügung.

### **Energiepflanzen**

Die Kosten für die Anlage von Kurzumtriebsflächen werden hauptsächlich vom

Pflanzverband und vom Pflanzverfahren bestimmt. Bei durchschnittlichen Stecklingspreisen ergeben sich Anlagenkosten von ca. 1500 bis 3000 Euro/ha. Die Umtriebszeiten liegen je nach Pflanzenart zwischen minimal 2 Jahren (Minimum für Weide) und 12 Jahren (Erle) und auch mehr (Robinie). Es kann dabei mit einer jährlichen Ernte von 10 bis 15 t Trockensubstanz pro ha gerechnet werden.

Die Nutzung von Energiepflanzen für die thermische Verwertung ist zurzeit in der Erprobungsphase bzw. Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Die Kosten einer ausgedehnten großtechnischen Anwendung und Produktion in der Praxis sind deshalb noch nicht exakt zu beziffern.

### **Müllverwertung**

Im Bereich der thermischen Müllverwertung ist die Kostenfrage an den Blickwinkel der Betrachtung gebunden. Negative Kosten der Nutzung treten auf, wenn der Müll als zu entsorgender Reststoff des gesellschaftlichen Stoffwechsels gesehen wird und die Kosten einer alternativen Entsorgung (z.B. einer Deponierung) betrachtet werden. Andererseits kann Müll auch als Wertstoff im Sinne eines Energieträgers gesehen werden, wobei die Möglichkeiten der energetischen Verwertung durch z.B. Akzeptanzfragen von Anlagenstandorten beschränkt sind. Die Kosten des Rohstoffes Müll können vor diesem Hintergrund auch als neutral bewertet werden.

### **Kosten der Umwandlungstechnologien fester biogener Energieträger**

Die für Luxemburg relevanten Umwandlungstechnologien fester biogener Energieträger sind Pelletskessel, Hackschnitzelkessel und Scheitholzessel. Mittlere Investitionskosten der Kessel (inklusive allfälliger Brennstofftransportmechanismen und Installation des Kessels, exklusive baulicher Einrichtungen wie Lagerräume) sind in Abhängigkeit von der installierten Leistung in den folgenden Tabelle 5-15 bis Tabelle 5-18 dokumentiert.

Tabelle 5-15: Mittlere Investitionskosten für Pelletskessel mit manueller Brennstoffzufuhr (Tages- bis Wochenspeicher)

Nennleistung in kW	Mittlerer Jahresnutzungsgrad	Mittlere Kosten in Euro
10	0,8	8.400
15	0,8	8.800
20	0,8	8.900
25	0,8	9.600
30	0,8	9.900

Quelle: Kranzl L., Huber C., Resch G. et al. (2004)<sup>28</sup>

Tabelle 5-16: Mittlere Investitionskosten für Pelletskessel mit automatischer Brennstoffzufuhr (automatische Austrag aus Lagerraum)

Nennleistung in kW	Mittlerer Jahresnutzungsgrad	Mittlere Kosten in Euro
10	0,8	10.100
15	0,8	10.500
20	0,8	10.600
25	0,8	11.300
30	0,8	11.600

Quelle: Kranzl L., Huber C., Resch G. et al. (2004)

Tabelle 5-17: Mittlere Investitionskosten für Hackschnitzelfeuerungen mit automatischer Brennstoffzufuhr (automatische Austrag aus Lageraum)

Nennleistung in kW	Mittlerer Jahresnutzungsgrad	Mittlere Kosten in Euro
15	0,78	15.000
25	0,78	15.500
30	0,78	16.000
40	0,78	16.500
50	0,78	17.000
60	0,78	18.000
80	0,78	19.500
100	0,78	22.000

Quelle: Kranzl L., Huber C., Resch G. et al. (2004)

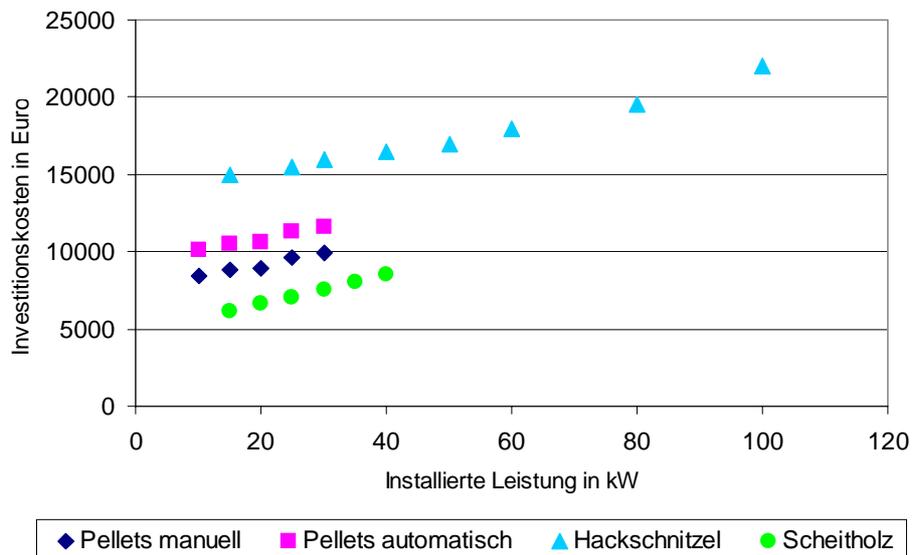
<sup>28</sup> Kranzl L., Huber C., Resch G. et al. (2004), "Technology Evaluation. Internal Report of Work Phase 2 of the project INVERT", a research project within the Altener Program of the European Commission, DG TREN – Vienna 2004;

Tabelle 5-18: Mittlere Investitionskosten für Scheitholzfeuerungen

Nennleistung in kW	Mittlerer Jahresnutzungsgrad	Mittlere Kosten in Euro
15	0,75	6.154
20	0,75	6.621
25	0,75	7.088
30	0,75	7.554
35	0,75	8.021
40	0,75	8.488

Quelle: Kranzl L., Huber C., Resch G. et al. (2004)

Abbildung 5-20 fasst die Investitionskosten der unterschiedlichen Technologien übersichtlich zusammen. In der Grafik werden auch die typischen Leistungsbereiche deutlich, welche die genannten Technologien abdecken.



Quelle: Kranzl L., Huber C., Resch G. et al. (2004)

Abbildung 5-20: Mittlere Investitionskosten für Biomassekessel

Die im Diagramm nicht dargestellten höheren Leistungsbereiche ab ca. 100 kW stellen den Bereich der Biomasse-Mikronetze und der Nah- bzw. Fernwärmanlagen dar. Die Investitionskosten der mittleren und großen Anlagen werden von Kranzl (2002) anhand von empirischen Daten geschätzt. Die Kostenfunktionen in Abhängigkeit von der installierten Kesselleistung  $P_K$  und der Netzlänge  $l$  sind in Tabelle 5-19 dargestellt. Die Investitionskosten für die mittlere Anlage mittlerer Größenordnung ( $P_K = 244$  kW,  $l = 100$  m) betragen somit 57.820 Euro und jene der mittleren Großanlage ( $P_K = 5163$  kW,  $l = 2500$  m) 3.530.760 Euro.

Tabelle 5-19: Kostenfunktionen von mittleren und großen Biomasse-Anlagen

	Mikro-Netz	Nahwärme	Fernwärme
Netzlänge [m]	120	geringe Dichte: 2.000 mittlere Dichte: 1.800 hohe Dichte: 1.500	15.000
beheizte Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	1.000	15.000	300.000
Anschlussleistung/Kesselleistung (Biomasse) $P_A/P_K$	1	1,2	2,5
Spitzenlastkessel Öl	nein	Ja	ja
Art der versorgten Objekte	50 % EFH 50% MFH/öff. Geb.	ländlich1: 50% EFH 50% MFH/öff. Geb. ländlich2: 33% EFH 67% MFH/öff. Geb. Kleinstadt: 25% EFH 75% MFH/öff. Geb.	10% EFH 90% MFH/öff. Geb.
Investitionskosten <sup>a</sup> [Euro]	$13.400+55 \cdot P_K+310 \cdot I$	$71.000+520 \cdot P_K+310 \cdot I$	

<sup>a</sup> die Kosten umfassen Heizzentrale, Netz, Bauliche Maßnahmen. Nicht inkludiert sind Elemente, die bei Referenzsystemen identisch sind, wie z.B. die Wärmeverteilssysteme der angeschlossenen Objekte.

Quelle: Kranzl (2002)

### 5.3 Biomassenutzung - flüssige biogene Energieträger

Das Potenzial aus flüssigen biogenen Energieträgern setzt sich aus den Rohstoffbereichen Energiepflanzen und Altspeiseöle und -fette zusammen. Die zugehörigen Endenergieträger sind Biodiesel (RME), Bioethanol und Altspeiseölmethylester (AME).

#### 5.3.1 Energiepflanzen

Im Bereich Energiepflanzen steht die Produktion von Bioethanol und Biodiesel zur Diskussion. Welche Flächenpotenziale diesen beiden Produktionslinien jeweils zugeordnet werden, ist eine Frage der Strategie. Es zeichnet sich international jedoch ab, dass in Zukunft die Bedeutung von Bioethanol im Vergleich zu RME steigt. Zur Ermittlung der Potenziale wird im Weiteren nach Rücksprache mit dem Landwirtschaftsministerium Luxemburgs, mit ASTA und SER ein Anbaumix zur Produktion von flüssigen biogenen Energieträgern von Rapssaat und Weizen zu je 50% gewählt. Ein Anbau von Zuckerrüben muss wegen nicht entsprechender Bodenverhältnisse in Luxemburg ausgeschlossen werden. Die angebaute Rapssaat wird in der Folge zu RME und der angebaute Weizen zu Bioethanol weiterverarbeitet.

### **Theoretisches Potenzial Energiepflanzen**

Bei der Kalkulation des theoretischen Potenzials aus Energiepflanzen werden zunächst keine stofflichen Konkurrenzen berücksichtigt. Als Ausgangspunkt zur Ermittlung des Flächenpotenzials dient die landwirtschaftliche Nutzfläche Luxemburgs im Ausmaß von 128.073 ha im Jahr 2004. Somit werden nicht nur die bestehenden Ackerflächen, sondern auch die Wiesen und Weiden zur Produktion von Energiepflanzen eingesetzt. Im Sinne der Summierbarkeit auch von theoretischen Potenzialen wird diese Fläche jeweils zu einem Drittel der Produktion von festen, flüssigen und gasförmigen gewidmet. Die Fläche für den Anbau von Energiepflanzen für die Produktion von flüssigen biogenen Energieträgern beträgt somit 42.691 ha.

Für einen Anbau in Mitteleuropa bieten sich diesbezüglich typischer Weise Raps, Zuckerrüben und stärkehaltige Feldfrüchte wie beispielsweise Weizen an. Typische Erträge, welche zur weiteren Kalkulation für Luxemburg herangezogen werden, stammen aus den bereits genannten Luxemburger Quellen Landwirtschaftsministerium, ASTA und SER:

- Bei einem mittleren jährlichen Ertragsniveau von 3,0 t/ha Rapssaat liegt der Ölertrag bei rund 1,20 t/ha bzw. die RME-Ausbeute bei 1,15 t/ha.
- Bei einem jährlichen Weizenertrag von 6,75 t/ha lassen sich rund 2,34 t/ha Ethanol erzeugen.

Die genannten Werte für Luxemburg sind teilweise höher, als in entsprechenden Publikationen angeführt (Neubarth und Kaltschmitt (2000) und Gangl (2004)), die höheren Ertragswerte können dabei jeweils auf ertragreichere Böden, bessere klimatische Wachstumsbedingungen oder intensivere Bewirtschaftung zurückzuführen sein.

Für die Kalkulation des theoretischen Potenzials wird weiters angenommen, dass Rapssaat und Weizen jeweils auf 50% der zur Verfügung stehenden Gesamtfläche angebaut werden. Die bei der Berechnung zu Grunde gelegten spezifischen Heizwerte betragen für RME 37,4 MJ/kg und für Bioethanol 26,8 MJ/kg.

Das Ergebnis der Kalkulation zeigt, dass unter den oben angeführten Randbedingungen in Luxemburg das theoretische energetische Potenzial (Heizwert) von 256 GWh in Form von RME aus Rapssaat und 372 GWh in Form von Ethanol aus Weizen vorhanden ist. In Summe sind dies 628 GWh Biotreibstoffe.

### **Technisches Potenzial Energiepflanzen**

Wie schon bei der Behandlung der festen biogenen Energieträger aus Energie-

pflanzen ist auch im Bereich der flüssigen biogenen Energieträger die zentrale Frage durch die tatsächlich für die Energiepflanzenproduktion einsetzbare Fläche gegeben. In der Folge wird die zum Anbau von Energiepflanzen verfügbare Fläche auf die Ackerfläche im Jahr 2004 beschränkt um heute etablierte Landschafts- und Wirtschaftsstrukturen mit zu berücksichtigen. Weiters wird eine Naturschutzfläche im Umfang von 2300 ha berücksichtigt. Die zum Anbau von Energiepflanzen zur Produktion von flüssigen biogenen Energieträgern verfügbare Fläche beläuft sich unter obigen Annahmen auf 20.235 ha.

Wie schon bei der Kalkulation des theoretischen Potenzials, wird auf je 50% dieser Fläche ein Anbau von Rapssaat und Weizen vorgesehen. Die Ergebnisse weisen einen energetischen Ertrag von 121 GWh RME und 176 GWh Ethanol aus Weizen aus, zusammen also 298 GWh flüssige biogene Energieträger.

### **Technisches Entwicklungspotenzial flüssiger biogene Energieträger**

Die Herstellung von Biotreibstoffen ist vom Beginn der technologischen Entwicklung an auf die Substitution fossiler Treibstoffe ausgerichtet. Aus technischer Sicht soll die historisch gewachsene Verkehrsinfrastruktur möglichst ohne Veränderung weiter benutzt werden können. Die Infrastruktur besteht dabei aus dem Straßennetz, dem Fuhrpark an Kraftfahrzeugen und nicht zuletzt auch dem Treibstoffverteilungssystem.

International ist die Substitution von Benzin durch Bioethanol vor allem in Brasilien weit fortgeschritten, aber auch in den USA werden deutliche Anstrengungen unternommen, große Anteile von fossilen Treibstoffen zu substituieren.

Bezüglich der zukünftigen technologischen Trends müssen Produktionstechnologien und Anwendungstechnologien unterschieden werden. Während die Anwendungstechnologien keinen großen zusätzlichen Entwicklungsaufwand bereiten, liegen in der Weiterentwicklung aber auch im Bereich der Innovation bei den Produktionstechnologien noch große Potenziale.

Im Bereich der Anwendungstechnologien, vor allem der Kraftfahrzeuge selbst, können geringere Prozentsätze (etwa bis 5%) an Bioethanol oder Biodiesel den jeweiligen fossilen Kraftstoff auch ohne technologische Änderungen beigemischt werden. Bei größeren Anteilen von Biokraftstoffen sind geringfügige technische Maßnahmen nötig, welche jedoch von der Kraftfahrzeugindustrie bereits beherrscht werden. Die deutsche Automobilindustrie ist beispielsweise weltweit füh-

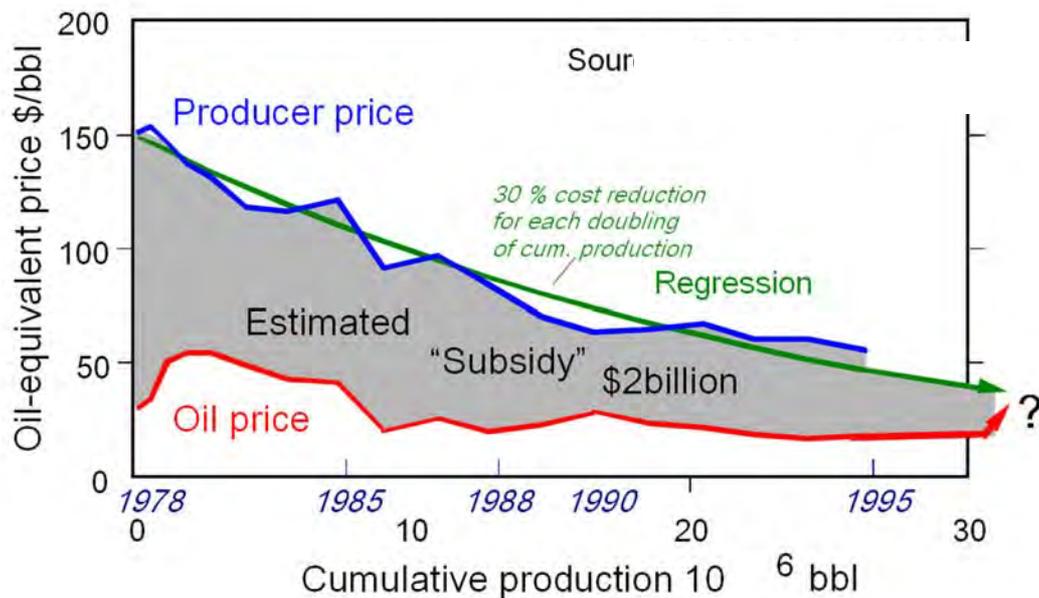
rend bei Bio-Ethanol-Fahrzeugen<sup>29</sup>. So sind die deutschen Fahrzeughersteller schon seit langem in Brasilien – dem größten Ethanolmarkt der Welt – Marktführer bei den so genannten Flex-Fuel-Fahrzeugen: der derzeitige Marktanteil liegt bei 66 Prozent. Flex-Fuel-Fahrzeuge können mit aus Zuckerrohr, Getreide oder Zuckerrüben gewonnenem Alkohol oder Benzin betrieben werden. Im Mai 2005 wurden in Brasilien erstmals mehr Flex-Fuel-Automobile (49,5 Prozent) verkauft als Benziner (43,3 Prozent).

Im Bereich der Produktionstechnologien werden einerseits neue Prozesse beforscht, andererseits werden weniger hochwertige Ausgangsmaterialien für die Alkoholgewinnung in Betracht gezogen, auch um die spezifischen Treibstoffpreise aus Erneuerbaren Energieträgern zu senken. Rentabel könnte in diesem Zusammenhang die Herstellung von Biotreibstoffen sein, wenn nicht Hefen, sondern Bakterien bei der Umwandlung aktiv werden. Daran forscht beispielsweise der süddeutsche Konzern Südzucker. Ließe sich überdies statt Getreide beispielsweise Stroh oder gar Hausmüll vergären, würde der Preis für Bio-Ethanol weiter sinken. In den USA und Brasilien ist die Entwicklung dank Fördergeldern in dreistelliger Millionenhöhe schon weiter: Der Konzern "Iogen" in Montreal stellt Ethanol aus Stroh her. Aus jeder Tonne Stroh entstehen rund 340 Liter Alkohol. In den USA und Brasilien wird das Benzin bis zu einem Viertel mit solchen Bio-Treibstoffen angereichert – jeder Motor kann dort problemlos mit dem Treibstoffmix laufen.

International haben sich nach Analysen von Nakicenovic und Riahi (2002) Lerneffekte von 30 % pro Marktverdopplung eingestellt, wobei die empirischen Daten hierfür den brasilianischen Markt repräsentieren. Die entsprechende Lernkurve ist in Abbildung 5-21 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die sukzessive Annäherung der spezifischen Preise von Bioethanol und Erdöl. Die Fläche zwischen den beiden Preisverläufen ist in der Folge als nötige Subvention zu sehen, welche für die Markteinführung von Bioethanol erforderlich war.

---

<sup>29</sup> Prof. Dr. Bernd Gottschalk, Präsident des Verbandes der Automobilindustrie (VDA)



Quelle: Nakicenovic und Riahi (2002)

Abbildung 5-21: Lernkurve der Ethanolproduktion in Brasilien

Der luxemburger Markt hat auf die beschriebenen internationalen Entwicklungen keinen Einfluss. Aus technologischer Sicht zeigt sich überdies ein Trend zu immer größeren Produktionseinheiten von Biotreibstoffen da sich bei größeren Einheiten eine deutliche Kostendegression einstellt. Luxemburg muss sich aus diesem Blickwinkel zur Umsetzung von Potenzialen internationale Partner suchen. In diesem Sinne kann Luxemburg Rohstoffe zur Biotreibstoffproduktion exportieren oder auch einen eigenen Anlagenstandort anstreben, wobei dann Rohstoffe importiert werden müssen.

### Realisierbares Potenzial Energiepflanzen

Gemäß einem Schätzwert wurden im Jahr 2005 in Luxemburg in Summe auf 1000 ha Ackerfläche Rapssaat produziert. Die Rapssaat wird anschließend in Frankreich zu RME verarbeitet, wird wieder nach Luxemburg importiert und kommt schlussendlich in der städtischen Busflotte zum Einsatz. Der erzielte RME-Ertrag entspricht dabei 12 GWh.

Für die Abschätzung des Potenzials für das Jahr 2020 wird angenommen, dass bis zu diesem Zeitpunkt auf 20% der, für den Anbau von Energiepflanzen zur Produktion von flüssigen biogenen Energieträgern vorgesehenen Ackerfläche, eine entsprechende Nutzung erfolgt. Jener Pflanzenmix, der auch schon bei der Kalkulation der theoretischen und technischen Potenziale angenommen wurde, wird beibehalten.

Die Ergebnisse für das Jahr 2020 zeigen einen Ertrag an RME von 24 GWh/a und einen Ertrag von Bioethanol aus Weizen von 35 GWh/a. In Summe ist dies ein realisierbares energetisches Potenzial für flüssige biogene Energieträger im Jahr 2020 von 60 GWh/a.

Für das Jahr 2010 kann mit Bezug auf den Status quo noch eine weitere Erhöhung der RME-Produktion erwartet werden (Wert für 2006 beläuft sich voraussichtlich bereits auf 1300 ha). Zur Kalkulation des Potenzials für 2010 wird deshalb eine Berechnungsfläche für Raps von 1500 ha angenommen. Zusätzlich wird ein Versuch in Richtung Ethanolproduktion auf 500 ha gestartet, wobei diese Fläche mit Weizen bestellt wird. Die getroffenen Annahmen führen zu einem energetischen Gesamtertrag von 27 GWh/a an flüssigen biogenen Energieträgern.

### **5.3.2 Altspeiseölmethylester (AME)**

#### **Theoretisches Potenzial Altspeiseölmethylester (AME)**

Als weiteres theoretisches Potenzial kann die energetische Verwertung der in Luxemburg anfallenden Altspeiseöle und –fette angeführt werden. Nach einer Auskunft von SuperDrecksKescht konnte im Jahr 2005 eine Menge von 316,36 t (das sind 0,7 kg/Einwohner und Jahr) Altspeiseöle und –fette gesammelt werden. Dies entspricht einem Energieinhalt von ca. 2,8 GWh/a. In Hinblick auf internationale Erfahrungen bei der Sammlung von Altspeiseölen und –fetten im Haushaltsbereich kann dieses Potenzial in Luxemburg auf 600 t/a geschätzt werden.

Die in Gewerbe und Industrie anfallenden Mengen an Altspeiseölen und –fetten sind weniger exakt dokumentiert. Einer Erhebung der Umweltverwaltung (1999) zu Folge wird das Potenzial an Altspeiseölen und –fetten aus der Gastronomie auf eine Menge von 1900-4300 t/a eingeschätzt.

Eine optionale Herangehensweise an die Berechnung des Potenzials bringt die Hochrechnung mittels vergleichbaren Kennzahlen aus dem internationalen Raum. Das Gesamtpotenzial an Altspeiseölen und –fetten beispielsweise in Österreich wird von Neubarth und Kaltschmitt (2000) auf einen Einwohner umgerechnet mit ca. 6,3 kg/(Einwohner\*a) eingeschätzt, wobei hier das Potenzial von privaten und gewerblichen Potenzialen aggregiert wurde. Die Hochrechnung dieses spezifischen Wertes auf Luxemburg ergibt ein Potenzial von ca. 2900 Tonnen pro Jahr. Diese Zahl kann anhand der zuvor genannten absoluten Angaben gut verifiziert werden. Im Weiteren wird für das theoretische Potenzial aus Altspeiseöl ein Wert von 3700 Tonnen übernommen, welcher aus 600 Tonnen aus dem Haushaltsbereich und dem Mittelwert aus dem Gastronomiebereich von 3100 Tonnen resultiert.

Die Ausbeute von Altspeiseölmethylester (AME) am Altspeiseöl und –fett beträgt typischer Weise 85%, wobei AME einen Heizwert von 37,2 MJ/kg aufweist. Daraus ergibt sich für Luxemburg ein theoretisches energetisches Potenzial aus Altspeiseöl und –fett von 32 GWh/a.

### **Technisches Potenzial Altspeiseölmethylester (AME)**

Das theoretische Potenzial im Bereich AME wurde auf Basis 3700 t Altspeiseöle und –fette pro Jahr in Luxemburg mit 32 GWh berechnet. Es wurde dabei angenommen, dass das gesamte Aufkommen an Altspeiseölen und –fetten einer Sammelinfrastruktur zugeführt und entsprechend verwertet wird. In der technischen Praxis sind jedoch nur konzentriert anfallende Mengen dieser Rohstoffe sammelbar, wie dies beispielsweise bei Frittierfetten der Fall ist. Geringfügige Mengen, welche räumlich und zeitlich verteilt anfallen, werden auch weiterhin mit den privaten und gewerblichen Abwässern entsorgt werden.

Das von Superdreckskescht erfasste Potenzial kann hierbei zur Gänze einer Sammellogistik zugeführt werden (600 t/a). Das in der Erhebung der Umweltverwaltung erfasste Potenzial aus der Gastronomie wird in einem Ausmaß von 1250-2750 t/a (im Mittel also 2000 t/a) einer Sammellogistik zugeführt. Das heißt, dass bereits ca. 2600 t/a einer Sammellogistik zugeführt werden, was in Bezug auf das theoretische Potenzial einem Anteil von ca. 70% entspricht. Es wird zur Berechnung des technischen Potenzials angenommen, dass dieser Prozentsatz mittels Informationskampagnen und weiteren Bemühungen die Sammelmoral auf 85% gesteigert werden kann, was einer Menge von 3145 t/a entspricht. Der Heizwert dieses technischen Potenzials beträgt 28 GWh.

### **Realisierbares Potenzial Altspeiseölmethylester (AME)**

Für den Zeitraum bis 2010 kann aus der Sicht des realisierbaren Potenzials mittels ambitionierten Sammelstrategien die Hälfte des technischen Potenzials erschlossen werden, da bereits eine etablierte Sammelinfrastruktur existiert und entsprechende Kooperationen zur Umesterung des Rohstoffes vorhanden sind. Dies entspricht einem energetischen Potenzial von 14 GWh/a. Im Zeitraum von 2010 bis 2020 kann das restliche realisierbare Potenzial bis zum Wert des technischen Potentials umgesetzt werden, wobei bis zum Jahr 2020 das energetische Gesamtpotenzial von 28 GWh/a realisiert werden kann.

### **5.3.3 Zusammenfassung der Potenziale für flüssige biogene Energieträger**

Die Potenziale für flüssige biogene Energieträger in Luxemburg sind in Tabelle

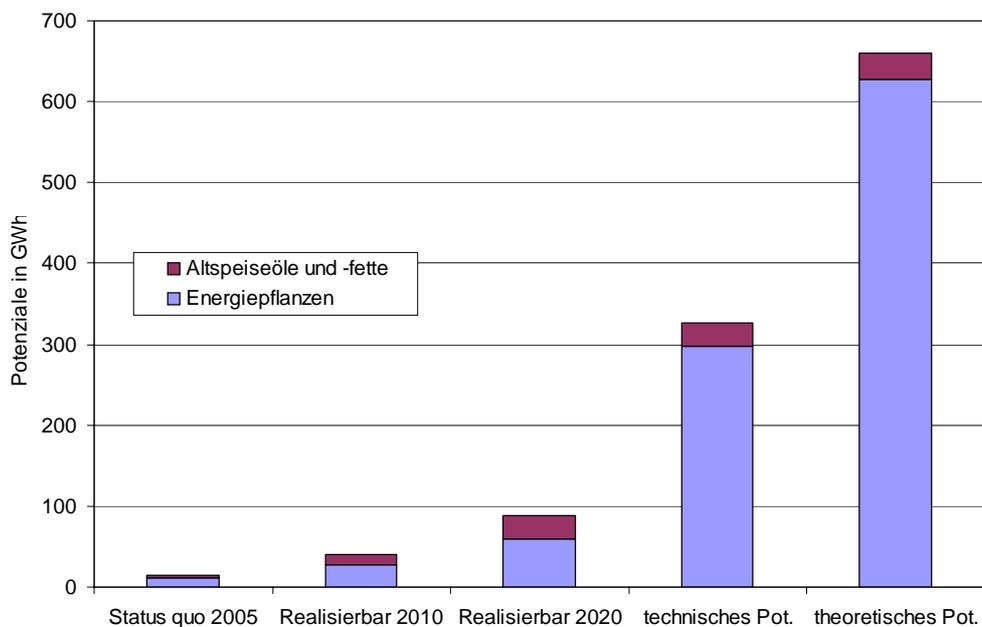
5-20 und in Abbildung 5-22 dokumentiert bzw. dargestellt. Das jeweilige Gesamtpotenzial der einzelnen Potenzialkategorien setzt sich dabei aus einem Beitrag von Energiepflanzen (im Konkreten Rapssaat und Weizen) sowie einem Beitrag von Altspeseölen und -fetten zusammen. Es wird dabei deutlich, dass das große Zukunftspotenzial im Bereich der Energiepflanzen liegt.

Wie schon beim Status quo der Fall, muss zur Nutzung von Luxemburger Ressourcen die Verarbeitung der Rohstoffe nicht unbedingt im Land selbst geschehen. Die Errichtung z.B. einer großen Anlage zur Bioethanolherstellung kann in Kooperation mit einem Nachbarland auf dem Staatsgebiet eines Nachbarlandes unter gemeinsamer Optimierung der Rohstofflogistik erfolgen.

Tabelle 5-20: Zusammenfassung der Potenziale für flüssige biogene Energieträger

	Potenziale (alle Angaben in GWh)				
	Status quo 2005	Realisierbar 2010	Realisierbar 2020	technisches Pot.	theoretisches Pot.
Rapssaat	12	18	24	121	256
Weizen	0	9	35	176	372
Summe Energiepflanzen	12	27	60	298	628
Altspeseöle und -fette	3	14	28	28	32
Summe	15	41	88	326	660

Quelle: Eigene Berechnungen



Quelle: Eigene Berechnungen

#### Abbildung 5-22: Potenziale für flüssige biogene Energieträger in Luxemburg

Die Betrachtung der Potenzialwerte bis 2020 zeigt ein deutliches Steigerungspotenzial bis zum Jahr 2020, sowohl im Bereich AME, als auch im Bereich der Energiepflanzen. Kann das Potenzial im Bereich AME bis zum Jahr 2020 bis zum Wert des technischen Potenzials erschlossen werden, so ist dies im Bereich der Energiepflanzen bei weitem nicht der Fall. Ein weiterer Ausbau der Produktion von flüssigen biogenen Energieträgern ist dabei vor allem vom Einsatz zusätzlicher Flächen zur Produktion von Energiepflanzen abhängig.

### 5.3.4 Kosten der flüssigen biogenen Energieträger

#### Energiepflanzen

Neubarth und Kaltschmitt (2000) unterziehen den Sektor der flüssigen biogenen Energieträger einer ökonomischen Analyse. Die angegebenen Werte verstehen sich als Richtwerte, da die Variation einzelner Parameter entsprechende Auswirkungen auf die Kosten mit sich bringt.

Rapsmethylester: Die Preise für Industrieraps unterliegen starken jährlichen Schwankungen, wobei diese Preise nicht unbedingt mit den Produktionskosten korrelieren. Die Produktionskosten lagen in Österreich in den vergangenen Jahren im Mittel bei ca. 203 Euro/t Rapssaat. Ein aktueller Wert für Luxemburg im Jahr 2005 liegt bei ca. 190 Euro/t. Die Differenz zwischen Produktionskosten und Marktpreis wird von Seiten der EU durch Subventionen ausgeglichen. Neben den Produktionskosten fallen weiters noch Transportkosten zur Ölmühle, den Umschlag und die Lagerung in der Höhe von ca. 73 Euro/t Rapssaat an. Die durchschnittlichen Herstellungskosten von RME ohne Rohstoffkosten und allfällige Schroterlöse werden je nach Anlagengröße mit Kosten von 55 Euro/t RME bis 305 Euro/t RME beziffert.

Für eine Anlage mit 15.000 t RME Jahreskapazität belaufen sich die Gesamt-Herstellungskosten auf 0,57 Euro/Liter RME. Werden auch noch Transport- und Lagerkosten in Hinblick auf den Endkundenverkauf berücksichtigt, so stellen sich Gesamt-Gestehungskosten von 0,64 Euro/Liter RME ein. Die energiebezogenen Gesamt-Gestehungskosten betragen 19,6 Euro/GJ.

Bioethanol: Die Herstellungskosten von Zuckerrüben betragen ca. 44 Euro/t frei Fabrik, wobei diese Kosten, wie bereits bei der Rapssaat angemerkt, nicht auf die Marktpreise zurückschließen lassen. Die Herstellungskosten von Ethanol in einer Anlage mit einer Jahreskapazität von 100.000 t Ethanol betragen 320 Euro/t, wobei Erlöse aus dem Verkauf von Zuckerrübenschnitzel bereits berücksichtigt wurden.

Insgesamt sind Gesamt-Herstellungskosten in der Höhe von 887 Euro/t Ethanol oder 0,70 Euro/Liter zu erwarten. Unter Berücksichtigung der Kosten für Umschlag, Transport und Lagerung für den Endkundenverkauf betragen die Gesamt-Gestehungskosten ca. 0,77 Euro/Liter oder 28,9 Euro/GJ

Die Rohstoffkosten von Winterweizen betragen ca. 203 Euro/t. Die Verarbeitungskosten in einer Anlage mit einer Jahreskapazität von 100.000 werden mit 262 Euro/t Ethanol berechnet, womit sich Gesamtkosten für die Tonne Ethanol ab Werk von 603 Euro einstellen. Die Gesamt-Gestehungskosten inklusive Umschlag, Transport und Lagerung für den Endkundenverkauf betragen 0,76 Euro/Liter oder 28,3 Euro/GJ.

### **AME**

Zur Abschätzung der Kosten von AME muss die Frage beantwortet werden, ob es sich beim Rohstoff Altspeiseöl und -fett um einen zu entsorgenden Abfall handelt, bei dessen Verwertung Schäden an der Umwelt vermieden werden oder ob es sich um einen Wertstoff handelt, welcher einen Marktpreis besitzt. Weitere Kosten sind im Bereich der Sammel- und Transportinfrastruktur zu sehen, sowie im Bereich der Umesterung. Die einzelnen Kostenstellen können aufgrund mangelnder Daten zurzeit nicht beziffert werden.

## **5.4 Biomassenutzung - gasförmige biogene Energieträger**

Das Potenzial gasförmiger Biomasse in Luxemburg setzt sich aus den Teilbereichen

- Gülle
- Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege
- Bioabfälle
- Schlachtabfälle
- Energiepflanzen
- Klärgas
- Deponiegas

zusammen. Diese 7 stofflichen Bereiche werden im Folgenden jeweils in Hinblick auf die unterschiedlichen Potenzialkategorien theoretische Potenziale, technische Potenziale und realisierbare Potenziale untersucht. Randbedingungen und Annahmen, welche im Zuge der Berechnungen berücksichtigt bzw. angenommen wurden, werden an den inhaltlich relevanten Stellen dokumentiert. Im Hinblick auf

die Verwertungstechnologie können die ersten 5 Rohstoffkategorien auch als „Biogas“ zusammengefasst werden, womit der Sektor gasförmige biogene Energieträger in die Bereiche

- Biogas
- Klärgas
- Deponiegas

untergliedert werden kann. Im Weiteren erfolgen in diesem Kapitel die Dokumentation von einigen wichtigen Berechnungsgrundlagen und eine Darstellung des technologischen Entwicklungspotenzials von Biogas sowie die Dokumentation der aktuellen Erkenntnisse im Bereich der Biogas-Direkteinspeisung in das Gasnetz. Die zuletzt genannten Aspekte werden den Ausarbeitungen der entsprechenden Potenzialkapitel vorangestellt.

#### **5.4.1 Biogas allgemein**

Die Biogaserzeugung weist in Luxemburg ein starkes Wachstum auf. Von 1998 bis Ende 2005 sind laut Biogasvereinigung in Luxemburg 20 Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 3,3 MW in Betrieb genommen worden. Im Jahr 2005 wurden mit diesen Anlagen 22,7 GWh elektrische Energie produziert. Dies ergibt bei einem angenommenen Verstromungswirkungsgrad von 35% einen Gesamt-Biogasertrag der Anlagen (vor der Verstromung) von 64,9 GWh. Soweit zu einer groben top-down Betrachtung.

Als eine Grundlage zur Bewertung von Potenzialen sind typische Biogaserträge von unterschiedlichen Substraten in Tabelle 5-21 dokumentiert. Der Biogasertrag versteht sich dabei als mittlerer Ertrag, gemessen in Normkubikmeter, die Maßeinheit des Substrats ist die Tonne Trockensubstanz (also nicht die Tonne Substrat sondern deren trockener Feststoffgehalt).

Tabelle 5-21: Biogaserträge für verschiedene Substrate in m<sup>3</sup>/t organische Trockensubstanz (TS)

Substrat	Biogasertrag in m <sup>3</sup> /t TS
Rindergülle	250
Schweinegülle	480
Hühnermist	450
Klärschlamm	400
Bioabfall	170-220
Altfett	1040
Grasschnitt	550
Panseninhalt	420-520
Roggenstroh	300-350
Kartoffelkraut	560
Zuckerrübenblatt	550
Mais	550
Weizen	550
Energiegras	550
Speisereste	80-120
Brauereiabwasser	500
Abwasser Zuckerindustrie	650

TS: Trockensubstanz

Quellen: Edelmann et al (1993), Jungmeier und Padinger (1995), Krieg (1998);

#### 5.4.2 Das technische Entwicklungspotenzial von Biogas und die Biogas-Direkteinspeisung

Nach Haas et al. (2001) war der wirkungsgradmäßige Ausbau der Technologie bald nach der Einführung der großtechnischen Biogasproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse gesättigt. Bezüglich der zeitlichen Entwicklung des Verstromungswirkungsgrades von Biogasanlagen werden demnach in nächster Zukunft keine wesentlichen Verbesserungen mehr erwartet. 1990 erreichte man im Durchschnitt ca. 25 % Verstromungswirkungsgrad, 1995 waren es 27% und für 2010 geht man von einem Verstromungswirkungsgrad von 30% aus.

Im Bereich von Deponiegas war die historische Entwicklung ähnlich wie bei Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse. Es gab keine dramatischen Verbesserungen der Wirkungsgrade. Lag der durchschnittliche Verstromungswirkungsgrad 1980 bei dieser Technologie bei 30%, so erreichte er 1985 33%. Im Jahr 1990 erzielte man 35% und es sind in nächster Zukunft (bis 2010) keine wesentlichen Veränderungen mehr zu erwarten. Im Gegensatz dazu wird der Grad der Gaserfassung von derzeit 40% in Zukunft auf möglicherweise bis zu 90% ansteigen, was eine beachtliche

Steigerung der Anlagenproduktivität und eine gleichzeitige Reduktion von Treibhausgasen bedeutet, was jedoch im Fall von Luxemburg kaum etwas an den marginalen Potenzialen dieses Landes ändern wird.

Bei Klärgas ist eine ähnliche Entwicklung wie bei Deponiegas zu erwarten. Bis 2010 wird es voraussichtlich zu keiner nennenswerten Steigerung der Verstromungswirkungsgrade kommen.

Zukünftige technologische Trends sind einerseits in Verbesserungsinnovationen bezüglich der Anlagentechnik zu sehen, andererseits ist durch den Trend zu größeren Anlagen auch eine Produktivitätssteigerung sowohl bei der Bereitstellung von Energiepflanzen als auch prozesstechnisch zu erwarten.

Eine wesentliche Innovation bei der Nutzung des bereitgestellten Biogases ist durch die Biogas-Direkteinspeisung in das Erdgasnetz gegeben. Diese Technologie entkoppelt den Ort der Biogasproduktion vom Ort der Energiedienstleistungsnachfrage (solange ein Erdgasnetz zur Verfügung steht) und auch von der oft kritischen Frage nach dem Wärmeabsatz im Fall einer Kraft-Wärme-Kopplung. Da diese Thematik für Luxemburg eine interessante zukunftsweisende Option darstellt soll im Folgenden der Stand des Wissens dokumentiert werden.

### **Die Biogas-Direkteinspeisung**

Die Ausführungen zur Biogas-Direkteinspeisung basieren hauptsächlich auf der Primärliteratur Wuppertal Institut et al. (2005) und sind in Anhang II dargestellt.

## **5.4.3 Potenziale im Bereich Gülle**

### **Theoretisches Potenzial Gülle**

Theoretisch wären die gesamten in der landwirtschaftlichen Viehzucht anfallenden tierischen Exkremente potenzielle Substrate für Biogasanlagen. Die Luxemburgische Bestandsstatistik für Vieh weist in diesem Zusammenhang für das Jahr 2003 folgende Bestände aus:

Tabelle 5-22: Viehbestand in Luxemburg im Jahr 2003

<b>Tierart</b>	<b>Bestand 2003</b>
Pferde	3.449
Rinder	189.674
Schweine	84.140
Schafe	9.446
Hühner	79.288

Quelle: nationale Bestandsstatistik

Selbst zur Ermittlung eines theoretischen Potenzials erscheint es jedoch unrealistisch, den gesamten Viehbestand in die Betrachtungen einzubeziehen, da einerseits im Zuge einer Weidewirtschaft gehaltenes Vieh nicht bewertet werden kann, andererseits die Nutzung von Exkrementen von Kleinvieh oftmals nicht möglich ist. Die Biogasvereinigung weist in einer Potenzialabschätzung vor dem genannten Hintergrund das in Tabelle 5-23 dokumentierte Szenario zur Ermittlung des theoretischen Potenzials aus Gülle aus:

Tabelle 5-23: Abschätzung des theoretischen Potenzials aus Gülle

	Zahlenwert	Einheit
GVE im Winter	160.363	GVE
GVE im Sommer	10.297	GVE
Güllemenge	795.364	m <sup>3</sup> /a
Festmistmenge	396.425	t/a
Gasertrag	31.764.280	m <sup>3</sup> /a
Spezifischer Energiegehalt Biogas	5,3	kWh/Nm <sup>3</sup>
Energiepotenzial	168	GWh

Quelle: Biogasvereinigung (2006)

Pro Großvieheinheit wird nach Neubarth und Kaltschmitt (2000) ein Gasertrag von 511 m<sup>3</sup> Biogas pro Jahr mit einem spezifischen Heizwert von 21,6 MJ/m<sup>3</sup> angesetzt. Bei der Kalkulation der Biogasvereinigung resultiert bezogen auf den Mittelwert der GVE im Winter und Sommer ein Gasertrag von 372 m<sup>3</sup>/GVE, es handelt sich also um eine vorsichtige Annahme. Der spezifische Energiegehalt (Heizwert) von Biogas wird von der Biogasvereinigung mit 5,3 kWh/Nm<sup>3</sup> angenommen, von Neubarth und Kaltschmitt (2000) wird ein Wert von 6 kWh/Nm<sup>3</sup> publiziert, also wieder eine Annahme auf der sicheren Seite. Die Abschätzung der Biogasvereinigung bezüglich des theoretischen Potenzials aus Gülle wird insgesamt als vorsichtig eingeschätzt, wird aber als praxisrelevante Einschätzung hier im Weiteren übernommen. Das theoretische Potenzial aus Gülle beträgt somit 168 GWh.

### Technisches Potenzial Gülle

Bei der oben dokumentierten Berechnung des theoretischen Potenzials wurden die Gülleverluste durch die Weidewirtschaft in Luxemburg bereits berücksichtigt. Die Diskussion, ob es sich bei diesen Gülleverlusten um Restriktionen handelt, welche bereits im theoretischen Potenzial berücksichtigt werden müssen, oder ob es sich dabei um technische Restriktionen handelt, soll hier nicht näher ausgeführt werden. Es ist jedoch nicht anzunehmen, dass eine Änderung der Viehhaltungsgepflogenheiten zum Zweck einer Erhöhung der Gülleausbeute erfolgt. Aus diesem

Grund werden die genannten Verluste bereits im theoretischen Potenzial berücksichtigt.

Weitere technische Abschläge sind im Bereich der Sammelinfrastruktur zu sehen. Da auch in fernerer Zukunft nicht jeder kleine landwirtschaftliche Betrieb über eine eigene Biogasanlage verfügen wird, müsste eine Sammelinfrastruktur und Substratlogistik für den Transport der Gülle errichtet werden. Da aus diesem Blickwinkel heraus aus technischen Gründen nicht 100% des theoretischen Güllepotenzials erfasst werden können, wird ein Gülleverlust von 10% in Bezug auf das theoretische Potenzial angesetzt. Das energetische technische Potenzial aus Gülle beträgt somit 152 GWh.

### **Realisierbares Potenzial Gülle**

Bei der Kalkulation des realisierbaren Potenzials ist vor allem die realistisch umsetzbare Substratlogistik von besonderem Interesse. Zurzeit sind in Luxemburg 23 Biogasanlagen in Betrieb. Diese Anlagen können prinzipiell Gülle als Substrat mitverarbeiten, haben jedoch kaum Bedarf an zusätzlichem Substrat. Die Verwertung von zusätzlichem Substrat ist somit von der Errichtung neuer Biogasanlagen abhängig. Zur Abschätzung von realisierbaren Potenzialen für den Zeitraum bis 2010 und bis 2020 ist somit ein Ausbauszenario in Bezug auf die Errichtung von neuen Biogasanlagen nötig.

Für die weitere Kalkulation wird angenommen, dass bis zum Jahr 2010 weitere 20 landwirtschaftliche Biogasanlagen errichtet werden können, welche jeweils bezüglich ihrer Anlagengröße dem Mittelwert der bereits errichteten Anlagen entsprechen. Im Zeitraum von 2010 bis 2020 wird die Errichtung von jeweils 5 Anlagen pro Jahr, in Summe also 50 zusätzliche Anlagen, vorgesehen. Diese Annahmen führen zu realisierbaren energetischen Potenzialen für gasförmige biogene Energieträger aus Gülle von 48 GWh/a im Jahr 2010 und 105 GWh/a im Jahr 2020.

#### **5.4.4 Potenziale im Bereich Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege**

##### **Theoretisches Potenzial aus Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege**

Grünschnitt, beispielsweise aus der kommunalen aber auch privaten Landschaftspflege, aus Gewerbebetrieben (z.B. Fertigrasenproduktion) oder von nicht anders genutzten Wiesenflächen kann in Biogasanlagen genutzt werden. Bereits 2004 wurden in Luxemburg 5.471 t organische Abfälle (hauptsächlich Grünschnitt) in Biogasanlagen verwertet. Das entspricht ca. einem Gasertrag von 18 GWh. Im selben Jahr wurden 51.574 t organische Abfälle in Kompostanlagen verwertet. Bei

einem Anteil der strukturarmen (Grasschnitt, Laubabfälle) Fraktion von ca. 50% entspricht das einer Gesamtmasse von ca. 30.000 t (Frischmasse, keine Trockensubstanz!).

Da bei der Kalkulation des theoretischen Potenzials die Kumulierbarkeit der einzelnen Substratkomponenten berücksichtigt werden soll, fallen die in Luxemburg bestehenden Weide- und Wiesenflächen aus der Kalkulation, da diese als Grundlage der bereits oben diskutierten Viehzucht zu sehen sind. Es entfallen weiters alle Waldflächen und das gesamte Ackerland, welches noch bei der Betrachtung der Energiepflanzen zur Biogasproduktion betrachtet wird. Die verbleibenden Landesflächen von 420 km<sup>2</sup> sind teilweise urbaner Natur (städtischer Bereich, Gebäudeflächen), bzw. sind kommunale und private Flächen wie Straßen, Wege, Gärten oder Parks. Als zur Gewinnung von Grünschnitt nutzbare Fläche wird im Sinne der theoretischen Potenziale im Weiteren 30% dieser Landesfläche angesetzt. Dies sind somit 12.600 ha. Nach Neubarth und Kaltschmitt liegen die Erträge des Grünlandes je nach Bewirtschaftungsart und Lage zwischen 7,3 t TS/(ha\*a) für intensiv genutztes Wirtschaftsgrünland, 3,2 t TS/(ha\*a) für extensives Grünland und 1 t TS/(ha\*a) für Almen und Berglagen. Es wird für die weitere Kalkulation angenommen, dass es sich hier um extensives Grünland mit einem Grünschnittertrag von 3,2 t TS/(ha\*a) handelt.

Die Kalkulation ergibt unter den getroffenen Annahmen einen Ertrag an Grünschnitt von 40.320 t Trockensubstanz, was wiederum einen energetischen Gasertrag von 133 GWh entspricht. Das theoretische energetische Potenzial aus Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege beträgt somit 133 GWh/a.

### **Technisches Potenzial aus Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege**

In Anbetracht der Tatsache, dass bereits heute in Luxemburg große Mengen an Grünschnitt einerseits in Biogasanlagen genutzt und andererseits mittels einer Sammelinfrastruktur gesammelt und kompostiert wird, kann davon ausgegangen werden, dass große Teile des theoretischen Potenzials auch als technisches Potenzial deklariert werden können. Abschläge dabei sind durch die nicht vollständig der Sammelinfrastruktur zugänglichen Anteile gegeben, welche allerdings gering eingeschätzt werden. Das technische Potenzial wird aus den angeführten Gründen mit 90% des theoretischen Potenzials eingeschätzt und beträgt damit 120 GWh/a.

### **Realisierbares Potenzial aus Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege**

Die realisierbaren Potenziale aus Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflege sind wie bereits im Fall der Gülle von den in Zukunft errichteten Anlagenkapazitäten abhängig, da die momentan in Betrieb befindlichen Anlagen kein zusätzliches

Substrat in entsprechenden Mengen verarbeiten können.

Wie schon bei der Kalkulation des realisierbaren Potenzials für Gülle wird deshalb angenommen, dass bis zum Jahr 2010 weitere 20 landwirtschaftliche Biogasanlagen errichtet werden können, welche jeweils bezüglich ihrer Anlagengröße dem Mittelwert der bereits errichteten Anlagen entsprechen. Im Zeitraum von 2010 bis 2020 wird die Errichtung von jeweils 5 Anlagen pro Jahr, in Summe also 50 zusätzliche Anlagen, vorgesehen. Diese Annahmen führen zu realisierbaren energetischen Potenzialen für gasförmige biogene Energieträger aus Gülle von 36 GWh/a im Jahr 2010 und 81 GWh/a im Jahr 2020.

### 5.4.5 Potenziale im Bereich Bioabfälle

#### Theoretisches Potenzial aus Bioabfällen

Unter Bioabfälle werden hier biogene Haushaltsabfälle, kommunale Abfälle und Gewerbeabfälle verstanden, welche mit einer geeigneten Trenn- und Sammellogistik bereitgestellt werden, wie dies beispielsweise bei der "Biotonne" der Fall ist.

Im Jahr 2004 wurden 21.477 t Bioabfall („Zusammenfassung der Jahresberichte 2004 der luxemburgischen Kompostierungsanlagen“) in Kompostierungsanlagen verwertet.

Die existierende Sammelinfrastruktur ist in Tabelle 5-24 dokumentiert. Diese Sammelinfrastruktur ist noch stark ausbaufähig.

Tabelle 5-24: Sammelinfrastruktur für Bioabfälle in Luxemburg

Syndikat	An Biotonne angeschlossene Einwohner [%] (2003)	Spezifisches Bioabfallaufkommen [kg/Einwohner a] (2003)
SIDEC	3	3,8
SIGRE	0	0
SIDOR	64	63,3
Luxemburg	44	43,5

Quelle: Daten 2003 zur Abfallwirtschaft im Großherzogtum Luxemburg – Abfälle aus privaten Haushalten und ähnliche Abfälle

Wenn die Biotonne für die gesamte Bevölkerung Luxemburgs eingeführt würde, könnten somit pro Jahr ca. 44.830 t Bioabfall gesammelt werden (Annahmen: 100 kg Bioabfall/Einwohner a und 448.300 Einwohner).

Für die weitere Kalkulation wird ein Biogasertrag aus Bio-Abfällen von 350 m<sup>3</sup>/t TS und ein Trockensubstanzgehalt des Bio-Abfalls von 2,3 t Abfall pro t TS angenom-

men. Das theoretische Biogaspotenzial aus Bioabfall beträgt somit 40 GWh/a.

### **Technisches Potenzial aus Bioabfällen**

Im Bereich der Bioabfälle wurde bei der Kalkulation des theoretischen Potenzials ein Gesamt-Bioabfallaufkommen in Luxemburg von 44.830 t/a unterstellt. Aus der Sicht des technischen Potenzials kann jener Anteil dieser Abfälle gewertet werden, der einer technischen Sammel- und Transportlogistik zugänglich ist. Prinzipiell könnte dies für die gesamte Abfallmenge angenommen werden, wobei geringe Bioabfallmengen auch bei motivierten Sammlern in den Restmüll gelangen werden. Das technische Potenzial wird deshalb mit 90 % des theoretischen Potenzials angenommen. Das energetische technische Potenzial an gasförmigen biogenen Energieträgern aus Bioabfällen beträgt somit 36 GWh/a.

### **Realisierbares Potenzial aus Bioabfällen**

Der Status quo der Nutzung von Bioabfällen in Biogasanlagen in Luxemburg weist einen energetischen Biogasertrag von 1 GWh aus. Das heißt, dass eine entsprechende Nutzung zurzeit nur in einem sehr geringen Umfang stattfindet. In Zukunft empfiehlt sich die Errichtung bzw. der Betrieb von eigenen für diesen Zweck optimierten Vergasungsanlagen. Das technische Potenzial geht von einem Wert von 36 GWh/a an energetischer Gasausbeute aus. Dies entspricht einer stündlichen Gasausbeute von 685 m<sup>3</sup>. Typischer Weise ist diese Leistung in einer sehr großen oder 2 bis 3 mittleren Anlagen installierbar. Hier steht die Kostendegression bei der Biogaserzeugung der Kostenerhöhung durch die Substratlogistik bei zentralen Ansätzen gegenüber. Für die Festlegung der Potenziale wird die genannte Leistung in 2 Anlagen aufgeteilt, wobei eine Anlage mit einer Stundeleistung von 300 m<sup>3</sup> bis zum Jahr 2010 umsetzbar ist. Dies entspricht einem Anlagen-Jahresarbeitsvermögen an Biogas von ca. 16 GWh/a, was laut Informationen der Umweltverwaltung einer geplanten Biogasanlage bei Minett-Kompost entspricht. Eine zweite Anlage mit einer Stundenleistung von 385 m<sup>3</sup> soll danach bis zum Jahr 2020 realisiert werden, wobei mit dieser Anlage ein Potenzial von weiteren 20 GWh/a erschlossen werden kann. Bis zum Jahr 2020 kann somit ein realisierbares Potenzial an Biogas aus Bioabfällen von insgesamt 36 GWh/a erschlossen werden, das gleichsam dem technischen Potenzial entspricht.

## 5.4.6 Potenziale im Bereich Schlachtabfälle

### Theoretisches Potenzial aus Schlachtabfällen

#### Schlachtabfälle

Das Thema der energetischen Nutzung von Schlachtabfällen in Biogas-Anlagen wird kontroversiell diskutiert. Es gibt Bedenken bezüglich hygienischer Aspekte, vor allem was das Ausbringen der Gärrückstände auf den landwirtschaftlichen Flächen betrifft. Zurzeit werden die in den kleinen, dezentral strukturierten luxemburger Schlachthöfen anfallenden Schlachtabfälle nach Belgien verbracht und dort verbrannt. In übereinstimmender Aussage mehrerer luxemburgischer Organisationen ist die nationale Landwirtschaft sehr auf Produktqualität bedacht wobei durch das Einbringen von Schlachtabfällen in den landwirtschaftlichen Zyklus Risiken gesehen werden.

Trotz dieser massiven Hemmnisse, welche in die Überlegungen zu realisierbaren Potenzialen einfließen werden, soll an dieser Stelle das theoretische Potenzial aus der Biogasproduktion aus Schlachtabfällen abgeschätzt werden. Nach einer Publikation des luxemburgischen Landwirtschaftsministeriums (2005) stammen im Jahr 2004 28% des Wertes der landwirtschaftlichen Erzeugung aus dem Bereich der Tierhaltung, das sind ca. 78 Mio. Euro. Davon entfallen absolut wiederum 22,5% auf Rinder, 4,9% auf Schweine und 0,5% auf sonstige Tiere.

Der Kalkulation von theoretischen Potenzialen im Bereich Schlachtabfälle können die in Tabelle 5-25 dokumentierten Daten aus der bereits oben zitierten Publikation zu Grunde gelegt werden.

Tabelle 5-25: Im Jahr 2004 in Luxemburg geschlachtete Tiere (in Tonnen Schlachtgewicht)

Großrinder	16.479 t
Kälber	394 t
Schweine	12.117 t
Ferkeln	1.000 t
Schafe und Ziegen	164 t
Geflügel	135 t
Summe	30.289 t

Quelle: luxemburgisches Landwirtschaftsministerium (2005)

Die Hauptmenge der Schlachthofabfälle ist in nachfolgender Tabelle 5-26 nach Arten der Abfälle und Herkunftsschlachthof dokumentiert.

Tabelle 5-26: Schlachthofabfälle in Luxemburg

<i>Tonnen/Jahr</i>	<b>Cobolux</b>	<b>Esch</b>	<b>Ettelbruck</b>	<b>Total</b>
Fett	350		1185	1535
Darm und Darminhalt	174	85	469	728
Gedärme von Schweinen	228	545	243	1016
Gedärme von Rindern	180	631	410	1221
Schweinsborste	35	13,5	59	108
Knochen Kat 1	142	166	267	575
Knochen Kat 3	480	363	532	1375
Blut Kat 1	420	673	462	1555
Total	2009	2477	3628	8114

Quelle: Schlachthof Ettelbrück

Es wird angenommen, dass die Schlachtabfälle, welche sich zur energetischen Nutzung in Biogasanlagen eignen, im konkreten Fall ca. 3000 Tonnen pro Jahr ausmachen. Die Auswahl der Rohstoffe wurde hier aus hygienischen Gründen und aus Gründen der Aufwände für die Sterilisierung als restriktiv angenommen. Das Ausmaß der anfallenden Substrate ist in der Zeitspanne von 2000 bis 2004 ungefähr konstant.

Die spezifische Gasausbeute wird nach Domenig et al. (1998) mit 100 m<sup>3</sup>/t Substrat und einem spezifischen Heizwert des Gases von 21,6 MJ/m<sup>3</sup> angenommen. Daraus errechnet sich eine energetisch bewertete Gasausbeute von 1,8 GWh/a.

### **Technisches Potenzial aus Schlachtabfällen**

Die Kalkulation des theoretischen Potenzials aus Schlachtabfällen basiert auf den in Luxemburg geschlachteten Tieren pro Jahr. Wieder ist aus der Sicht des technischen Potenzials von Interesse, ob die entsprechenden Schlachtabfälle aus logistischer Sicht einer energetischen Verwertung durch Vergasung zugeführt werden können. Die 3 Schlachtbetriebe Luxemburgs sind durch kleine Betriebsgrößen sowie durch eine gewisse räumliche Verteilung charakterisiert, was die Sammellogistik verteuert, aber nicht grundsätzlich verhindert. Es wird deshalb angenommen, dass die gesamte Menge des theoretisch verfügbaren und verwertbaren Substrats auch tatsächlich gesammelt und einer energetischen Verwertung zugeführt werden könnte. Das energetische technische Potenzial an gasförmigen biogenen Energieträgern aus Schlachtabfällen beträgt somit 1,8 GWh/a.

### **Realisierbares Potenzial aus Schlachtabfällen**

Der Einsatz von Schlachtabfällen als Kofermentat wird in Luxemburg aus hygienischer Sicht kritisch bewertet, da die ausgegorenen Substrate wieder auf landwirt-

schaftlichen Flächen ausgebracht werden könnten und so in den landwirtschaftlichen Zyklus gelangen. Aus energetischer Sicht handelt es sich um ein vergleichsweise geringes Potenzial. Vor diesem Hintergrund ist das schwer greifbar zu machende Risiko eines Eintrages von Schlachtabfällen in landwirtschaftliche Biogasanlagen dem möglichen Nutzen einer Ertragssteigerung gegenüberzustellen. Aus strategischer Sicht ist es jedenfalls günstig die Schlachtabfälle nicht in dezentralen, schwer zu kontrollierenden Anlagen einzubringen, sondern in einer oder einigen wenigen Anlagen unter bestmöglichen Sicherheitsmaßnahmen (Homogenisierung, Sterilisierung) zu verwerten und die ausgegorenen Substrate danach bestmöglich zu entsorgen. Dies steigert möglicherweise die Systemkosten einer solchen Anlage deutlich und reduziert damit die Wirtschaftlichkeit. In Bezug auf die realisierbaren Potenziale wird angenommen, dass bis zum Jahr 2010 keine energetische Verwertung von Schlachtabfällen erfolgt und im Zeitraum von 2010 bis 2020 eine entsprechende Anlage errichtet werden kann, in der das gesamte technische Potenzial erschlossen wird. Das realisierbare energetische Potenzial im Jahr 2020 beläuft sich somit auf 1,8 GWh/a.

#### **5.4.7 Potenziale im Bereich Energiepflanzen**

##### **Theoretisches Potenzial aus Energiepflanzen**

Energiepflanzen stellen einen wesentlichen und klassischen Zugang zur Biogasgewinnung dar. Das zur Vergärung geeignete Sortiment an Energiepflanzen, welches für mitteleuropäische Klima- und Bodenverhältnisse in Frage kommt ist prinzipiell weit gefächert, wobei aus der Sicht des Ertrages und der prozesstechnisch – logistischen Eignung dem Mais eine große Bedeutung zukommt.

Bei der Kalkulation des theoretischen Potenzials aus Energiepflanzen werden zunächst keine stofflichen Konkurrenzen berücksichtigt. Als Ausgangspunkt zur Ermittlung des Flächenpotenzials dient die landwirtschaftliche Nutzfläche Luxemburgs im Ausmaß von 128.073 ha im Jahr 2004. Somit werden nicht nur die bestehenden Ackerflächen, sondern auch die Wiesen und Weiden zur Produktion von Energiepflanzen eingesetzt. Im Sinne der Summierbarkeit auch von theoretischen Potenzialen wird diese Fläche jeweils zu einem Drittel der Produktion von festen, flüssigen und gasförmigen gewidmet. Die Fläche für den Anbau von Energiepflanzen für die Produktion von gasförmigen biogenen Energieträgern beträgt somit 42.691 ha, wobei diese Fläche auch in Hinblick auf nötige Fruchtfolgen zu je einem Drittel mit Mais, Weizen und Energiegras bepflanzt wird. Der Flächenertrag von Mais wird dabei mit 14,5 t TS/ha, jener von Weizen (Ganzpflanze) mit 12,3 t TS/ha und jener von Energiegras mit 15 t TS/ha angenommen.

Das aus den getätigten Annahmen resultierende theoretische energetische Potenzial aus der Nutzung von Energiepflanzen in Biogasanlagen in Luxemburg beläuft sich auf 1.963 GWh/a.

### **Technisches Potenzial aus Energiepflanzen**

Wie schon bei der Behandlung der festen und flüssigen biogenen Energieträger aus Energiepflanzen ist auch im Bereich der gasförmigen biogenen Energieträger die zentrale Einschränkung durch die tatsächlich für die Energiepflanzenproduktion einsetzbare Fläche gegeben. In der Folge wird die zum Anbau von Energiepflanzen verfügbare Fläche auf die Ackerfläche im Jahr 2004 beschränkt um heute etablierte Landschafts- und Wirtschaftsstrukturen mit zu berücksichtigen. Weiters wird eine Naturschutzfläche im Umfang von 2.300 ha berücksichtigt. Die zum Anbau von Energiepflanzen zur Produktion von gasförmigen biogenen Energieträgern verfügbare Fläche beläuft sich unter obigen Annahmen auf 20.235 ha.

Die strukturelle Verteilung der angebauten Energiepflanzen, deren Erträge werden wie bei der Kalkulation des theoretischen Potenzials unverändert belassen. Dies führt in der Folge zu einem technischen energetischen Potenzial aus Energiepflanzen für die Produktion von Biogas von 930 GWh/a.

### **Realisierbares Potenzial aus Energiepflanzen**

Der Status quo des Gasertrages aus Energiepflanzen im Jahr 2005 beläuft sich auf 21 GWh. Ein weiterführender Einsatz von Energiepflanzen ist nur in neu errichteten Biogasanlagen möglich, da die existierenden Anlagen kein zusätzliches Substrat verarbeiten können. Es wird daher für die Abschätzung des realisierbaren Potenzials die Annahme eines Ausbauszenarios nötig, welches bereits im Zuge der Gülle-  
verwertung bzw. der Verwertung von Grünschnitt diskutiert wurde.

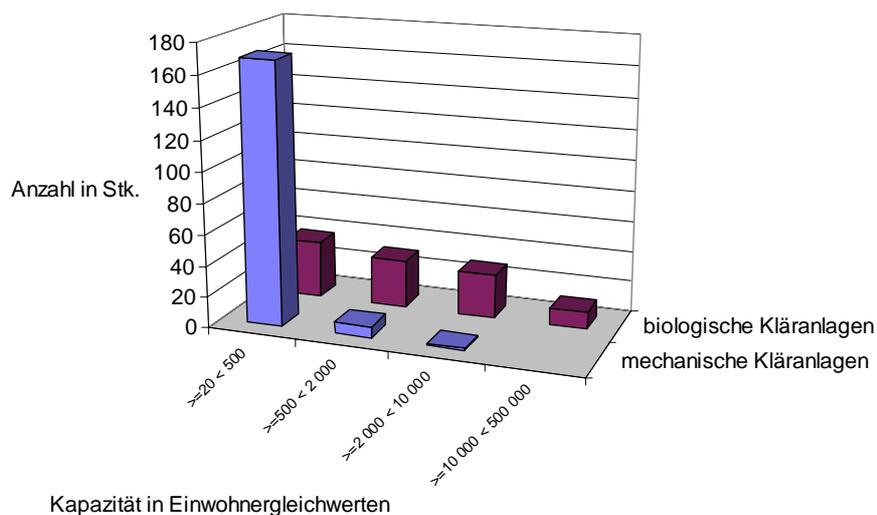
Für die weitere Kalkulation wird deshalb angenommen, dass bis zum Jahr 2010 weitere 20 landwirtschaftliche Biogasanlagen errichtet werden können, welche jeweils bezüglich ihrer Anlagengröße dem Mittelwert der bereits errichteten Anlagen entsprechen. Im Zeitraum von 2010 bis 2020 wird die Errichtung von jeweils 5 Anlagen pro Jahr, in Summe also 50 zusätzliche Anlagen, vorgesehen. Diese Annahmen führen zu realisierbaren energetischen Potenzialen für gasförmige biogene Energieträger aus Energiepflanzen von 42 GWh/a im Jahr 2010 und 95 GWh/a im Jahr 2020.

## 5.4.8 Potenziale im Bereich Klärgas

### Theoretisches Potenzial aus Klärgas

Die Behandlung bzw. Verwertung von organisch belasteten Abwässern wird unter anderem von Edelman und Engeli (1996) oder Hulpke (2000) behandelt, wobei Neubarth und Kaltschmitt (2000) die Ergebnisse gut zusammenfassen. Demnach entstehen direkt vergärbare Abwässer vor allem im Bereich der Nahrungsmittelindustrie und in Schlachthöfen. Kommunale Kläranlagen sind in dieser Hinsicht an mehrstufige Prozesse gebunden, bei denen beispielsweise die Rückstände aerober Reinigungsstufen zur Biogasferzeugung herangezogen werden können.

In der Statistik der Administration de la Gestion de l'Eau Luxemburgs wird für das Jahr 2004 eine Anzahl von 284 Kläranlagen mit einer Gesamtkapazität von 1.012.078 Einwohnergleichwerten angegeben. 177 Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 35.632 Einwohnergleichwerten arbeiten auf mechanischer Basis und 107 Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 976.440 Einwohnergleichwerten sind biologische Kläranlagen. Die Größenverteilung dieser Anlagen nach Einwohnergleichwerten ist in Abbildung 5-23 dargestellt.



Quelle: Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement

Abbildung 5-23: Größenverteilung der luxemburgischen Kläranlagen nach Anlagentyp

Die Berechnung der theoretischen Potenziale geht nun von einem Rohstoffdargebot von 1 Mio. Einwohnergleichwerten in Luxemburg aus. Neubarth und Kaltschmitt (2000) dokumentieren einen mittleren Gasertrag aus Klärgasanlagen von  $7,2 \text{ m}^3$

pro Einwohnergleichwert und Jahr mit einem spezifischen Energieinhalt von 21,6 MJ/m<sup>3</sup>. Daraus ergibt sich ein theoretisches Klärgaspotential für Luxemburg von 43 GWh/a.

### Technisches Potenzial aus Klärgas

Die Abschätzung des theoretischen Klärgaspotenzials berücksichtigte alle Abwässer, welche in allen verfügbaren Kläranlagen Luxemburgs behandelt werden. Die Statistik zeigt jedoch, dass es sich bei der überwiegenden Zahl der Anlagen um Kleinanlagen handelt. Diese Anlagen können aus technisch-wirtschaftlichen Gründen nicht für eine energetische Klärgasverwertung in Betracht gezogen werden. Bei den größeren Anlagen mit jeweils mehr als 10.000 Einwohnergleichwerten Kapazität existieren 11 Standorte, welche aus technisch-wirtschaftlicher Sicht prinzipiell als Anlagenstandorte in Frage kommen. In diesen 11 von insgesamt 284 Kläranlagen in Luxemburg werden 91 % der gesamten Abwässer behandelt. Das energetische technische Potenzial an Klärgas beträgt somit 39 GWh.

### Realisierbares Potenzial aus Klärgas

Der Status quo im Jahr 2005 weist eine Stromproduktion aus Klärgas von 4,5 GWh/a aus. Bei einem angenommenen Verstromungswirkungsgrad von 35% entspricht dies einer verwerteten Gasmenge von 13 GWh. Die Produktion stammt dabei aus 3 Kläranlagen, welche in Tabelle 5-27 dokumentiert sind.

Tabelle 5-27: Luxemburger Kläranlagen mit BHKW

	Kapazität (EGW)	Durchfluss (m <sup>3</sup> /d)	BHKW
Beggen	300000	33058	ja
Esch/Schiffange (SIVEC)	90000	13651	ja
Pétange (SIACH, Lamadelaine)	50000	13822	ja

Quelle: administration de la gestion de l'eau

Nach Auskunft der Administration de la Gestion de l'Eau ist geplant bis zum Jahr 2010 4 weitere Standorte mit einem BHKW auszustatten, darunter auch die zweit- und drittgrößte Kläranlage des Landes, Bleesbrück und Bettembourg. Bis 2020 sollen dann noch 4 zusätzliche Kläranlagen das Klärgas energetisch nutzen.

Diese Annahmen erbringen bis 2010 ein zusätzliches Potenzial von 16 GWh/a, insgesamt also ein realisierbares Potenzial aus Klärgas von 29 GWh/a, und bis 2020 wiederum ein zusätzliches Potenzial von 8 GWh, insgesamt also ein realisierbares Potenzial von 37 GWh.

### 5.4.9 Potenziale im Bereich Deponiegas

Die in Luxemburg verfügbaren Mülldeponien werden mit sortierten Müllfraktionen beschickt. Energetisch (d.h. in diesem Fall thermisch) nutzbare Müllanteile (vor allem Kartonagen, Kunststoffe und Holz) werden vor der Deponierung entnommen und entsprechend genutzt. Ein Pilotprojekt zur Deponiegasnutzung in Luxemburg ist laut Auskunft der luxemburgischen Umweltverwaltung gescheitert, da die gewinnbaren Gase einerseits stark schwankende Qualität und andererseits zu geringe Quantität aufweisen.

Ungeachtet dessen existiert ein in der Ausschreibungsphase befindliches Projekt der SIGRE, welches ein Zündstrahl-BHKW zur Nutzung des Deponiegases (30 m<sup>3</sup>/h, ca. 50% CH<sub>4</sub>) vorsieht. Die Anlage weist die Eckdaten 52 kW<sub>el</sub> (Einspeisung ins Stromnetz) und 45 kW<sub>th</sub>: (Wärmenutzung zur Beheizung des Gebäudes) auf. Dieses Projekt kann aus heutiger Sicht bis zum Jahr 2010 umgesetzt werden und würde die Verwertung von 1 GWh Deponiegas zulassen. Da sich das Potenzial an Deponiegas aus heutiger Sicht auf dieses eine Projekt beschränkt, wird auch für den Zeitraum bis 2020 davon ausgegangen, dass keine zusätzliche, weitere Deponiegasnutzung erfolgt. Das Potenzial für Deponiegas wird für 2020 daher ebenfalls mit 1 GWh/a Nutzgasausbeute angenommen.

Für das technische Potenzial wird angenommen, dass durch eine Optimierung der Gasbrunnen bzw. der Deponiegassammelanlagen die Gasausbeute verdoppelt werden könnte, auch wenn solche Maßnahmen aus wirtschaftlichen Überlegungen heraus in der Praxis wahrscheinlich nicht durchgeführt werden. Das technische Potenzial wird somit mit 2 GWh/a angenommen, wobei dieser Wert auch für das theoretische Potenzial anzusetzen ist.

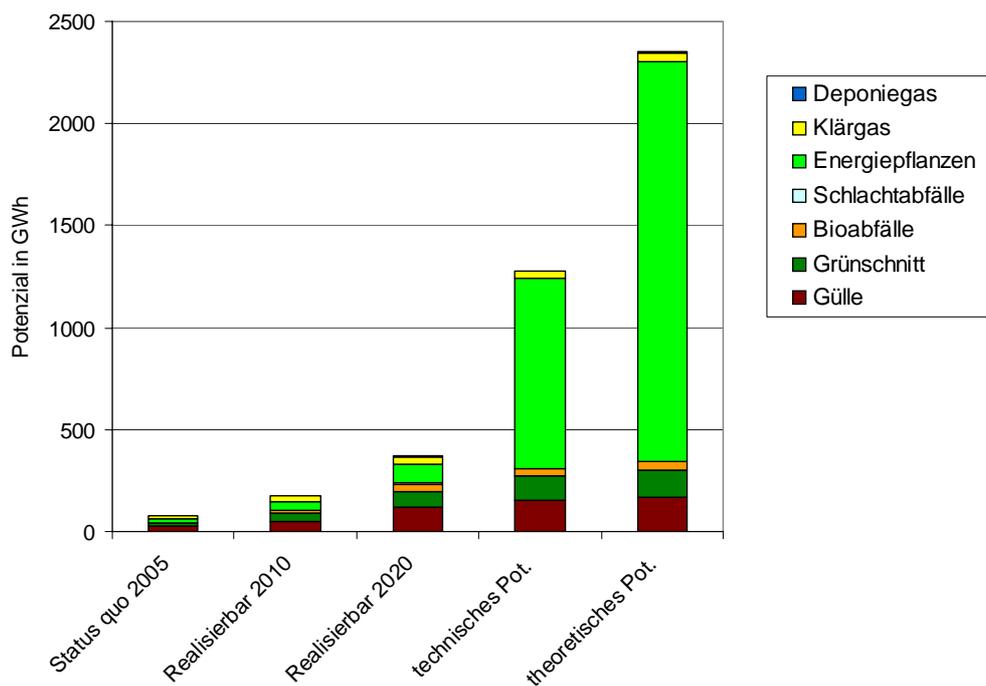
### 5.4.10 Zusammenfassung der Potenziale im Bereich gasförmige biogene Energieträger

Ein Überblick über die einzelnen Potenzialkategorien der einzelnen untersuchten Rohstoffe ist anhand von Tabelle 5-28 und Abbildung 5-24 gegeben.

Tabelle 5-28: Zusammenfassung der Potenziale im Bereich gasförmige biogene Energieträger

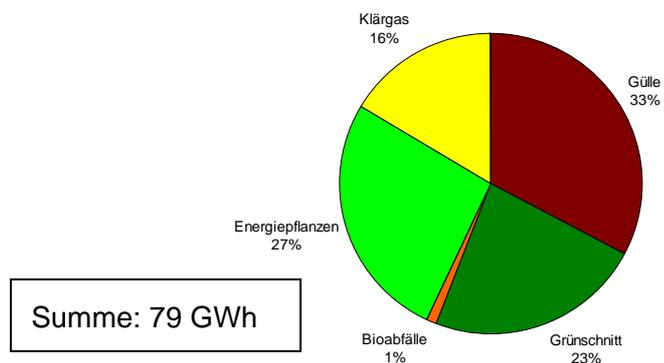
	Potenziale (Angaben in GWh/a)				
	Status quo 2005	Realisierbar 2010	Realisierbar 2020	technisches Pot.	theoretisches Pot.
Gülle	26	52	117	152	168
Grünschnitt	18	36	81	120	133
Bioabfälle	1	16	36	36	40
Schlachtabfälle	0	0	1,8	1,8	1,8
Energiepflanzen	21	42	95	930	1.963
Klärgas	13	29	37	39	43
Deponiegas	0	1	1	2	2
Summe	79	176	369	1281	2351

Quelle: eigene Berechnungen



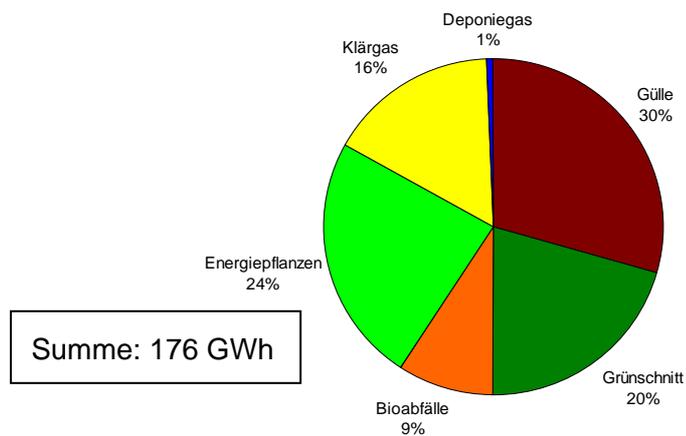
Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 5-24: Darstellung der Potenziale im Bereich gasförmiger biogener Energieträger



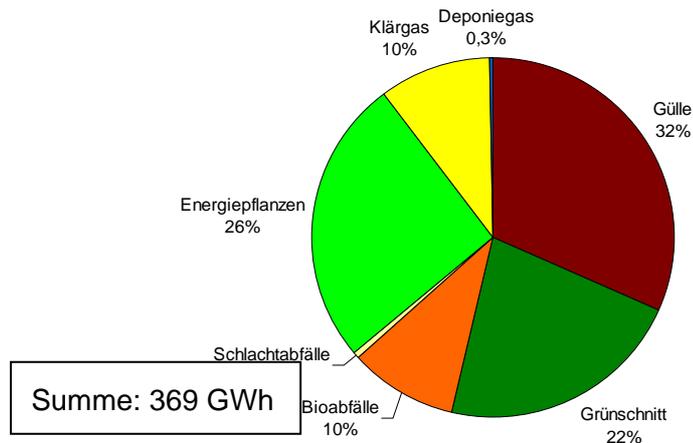
Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-25: Status quo der gasförmigen biogenen Energieträger in Luxemburg im Jahr 2005



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-26: Potenzial 2010 der gasförmigen biogenen Energieträger in Luxemburg



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-27: Potenzial 2020 der gasförmigen biogenen Energieträger in Luxemburg

#### 5.4.11 Kosten der gasförmigen biogenen Energieträger

Eine kompakte Aufstellung zu erwartender Gesamt-Gestehungskosten von Biogas wurde bereits im Abschnitt "Technisches Entwicklungspotenzial von gasförmigen biogenen Energieträgern" präsentiert. Die zusammenfassende Tabelle sei an dieser Stelle noch einmal wiedergegeben. Deutlich zu erkennen ist die Kostendegression mit steigender Anlagengröße. Die innovative Möglichkeit der Biogas-Direkteinspeisung stellt vor allem in Zusammenhang mit größeren Biogasanlagen eine aus ökonomischer Sicht und aus der Sicht der Energieeffizienz attraktive Möglichkeit der Nutzung dar.

Die Wirtschaftlichkeit von Anlagen, welche nicht in das Erdgasnetz einspeisen, hängt weitestgehend von der optimalen Vermarktung der Koppelprodukte Strom und Wärme ab. Kann die Wärme zu Endverbraucherpreisen (z.B. zur Beheizung privater Haushalte) verkauft werden, so ist die Gesamtwirtschaftlichkeit unter den gültigen Einspeisetarifen für den elektrischen Strom in der Regel gewährleistet, kann die Wärme nicht abgesetzt werden, so ist der wirtschaftliche Betrieb der Anlagen schwieriger zu erreichen.

Tabelle 5-29: Spezifische Kosten der Rohgaserzeugung nach Anlagentyp

Kürzel	Bezeichnung	Spezifische Kosten		
		Rohgas	Produktgas- einspeisung nach DWW <sup>30</sup> total	Produktgas- einspeisung nach PSA <sup>31</sup> total
		ct/kWh <sub>hi</sub>	ct/kWh <sub>hi</sub>	ct/kWh <sub>hi</sub>
BG 50 G	Gülleanlage 50 m <sup>3</sup> /h	5,20	13,22	12,24
BG 250 G	Gülleanlage 250 m <sup>3</sup> /h	3,65	5,95	6,05
BG 500 G	Gülleanlage 500 m <sup>3</sup> /h	3,32	4,87	5,00
BG 50 N	Nawaro-Anlage 50 m <sup>3</sup> /h	7,91	16,47	15,69
BG 250 N	Nawaro-Anlage 250 m <sup>3</sup> /h	5,84	8,31	8,44
BG 500 N	Nawaro-Anlage 500 m <sup>3</sup> /h	5,67	7,33	7,54
BG 500 B	Siedlungs-Abfälle- Anlage	4,83	6,26	6,43
Holz-Vg 6250 <sup>32</sup>	Holzvergaser 6250 m <sup>3</sup> /h	3,77	6,11	-

Quelle: Wuppertal Institut (2005)

## 5.5 Geothermie

### 5.5.1 allgemeine Aspekte der Geothermienutzung

Der natürliche Wärmestrom aus dem Erdinneren beträgt an der Erdoberfläche nach Neubarth und Kaltschmitt (2000) ca. 65 mW/m<sup>2</sup> und ist damit für eine direkte Nutzung zu gering. Durch besondere geologische Randbedingungen entstehen jedoch geografische Zonen, welche die Auskopplung von nutzbarer Wärme gestatten. Geothermische Lagerstätten können dabei folgenden Typen zugeordnet werden:

- **Hydrothermale Niederdrucklagerstätten:** Warmwasser (bis 100 °C) oder Heißwasser (über 100 °C) sowie Nassdampf, Heiß- oder Trockendampf befindet

<sup>30</sup> (DWW) Druckwasserwäsche

<sup>31</sup> (PSA) Druckwechseladsorption

<sup>32</sup> Aufgrund der Leistungsgröße und Verfahrenstechnik nur bedingt mit Fermentationsanlagen vergleichbar.

sich in Porenräumen des Gesteins.

- **Hydrothermale Hochdrucklagerstätten:** Diese Lagerstätten enthalten mit Gas (am häufigsten mit Methan) vermisches Heißwasser und weisen Überdruck auf. Der Überdruck entsteht dabei durch tektonische Beanspruchung der Lagerstätten. In Österreich sind solche Lagerstätten aus dem Grenzbereich des Molassebeckens mit den Alpen bekannt. Diese spielen jedoch für eine nationale geothermische Nutzung keine Rolle.
- **Heiße trockene Gesteine:** Solche Gesteinsschichten sind in bohrtechnisch erreichbaren Schichten der Erdkruste bis 10 km Tiefe weit verbreitet. Kennzeichnend ist dabei, dass entsprechende Schichten nicht über ausreichende Wasserressourcen verfügen um eine längere Nutzung zu ermöglichen, d.h. Wärmeträgermedien müssen von außen für den Wärmetransport eingebracht werden. Derartige Vorkommen repräsentieren das größte Potenzial geothermischer Energie, tragen in Österreich jedoch noch nicht zur geothermischen Energienutzung bei.
- **Magmavorkommen:** Gesteinsschmelzen, welche aufgrund ihrer geringen Dichte in Höhen von 3 bis 10 km Tiefe aufgestiegen sind können zur Auskopplung von Hochtemperaturwärme herangezogen werden. Die technologischen Verfahren zur Nutzung solcher Geothermiepotenziale stellen jedoch noch eine Herausforderung dar und sind für Österreich nicht von Bedeutung.

## 5.5.2 Geothermiepotenziale in Luxemburg

### Theoretisches Potenzial an Geothermie

Nach aktuellem Informationsstand sind die oben angeführten Lagerstätten in Luxemburg nicht bekannt. Probebohrungen in Luxemburg weisen typischer Weise einen flachen geothermischen Temperaturgradienten auf. Die Temperatur in einer Tiefe von 700 Metern beträgt in der Regel 21 °C. Die mittlere Jahres-Oberflächentemperatur in Luxemburg beträgt 8,3 °C. Bei näherungsweise linearem Temperaturverlauf entspricht dies einem Gradienten von 1,81 °C/100m. Die Nutzung dieser oberflächennahen geothermischen Wärme ist aufgrund des geringen Temperaturniveaus nur mit Hilfe der Wärmepumpentechnologie möglich. Das Potenzial aus Wärmepumpen wird jedoch unabhängig von der Wärmequellenanlage dieser Technologie im Kapitel „Wärmepumpen“ diskutiert und ist hier nicht weiter Gegenstand der Betrachtungen.

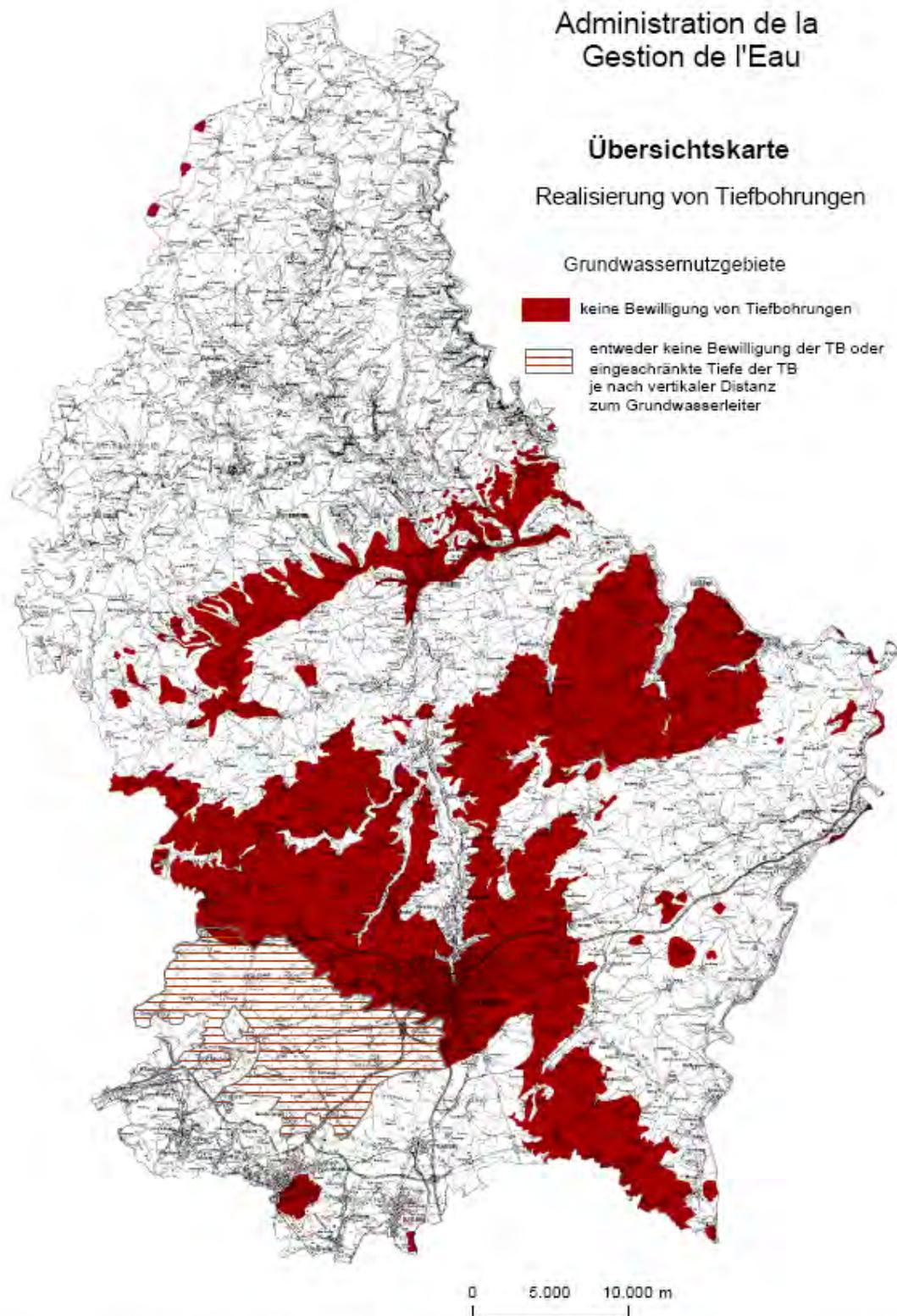
Das theoretische Potenzial an (direkt nutzbarer) Geothermie wird nach obiger Betrachtungsweise somit als Null eingeschätzt. Dazu muss jedoch angemerkt werden, dass das komplette Fehlen eines entsprechenden theoretischen Potenzials aufgrund der mangelhaften Dichte an tiefen Bohrungen heute noch nicht nachgewiesen wurde und dass (die heute noch unbekannte) Existenz eines entsprechen-

den Potenzials auch nicht ausgeschlossen werden kann. Für den Fall der Existenz eines hypothetischen theoretischen Potenzials sollen im Weiteren auch Aspekte des technischen Potenzials dokumentiert werden.

### **Technisches Potenzial an Geothermie**

Da das theoretische Potenzial an direkt nutzbarer Geothermie mit Null eingeschätzt wurde, ist auch das technische Potenzial mit Null anzusetzen. Prinzipiell sind alle Technologien, welche zur Nutzung von geothermischen Potenzialen erforderlich wären, am europäischen Markt verfügbar. Zusätzliche Restriktionen sind jedoch (auch aus der Sicht einer zukünftigen Exploration eines möglichen Potenzials) durch Einschränkungen der möglichen Bohrtätigkeit gegeben. Diese Einschränkungen ergeben sich aus Gründen des Grundwasserschutzes. Abbildung 5-28 zeigt die entsprechenden Landesteile, in denen Bohrungen nur eingeschränkt oder gar nicht möglich sind. Die Genehmigung einer Bohrung wird im Einzelfall geprüft.

Wie auf der Karte in Abbildung 5-28 ersichtlich ist, sind Landesteile mit vergleichsweise hoher Bevölkerungsdichte von Bohrvorhaben auszuschließen. Dieser Umstand stellt ein strukturelles Hemmnis in Hinblick einer hypothetischen Nutzung von geothermaler Wärme in (vorhandenen) Wärmenetzen dar, ist aber zurzeit angesichts der fehlenden Potenziale ohne Belang.



Quelle: Administration de la Gestion de l'Eau

Abbildung 5-28: Einschränkungen bei der Durchführung von Tiefbohrungen in Luxemburg

## **Technisches Entwicklungspotenzial der Geothermie**

Zentrale Hemmnisse für einen Einsatz der oberflächennahen Geothermie in Luxemburg mittels Wärmepumpen werden im Abschnitt Wärmepumpen diskutiert.

Auf europäischer Ebene ist der Ausbau bekannter geothermischer (meist hydrothermalen) Potenziale weit fortgeschritten. Weitere Versuche neue Potenziale zu lokalisieren sind von den hohen Investitionskosten für entsprechende Anlagen sowie dem Risiko von erfolglosen Bohrungen gehemmt. Dabei trifft das Wirtschaftlichkeitskriterium vor allem Anlagen, welche nur Niedertemperaturwärme für die Raumwärmebereitstellung und Warmwasserbereitung erbringen. Das Potenzial an balneologisch nutzbaren Aquiferen, welche oft mit einem hohen ökonomischen Zusatznutzen verknüpft sind, ist weitestgehend ausgeschöpft. Eine signifikante Reduktion der Investitionskosten ist aus technologischen Gründen in absehbarer Zeit nicht zu erwarten, da sowohl die Erschließungstechnologien als auch die technologische Handhabung des Wärmeträgermediums als ausgereift angesehen werden können. Aus wirtschaftlicher Sicht könnte in Zukunft die vermehrte Nachrüstung von bereits bestehenden, rein thermischen Anlagen mit Turbinen zur Stromerzeugung erfolgen. Diese, in der Regel als Ökostromanlagen anzuerkennenden geothermischen KWK-Anlagen erhalten in der Regel auch eine entsprechende Subvention.

Aus Gründen des hohen umsetzbaren Potenzials ist in Hinkunft die bereits eingangs erwähnte Nutzung heißer trockener Gesteine (auch "Hot Dry Rock" – Prinzip genannt) von Bedeutung. Die Wärme dieser geothermalen Lagerstätten muss mittels eingebrachten Wärmeträgermediums aus dem porösen Gestein ausgetragen werden. Dabei kann das Gestein die nötige Durchlässigkeit von Natur aus aufweisen oder eine entsprechende Eigenschaft kann durch Sprengung erreicht werden. Diese Technologie befindet sich zurzeit im Versuchsstadium.

## **Realisierbares Potenzial aus Geothermie**

Das realisierbare Potenzial aus direkt nutzbarer Geothermie in Luxemburg wird für den Betrachtungszeitraum 2010 bzw. 2020 mit Null eingeschätzt.

### **5.5.3 Kosten der Geothermienutzung**

Die Kosten der Geothermienutzung beziehen sich im konkreten Fall auf die Herstellung der Wärmequellenanlage in Form von Bohrungen. Die nötigen Bohrungen stellen sowohl im Bereich der Erschließung hydrothermalen Potenziale als auch oberflächennaher Potenziale den wesentlichen Teil der Gesamtinvestition dar. Ein von Neubarth und Kaltschmitt (2000) dokumentierter Richtwert für die Herstellung

von Förder- und Injektionsbohrungen zur Erschließung hydrothormaler Quellen liegt bei ca. 2500 Euro pro Meter Bohrtiefe, wobei die betrachteten Bohrtiefen dabei weit über 100 Meter hinausgehen.

Für die Herstellung der für Luxemburg relevanten Wärmequellenanlagen geringer Bohrtiefe für die Nutzung mittels Wärmepumpenanlagen in Form von Erdsonden (welche im Abschnitt Wärmepumpen thematisiert werden) geben Neubarth und Kaltschmitt (2000) Richtwerte in der Größenordnung von 540 bis 610 Euro pro kW und mit Grundwassernutzung zwischen 210 und 600 Euro pro kW an.

## **5.6 Kleinwasserkraft**

### **5.6.1 Kleinwasserkraftpotenziale in Luxemburg**

#### **Theoretisches Potenzial aus Kleinwasserkraft**

Das Wasserkraftpotenzial einer Region resultiert aus dem Niederschlags- u. Abflussflächenpotenzial, dem Abflusslinienpotenzial, dem technischen und ausbauwürdigen Potenzial.

Das Flächenpotenzial des Niederschlags ermittelt sich aus der jährlichen Niederschlagsfracht unter Berücksichtigung der topografisch bedingten Höhenunterschiede zu dem Punkt, an dem das dort niederfallende Wasser das betrachtete Gebiet verlässt. Das Abflussflächenpotenzial ermittelt sich aus dem Niederschlagsflächenpotenzial unter zusätzlicher Berücksichtigung der Verdunstungsverluste. Das Abflusslinienpotenzial ermittelt sich aus der mittleren Jahresfracht der Fließgewässer und den vorhandenen Gefällen in den Wasserläufen ohne Berücksichtigung von Fließverlusten wobei das Abflusslinienpotential auch als theoretisches Potenzial der Wasserkraftnutzung (Kleinwasserkraft plus Großwasserkraft) gesehen werden kann.

Unter Berücksichtigung der Fließverluste und Wirkungsgrade bestimmt sich aus dem Abflusslinienpotenzial das technische Potenzial. Das ausbauwürdige bzw. realisierbare Potenzial erfasst alle bestehenden Wasserkraftanlagen, die in Bau befindlichen, sowie alle bekannten Projekte. Es berücksichtigt neben den aus technischer Sicht gegebenen Einschränkungen für die Errichtung einer Wasserkraftanlage zusätzlich noch wirtschaftliche Restriktionen, die aus gegenwärtiger Sicht den Betrieb eines Wasserkraftwerkes nicht rentabel erscheinen lassen.

Der Begriff der Kleinwasserkraft wird in dieser Arbeit mit einer oberen Leistungsgrenze der elektrischen Anlagen-Nennleistung von 10 MW, unabhängig von der Art der Anlage und der eingesetzten hydraulischen bzw. elektrischen Maschinen defi-

niert. Diese Definition wurde, wie in EU (1997) angeregt, von den meisten europäischen Staaten eingeführt, wobei der Begriff selbst international nicht normiert ist.

Wesentliche Luxemburger Daten in diesem Zusammenhang sind:

- Landesfläche: 2586 km<sup>2</sup>
- mittlere Jahresniederschlagsmenge (Messbereich von 24 Stationen): 744-967 mm/a<sup>33</sup>
- mittlerer Jahresniederschlag total: 760 mm/a<sup>34</sup>
- Höhe über dem Meer: höchster Punkt: 560 m / tiefster Punkt: 130 m
- mittlere Höhe: 338 m<sup>35</sup>
- Entwässerung des Landes: mit der Ausnahme eines kleineren Flusses entwässert die gesamte Landesfläche über die Mosel in den Rhein; Seehöhe des Abflusses der Mosel: 130 m (bei Wasserbillig);

Seehöhen und Durchflussmengen der wesentlichen Wasserläufe Luxemburgs<sup>36</sup> am Punkt des Landeseintritts:

- Mosel: 145 m; 163 m<sup>3</sup>/s (Zeitraum: 1976-1998)
- Sauer: 365 m
- Wiltz: 385 m
- Our: 320 m
- Alzette: 295 m
- Kaylerbach: 300 m
- Dudelingenbach: 300 m
- Attert: 285 m

Da kein mittlerer Wert zur jährlichen Verdunstungsrate in Luxemburg vorliegt, erfolgt die Abschätzung des theoretischen Potenzials in diesem Bereich näherungsweise anhand von Relationen, welche von Neubarth und Kaltschmitt (2000) verwendet werden.

---

<sup>33</sup> Pfister L., C. Wagner, E. Vansuypeene, G. Drogue & L. Hoffmann (2005), Atlas climatique du Grand-Duché de Luxembourg, Musée national d'histoire naturelle, Société des naturalistes luxembourgeois, Centre de recherche public-Gabriel Lippmann, Administration des services techniques de l'agriculture, Luxembourg

<sup>34</sup> <http://urbanplus.com/areiononline/luxemburgb.html>

<sup>35</sup> Quelle: schriftliche Mitteilung, Administration du cadastre et de la topographie

<sup>36</sup> schriftliche Mitteilung, Administration du cadastre et de la topographie; Service de la navigation

Die unterschiedlichen Kategorien der theoretischen Wasserkraftpotenziale berechnen sich demnach zu:

Niederschlagspotenzial:	1114 GWh/a
Abflussflächenpotenzial:	662 GWh/a
Durchflusspotenzial Mosel:	210 GWh/a
Abflusslinienpotenzial gesamt:	175 GWh/a

Das Abflusslinienpotenzial kann als theoretisches Wasserkraftpotenzial Luxemburgs im engeren Sinn verstanden werden und beträgt 175 GWh/a.

### **Technisches Potenzial aus Wasserkraft**

Das technische Potenzial aus Wasserkraft errechnet sich aus dem gesamten Abflusslinienpotenzial unter zusätzlicher Berücksichtigung der Fließverluste und der technischen Wirkungsgrade der Umwandlungstechnologien. Da speziell die Abschätzung der Fließverluste ein genaues Studium der Gewässerverläufe erforderlich machen, welches über den Inhalt der gegenständlichen Studie hinausgeht, erfolgt die Analyse des technischen Potenzials aufgrund einer bottom-up Betrachtung. Wie unten im Text detailliert ausgeführt, ist eine Abschätzung des technischen Potenzials aufgrund der noch existierenden potenziellen Anlagenstandorte von Kleinwasserkraftwerken möglich. Die in Luxemburg denkbaren Kleinwasserkraftprojekte setzen sich dabei aus dem Neubau eines größeren Werkes, dem Neubau von 50 kleinen Anlagen und der Revitalisierung einiger weniger großer Anlagen des Bestandes zusammen. Das technische Potenzial kann aus diesen Angaben heraus auf einen Wert von 140 GWh/a abgeschätzt werden.

### **Technisches Entwicklungspotenzial der Wasserkraft**

Die technologische Innovation bei Kleinwasserkraftwerken findet heute im Bereich von Verbesserungsinnovationen bei Fernüberwachungsanlagen bzw. bei Anlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik statt. Innovationen sind in diesem Bereich nicht von energiepolitischen Rahmenbedingungen abhängig, sondern werden durch die allgemeine Entwicklung der Computer- bzw. Steuer- u. Regelungstechnik beeinflusst.

Im Bereich der hydraulischen und elektrischen Maschinen finden ebenfalls Neuentwicklungen statt, wobei das Entwicklungspotential durch den bereits sehr hohen technischen Standard gekennzeichnet ist. Verbesserungsinnovationen sind im Bereich der klassischen hydraulischen und elektrischen Maschinen deshalb meist nur auf inkrementelle Wirkungsgradverbesserungen beschränkt. Jedoch besitzen Neuanlagen wesentlich höhere Wirkungsgrade als ältere Anlagen und können das

Wasserdargebot in vielen Fällen aufgrund höherer Ausbauwassermengen in eine höhere Jahresarbeit umsetzen. Dieselben Aspekte treffen auf die Fertigungsverfahren zu, welche zur Herstellung der wesentlichen Komponenten von Kleinwasserkraftanlagen verwendet werden. Eine Kostendegression ist aufgrund von maßgeschneiderten Lösungen aus der Sicht des Anlagenbaus kaum zu erzielen.

Der Markt für Kleinwasserkraftanlagen wurde in den vergangenen Jahren durch die energiepolitischen Rahmenbedingungen im europäischen Raum belebt. Vor allem im Bereich der Anlagenrevitalisierungen wurden Anreize zu neuen Investitionen geschaffen. Dem gegenüber treten die verschärften ökologisch-juristischen Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb von Kleinwasserkraftanlagen als diffusionshemmende Faktoren in Erscheinung. Die in der Wasserrahmenrichtlinie (European Commission (2000)) definierten Restwassermengen und zusätzlichen baulichen Einrichtungen wie Fischaufstiegshilfen stellen vor allem für kleine Anlagen wirtschaftlich existenzielle Faktoren dar. Eine zusätzliche Investitionsunsicherheit ist zurzeit durch die Möglichkeit gegeben, dass in bestehende Wasserrechte seitens von Behörden eingegriffen werden kann.

Günstige Standorte für Kleinwasserkraftwerke sind in Luxemburg so wie in allen anderen europäischen Ländern natürlich bereits in der Vergangenheit genutzt worden und stehen heute für neue Projekte nicht mehr zur Verfügung. Die Erschließung weniger günstiger Standorte wird durch die aufwendige wasserrechtliche Bewilligung zusätzlich unattraktiv.

Obige Faktoren bewirken gemeinsam, dass der Trend im Bereich der Kleinwasserkraftanlagen heute stark in Richtung Revitalisierung der Anlagen geht und dass die technologischen Lernkurven sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht gesättigt sind, das heißt, dass in absehbarer Zukunft kaum noch Lerneffekte zu erwarten sind. Dennoch auftretende Investitionskostensenkungen bezüglich der technischen Komponenten stehen in der Praxis neuen Aufwendungen z.B. zur Erfüllung komplexer Umweltauflagen zur Einhaltung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie gegenüber.

Die von einer österreichischen Firma entwickelten Konzepte der ökologischen E-COBulb Turbine oder insbesondere der HYDROMATRIX Technologie, welche zusätzliche, bisher für die Kleinwasserkraft nicht nutzbare Standorte erschließen kann, eröffnen neue Chancen im Bereich der (Klein)Wasserkraftnutzung, wobei entsprechende Standorte in Luxemburg nicht lokalisiert werden konnten.

### **Realisierbares Potenzial aus Kleinwasserkraft**

Die Ermittlung des technischen Potenzials baut auf eine Recherche von möglichen

konkreten Kraftwerksprojekten auf. Folgende Projekte können hierbei berücksichtigt werden:

- Ein neues 5 MW-Kraftwerk in Mesenich an der Sauer zwischen Moersdorf und Wasserbillig gelegen
- 1,7 MW Wasserkraft-Gesamtleistung verteilt auf ca. 50 kleine Wasserkraftwerke an bestehenden Wehren (ab 1,2 m Fallhöhe); die Besitzer von ca. 10 Standorten haben Interesse angemeldet;
- Modernisierung/Repowering von älteren größeren Kraftwerken:  
Kraftwerk Esch/Sauer (Inbetriebnahme: 1960, Turbinen wurden 1985 ersetzt, was zu einer Produktionssteigerung von 15% führte)  
Rosport (1960, 2007 soll eine Turbine ersetzt werden, 2008 die zweite)  
Grevenmacher (1964)

Die Realisierung des 5 MW-Kraftwerkes bis 2020 hängt davon ab, ob ein wirtschaftlicher Betrieb im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie möglich sein wird. Das hängt auch vom politischen Willen in Luxemburg und in Deutschland ab (es handelt sich um ein Grenzflusskraftwerk). Die Realisierung des Projekts wurde vom Wasserwirtschaftsamt zumindest nicht ausgeschlossen. In Hinblick auf die realisierbaren Potenziale wird angenommen, dass dieses Projekt bis 2020 durchgeführt werden kann.

Im Hinblick auf die Potenziale bis zum Jahr 2010 wird angenommen, dass 10 Kleinanlagen an bestehenden Wehren errichtet werden können. Bis 2020 können dann weitere Kleinanlagen an insgesamt 50% der Standorte an bestehenden Wehren umgesetzt werden. Das Optimierungspotenzial der größeren älteren Kraftwerke wird bis 2020 umgesetzt. Das zusätzliche Revitalisierungs- bzw. Optimierungspotenzial im Bereich bestehender Kleinanlagen wird gering eingeschätzt (nach Angaben der Luxemburger Energieagentur wurden 23 Kleinwasserkraftanlagen in den vergangenen Jahren revitalisiert).

Als Berechnungsbasis für die neuen Anlagen wird nach Rücksprache mit der Luxemburgischen Energieagentur eine Auslastung aller neuen Wasserkraftwerksanlagen von durchschnittlich 4500 Volllaststunden angenommen.

Wie bereits oben erwähnt ist zurzeit ein energetisches Potenzial aus Kleinwasserkraft in Luxemburg von 102 GWh ausgebaut (Produktion 2005). Dieses bereits realisierte Potenzial kann sich im Sinne eines realisierbaren Potenzials bis 2010 durch die Neuerrichtung von 10 Kleinanlagen und die Umsetzung einer größeren Revitalisierung auf 106 GWh/a erhöhen. Durch die weitere Errichtung von 15 Kleinanlagen, einer Großanlage und der Durchführung von 2 umfangreichen Revitalisierungen kann ein realisierbares Potenzial bis 2020 in der Höhe von 137 GWh/a umgesetzt werden.

## 5.6.2 Kosten der Kleinwasserkraftnutzung

Unter den beschriebenen Voraussetzungen ist es nicht möglich allgemeine Kosten für die Erschließung der letzten verfügbaren Potenziale der Kleinwasserkraftnutzung in Luxemburg anzugeben, da jedes einzelne Projekt individuell betrachtet und bewertet werden muss. Einmal handelt es sich möglicher Weise um die Optimierung der Regelung, bei einem anderen Projekt werden Maschinenteile ersetzt. Bei Neubauten an bestehenden Wehranlagen entfallen Teile der Kosten der wasser-technischen Bauten.

## 5.7 Photovoltaik

Neben der solarthermischen Wärmegewinnung stellt die photovoltaische Stromerzeugung eine weitere Form der Nutzung solarer Strahlungsenergie dar, wobei hierbei die solare Energie mittels Solarzellen direkt in elektrische Energie umgewandelt wird.

### 5.7.1 Allgemeine Aspekte der Photovoltaiknutzung in Luxemburg

Das durchschnittliche solare Strahlungsangebot in Luxemburg, das eine wesentliche Rechengrundlage zur Ermittlung der Potenziale darstellt, ist in Form der monatlichen Globalstrahlung in Tabelle 5-30 dokumentiert.

Tabelle 5-30: Solarstrahlungsangebot in Luxemburg

	Durchschnittliche Globalstrahlung auf die horizontale Fläche	Durchschnittliche Globalstrahlungssummen auf die horizontale Fläche
	in $W/m^2$	in $kWh/m^2$
Januar	29	22
Februar	63	42
März	100	74
April	154	111
Mai	197	147
Juni	221	159
Juli	216	161
August	180	134
September	130	94
Oktober	75	56
November	37	27
Dezember	24	18
Summe		1043

Quelle: Statistik Luxemburg

## 5.7.2 Potenziale aus Photovoltaik in Luxemburg

### Theoretisches Potenzial aus Photovoltaik

Für die Kalkulation des theoretischen Potenzials aus Photovoltaik in Luxemburg werden im Weiteren nur großtechnische netzgekoppelte Photovoltaikanlagen in Betracht gezogen. Das theoretische Potenzial ergibt sich aus dem theoretischen Strahlungsangebot, der für den Einsatz der Technologie zur Verfügung stehenden Landesfläche und der Konversionstechnologie.

Die mittlere flächenspezifische Globalstrahlungssumme für Luxemburg beträgt 1.043 kWh/m<sup>2</sup> pro Jahr. Die Landesfläche von Luxemburg beträgt insgesamt 2.586 km<sup>2</sup>. Im Sinne der Kumulierbarkeit auch von theoretischen Potenzialen kann nicht die gesamte Landesfläche zur Kalkulation eines theoretischen Photovoltaikpotenzials herangezogen werden. Die gesamte Waldfläche von Luxemburg wurde bereits im Bereich der festen Biomasse in Rechnung gestellt, die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche wurde zur Produktion von Energiepflanzen herangezogen. Es verbleiben restliche Flächen von 424 km<sup>2</sup> (urbane Flächen, Verkehrsinfrastruktur, private Flächen welche nicht in die zuvor genannten Kategorien fallen), welche prinzipiell zur Kalkulation des theoretischen Potenzials aus Photovoltaik herangezogen werden können. Wie bereits eingangs angedeutet, kommt es bei dieser Technologie jedoch zu einer Flächenkonkurrenz mit der solarthermischen Nutzung der Sonnenenergie. Aus diesem Grund werden 50% der restlichen Flächen als Berechnungsbasis herangezogen, also 212 km<sup>2</sup>. Weiters wird ein mittlerer Verstromungswirkungsgrad der Photovoltaikanlagen (monokristallines Silizium) von 15% angenommen. Daraus ergibt sich ein theoretisches energetisches Potenzial aus Photovoltaik für Luxemburg von 33.167 GWh/a.

### Technisches Potenzial aus Photovoltaik

Das technische Potenzial aus Photovoltaik resultiert aus den für die Installation von Photovoltaikmodulen tatsächlich in der Praxis verfügbaren Flächen, dem regional unterschiedlichen Strahlungsangebot und der eingesetzten Anlagentechnik. Als wesentliche Randbedingung der Kalkulation gilt, dass eine Flächenkonkurrenz mit solarthermischen Anwendungen mit dem Faktor 0,5 berücksichtigt wird, das heißt, es stehen jeweils gleiche Flächen für Photovoltaik und Solarthermie zur Verfügung, sofern diese Flächen auch tatsächlich für beide Technologien nutzbar sind.

Der kritische Punkt bei der Abschätzung des technischen Potenzials ist somit eine praxisrelevante Einschätzung des technischen Flächenpotentials. Das Flächenpotential für Photovoltaik setzt sich typischer Weise aus folgenden möglichen Installationsflächen zusammen:

**Dachflächen von Gebäuden:** Aus unterschiedlichen Gebäudestatistiken (z.B. Bulletin du STATEC) kann für Luxemburg ein Gesamtgebäudebestand für das Jahr 2005 von ca. 127.000 Gebäuden ermittelt werden. Aus den Angaben über die Gebäudenutzflächen kann unter Berücksichtigung mehrgeschossiger Bauten die Gesamtdachfläche abgeschätzt werden. Diese ergibt sich zu 21,3 Mio. m<sup>2</sup>, wobei der Kontrollwert pro Gebäude 168 m<sup>2</sup> beträgt, was für diese Abschätzung realistisch erscheint. Nach der landesüblichen Dachkonstruktion als Sattel- oder Walmdach kann der Südsektor der Dachfläche und zu geringen Anteilen der Ost- und Westsektor zur Integration oder Aufständigung der Photovoltaikmodule herangezogen werden. Das technische Flächenpotential wird aus diesem Grund mit einem Korrekturfaktor von 0,6 multipliziert, wodurch sich ein Flächenpotential auf Dachflächen von 12,8 Mio. m<sup>2</sup> ergibt. Da dieses Flächenpotenzial prinzipiell sowohl durch Photovoltaik als auch durch Solarthermie genutzt werden kann, wird diese Fläche im Weiteren noch halbiert. Das Flächenpotenzial für Photovoltaik in Luxemburg wird somit auf ca. 6,4 Mio. m<sup>2</sup> eingeschätzt. Das technische energetische Potenzial aus Photovoltaik auf Dächern in Luxemburg ergibt sich in der Folge zu 1002 GWh/a.

**Gebäudefassaden:** Die solare Einstrahlung auf die vertikale Fläche ist als Jahressumme geringer als jene auf die horizontale Fläche. Die Globalstrahlungssumme auf die nach Süden orientierte vertikale Fläche beträgt in Luxemburg im Mittel 843 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Aus Gründen der technischen Effizienz können zur Anbringung von Photovoltaikmodulen prinzipiell nur nach Süden orientierte Fassadenteile verwendet werden, welche keiner Verschattung oder Teilbeschattung unterliegen und außerdem keiner anderen funktionalen Verwendung unterliegen (Fenster, Türen, Loggien,...). Das technische Flächenpotential zur Nutzung von Solarstrahlung auf vertikalen Gebäudeflächen wird unter Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren auf ca. 543.000 m<sup>2</sup> eingeschätzt, wobei die getroffenen Annahmen den hohen Verschattungsanteil der Fassaden vor allem im städtischen Bereich berücksichtigen. Dieses Flächenpotenzial kann wiederum mittels Photovoltaik oder Solarthermie genutzt werden, was in der Kalkulation zur Halbierung des Flächenpotenzials für die Photovoltaik führt. Das technische energetische Potenzial aus Photovoltaik auf Fassaden in Luxemburg ergibt sich in der Folge zu 60 GWh/a.

**Freiflächen:** Bei der Abschätzung der für die technische Installation von Photovoltaik zur Verfügung stehenden Freifläche müssen die Flächenkonkurrenzen zu weiteren Erneuerbaren Energieträgern beachtet werden. Waldflächen und landwirtschaftliche Nutzflächen (sowohl Ackerland als auch Wiesen und Weiden) zur Kalkulation aus diesem Grund nicht mehr herangezogen werden. Die verbleibende Landesfläche Luxemburgs mit einer Fläche von 420 km<sup>2</sup> setzt sich aus urbanen Räumen, Verkehrsflächen und privat genutzten Flächen (z.B. Gärten) zusammen. Besonders die urbanen Räume wurden im Bereich der Dach- und Fassadennut-

zung bereits berücksichtigt. Grünflächen wurden im Zusammenhang mit der Berechnung des Grünschnittpotenzials berücksichtigt. Es verbleiben somit vor allem Flächen der Verkehrsinfrastruktur welche durch Nutzung der Randflächen oder auch Überdachung mittels Photovoltaik genutzt werden kann. Weiters können nicht im Bereich der Grünschnittkalkulation berücksichtigte Grünflächen genutzt werden bzw. es kann eine Doppelnutzung (Photovoltaik und Grünschnitt) mittels aufgeständerten Photovoltaikanlagen auf Nachführungssystemen (sog. „movern“) erfolgen. Die genannten Flächen weisen keine Flächenkonkurrenz zur Solarthermie auf, da der Wärmetransport vom Ort der Produktion zum Ort des Bedarfs in der Praxis nicht möglich wäre. Das Flächenpotential für Photovoltaik aus diesem Bereich wird auf 10% der soeben diskutierten „sonstigen Flächen“, also auf 42 km<sup>2</sup> eingeschätzt. Bei dieser Zahl handelt es sich um ein technisches Flächenpotential, welches keine Aussagen über eine wirtschaftliche Machbarkeit enthält. Dieses Flächenpotential entspricht einem Energieertrag von 6571 GWh/a.

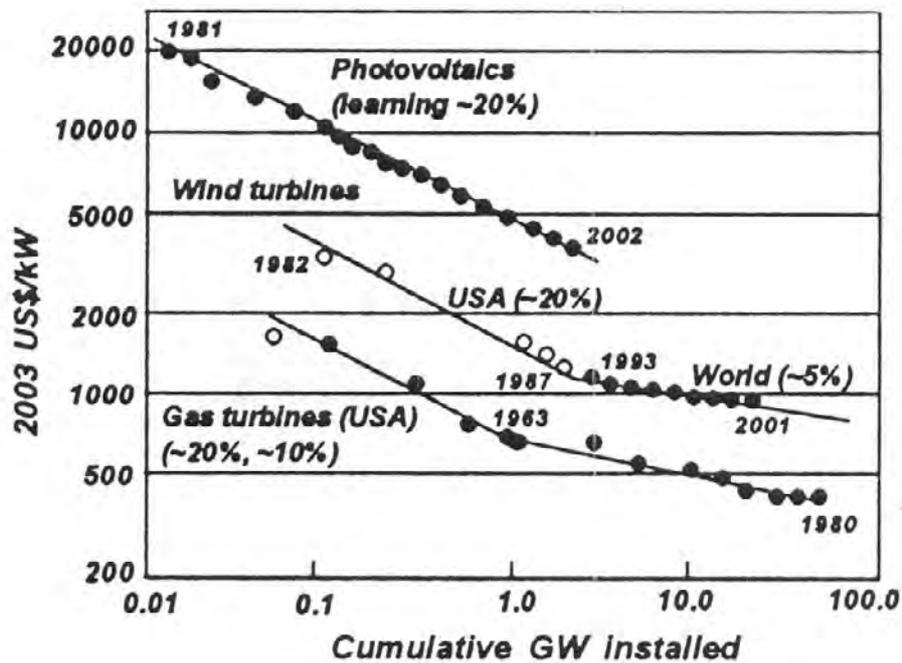
In Summe kann das technische Potenzial für Photovoltaik in Luxemburg mit 7.607 GWh/a angegeben werden.

### **Technisches Entwicklungspotenzial der Photovoltaik**

Im Bereich der zukünftigen technologischen Entwicklung zeichnet sich eine anwendungsspezifisch breit gestreute Palette an Lösungen ab. Es werden alle Anlagengrößen und alle Anwendungsbereiche weiterentwickelt. Die Einsatzbereiche der Photovoltaik reichen dabei von Kleinstanwendungen im Bereich des Batterieersatzes bei Kleinstgeräten über kleine Insel-Stromversorgungsanlagen und netzgekoppelte Kleinanlagen bis zu photovoltaischen Kraftwerken. Kurz- bis mittelfristige Forschungsbereiche sind beispielsweise in der Gebäudeintegration von Photovoltaik zu sehen, ein mittel- bis langfristiges Thema stellt die Rolle der Photovoltaik in einer Wasserstoffwirtschaft dar.

Ein weiterer Forschungsbereich betrifft Netzdienstleistungen, welche durch den Einsatz von Wechselrichtern möglich sind. Wechselrichter können diesbezüglich zu einem aktiven Element in der Netztechnik werden und beispielsweise Aufgaben der Stabilisierung oder Blindleistungsbereitstellung übernehmen.

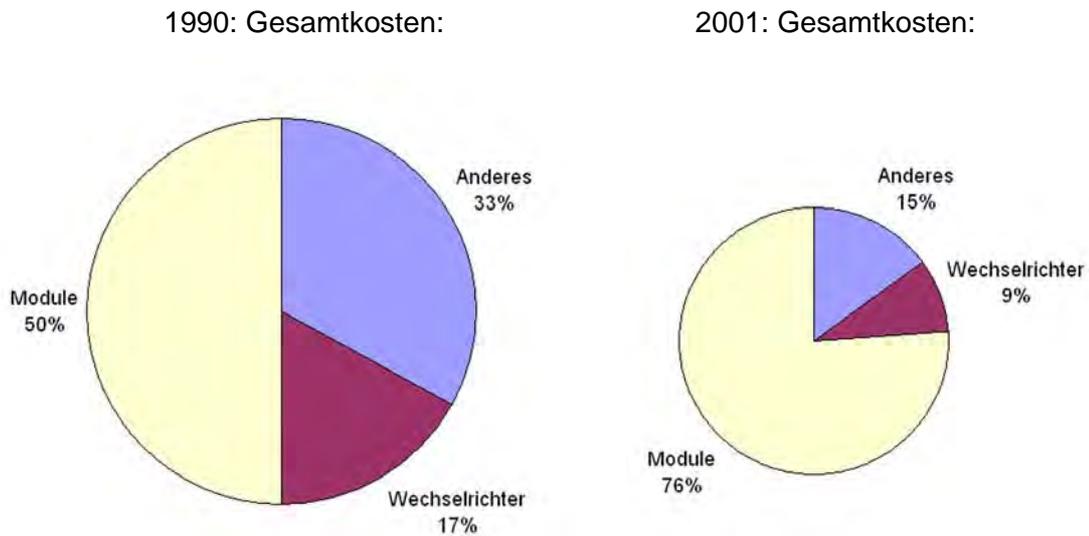
Die Lernkurve der Photovoltaik war in der Vergangenheit durch eine 20 %-ige Kostenreduktion je Marktverdopplung geprägt. Der aktuelle Wert der Kostenreduktion beträgt 18 % je Marktverdopplung, wobei das Marktwachstum 30 % pro Jahr beträgt. Diese internationalen Lerneffekte sind in Abbildung 5-29 dargestellt.



Quelle: Green (2005)

Abbildung 5-29: Lernkurve der Photovoltaik-Technologie im Vergleich mit anderen Technologien

Ökonomische Lerneffekte werden auch in der Arbeit von Haas (2004) dokumentiert. Ein generell zu beobachtender Trend ist die Verschiebung der relativen Anteile der Investitionskosten hin zu den Modulen. Die weiteren Komponenten der Photovoltaikanlagen wie die Wechselrichter, weitere Elektronikkomponenten oder die Dachintegrationskomponenten haben sich in der jüngeren Vergangenheit wesentlich rascher verbilligt, als dies bei den Modulen der Fall war. Dennoch haben sich die Investitionskosten für Photovoltaikanlagen von 1990 auf 2001 mehr als halbiert. Machten die Photovoltaikmodule im Jahr 1990 ca. 50 % der Gesamtinvestitionskosten aus, so sind es im Jahr 2001 bereits 76 %. Im selben Zeitraum sinken die spezifischen Investitionskosten von ca. 15.000 Euro pro  $\text{kW}_{\text{peak}}$  auf 6500 Euro pro  $\text{kW}_{\text{peak}}$ . Die entsprechenden Verhältnisse sind in Abbildung 5-30 dargestellt.



Quelle: Haas (2004)

Abbildung 5-30: Entwicklung der durchschnittlichen Kostenstrukturen von Photovoltaikanlagen im deutschen Photovoltaikmarkt

### Realisierbares Potenzial aus Photovoltaik

Die Entwicklung der Marktdiffusion von Photovoltaik in Luxemburg ist durch die historisch kurze aber intensive Förderung dieser Technologie geprägt. Binnen weniger Jahre wurden in Luxemburg ca. 1800 Anlagen<sup>37</sup> errichtet, wobei alleine durch den ausgelösten Photovoltaikboom binnen 3 Jahren Anlagen mit einer installierten Gesamtleistung von 23 MW errichtet wurden. Die Förderung wurde aufgrund dieser Entwicklungen in den Jahren 2002 bis 2004 im Jahr 2005 umgestaltet und bis zum Jahr 2007 mit einer Quote von 3 MW für den Bereich der privaten Anlagen belegt. Kommunale Anlagen wurden nicht über eine Quote geregelt, sondern diese erhalten bis zum Jahr 2007 einen niedrigeren Einspeisetarif von 28 Cent/kWh. Diese Umstellung der Förderung sowie die Überförderung speziell von Großanlagen in der Vergangenheit brachten einen dramatischen Imageverlust der Technologie mit sich. Nach Umstellung der Förderung im Jahr 2005 wurde nur eine sehr geringe Zahl von Anlagen zur Förderung eingereicht. Im Jahr 2005 wurde laut CEGEDEL der Netzanschluss von lediglich 10 Photovoltaikanlagen beantragt. Laut Umweltverwaltung wurde nach der aktuellen Verordnung (seit 2005 in Kraft) erst 1 Anlage zur Förderung eingereicht.

<sup>37</sup> Die exakte Anlagenzahl ist aus statistischen Gründen nicht bekannt.

Die weitere Entwicklung der Photovoltaik in Luxemburg (aber auch generell) ist in höchstem Maß von der jeweiligen Förderlandschaft abhängig. Sicherlich ist das Luxemburger Beispiel der historischen Photovoltaikförderung überdeutlich, die Diffusion dieser Technologie ist aber in jedem Fall von der energiepolitischen Zielvorstellung abhängig. Es ist also schwierig, in Hinblick auf ein realisierbares Potenzial für den Zeithorizont 2010 und 2020 einen konkreten Wert zu nennen, da dieser von der verfolgten energiepolitischen Gesamtstrategie und der entsprechenden Verteilung der beschränkt verfügbaren Mittel auf anreizorientierte Instrumente abhängt. Es ist somit eine Rückkopplung der Studienergebnisse, welche im Zuge der gegenständlichen Studie erarbeitet werden auf die realisierbaren Potenziale gegeben.

Eine Investition von Privatpersonen in PV ist unter den aktuellen Rahmenbedingungen immer noch rentabel (die Rahmenbedingungen wurden mit einer Kapitalrückflusszeit von 14 a für eine kleine PV-Anlage kalkuliert), jene potenziellen Investoren, welche unter diesen Randbedingungen (implizierte Verzinsung des Kapitals) investieren würden, haben natürlich bereits zu einem bestimmten Anteil im Zuge des Photovoltaikbooms investiert. Dennoch sollte eine bessere Kommunikation dieser Sachlage die Diffusionsrate sogar unter bestehenden Rahmenbedingungen wieder ansteigen lassen.

Da die weitere Technologiediffusion der Photovoltaik in Luxemburg stark von den zukünftigen energiepolitischen Rahmenbedingungen abhängen wird, werden im Folgenden 2 Szenarien für die realisierbaren Potenziale aus Photovoltaik in Luxemburg gerechnet und dokumentiert. Dies ist einerseits ein konservativer Ansatz und andererseits ein ambitionierterer Ansatz, wobei die Ergebnisse eine Bandbreite der möglichen Entwicklung angeben.

### **Konservativer Ansatz**

Für den Zeitraum bis 2010 wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2007 die Depression der Technologiediffusion im Bereich Photovoltaik in Luxemburg andauert (möglicher Zeitpunkt einer Anpassung und vor allem einer neuen Kommunikation des Fördersystems. Für die Jahre 2008 bis 2010 wird angenommen, dass das Anreizsystem so ausgestaltet werden kann, dass die momentan bestehende Quote von 3 MW/a für kleine Anlagen auch tatsächlich erfüllt werden kann. Es kommen somit im Jahr 2010 zum Wert des Status quo 9 MW installierte Photovoltaikleistung hinzu. Dies entspricht einem realisierbaren Potenzial von Photovoltaik in Luxemburg im Jahr 2010 von insgesamt 26 GWh/a.

Für den Zeitraum von 2010 bis 2020 wird eine ambitioniertere energiepolitische Vorgabe angenommen, welche zu einer konstanten Diffusion von 3 MW Photovol-

taik pro Jahr in Form von privaten Kleinanlagen und 1 MW pro Jahr in Form von größeren kommunalen Anlagen führt. Insgesamt wird also in diesem Zeitraum von einer konstanten Diffusion von 4 MW/a ausgegangen. Das energetische realisierbare Potenzial aus Photovoltaik beträgt unter dieser Voraussetzung im Jahr 2020 59 GWh/a.

### **Ambitionierter Ansatz**

Der ambitionierte Ansatz geht nicht wie der konservative Ansatz von konstanten Zubauraten aus, sondern geht von Wachstumszahlen aus. Es wird angenommen, dass bis zum Jahr 2010 ein Wachstum der installierten Photovoltaik in Luxemburg mit 18 %/a erfolgt und in der Periode 2010 bis 2020 dieses Wachstum 15 %/a beträgt (abnehmende Wachstumsraten). Diese Annahmen führen zu einem energetischen Potenzial aus Photovoltaik in Luxemburg von 43 GWh/a im Jahr 2010 und 176 GWh/a im Jahr 2020. Der jährliche Zubau im Jahr 2020 beträgt in diesem Ausbauszenario 28,4 MW/a und übersteigt damit den Wert der bis zum Jahr 2005 (inklusive) insgesamt in Luxemburg installierten Photovoltaikleistung von ca. 24 MW.

### **5.7.3 Kosten der Photovoltaiknutzung**

Die zu erwartenden Kosten der Technologie sowie die zu erwartenden Trends wurden bereits im Abschnitt "Technisches Entwicklungspotenzial der Photovoltaik" dokumentiert. Im Bereich der Kosten ist auch von Interesse, dass durch eine suboptimale Fördervergabe in der Regel höhere spezifische Anlagenkosten induziert werden, da sich alle Marktteilnehmer strategisch verhalten.

Generell ist eine Kostendegression mit der Anlagengröße feststellbar. Neubarth und Kaltschmitt (2000) führen folgende spezifische Anlagenkosten für Photovoltaikanlagen unterschiedlicher Leistungsklassen an:

1 kW-Anlage	8500 Euro/kW
5 kW-Anlage	6500 Euro/kW
20 kW-Anlage	5450 Euro/kW
100 kW-Anlage	5062 Euro/kW

Aus der Sicht der (volkswirtschaftlichen) Kosten macht es also Sinn, energiepolitische Strategien zur Realisierung großer Anlagen zu entwickeln, wobei aus der Sicht der Flächenpotentiale in Hinblick auf die schwerpunktmäßige Nutzung von Dachflächen hier auch technische Restriktionen wirken.

## 5.8 Solarthermie

Die solarthermische Wärmegewinnung stellt neben der photovoltaischen Stromerzeugung eine weitere Form der direkten Nutzung solarer Strahlungsenergie dar. Die solare Strahlung wird hierbei mit unterschiedlichen Arten von Solarkollektoren in Wärme umgewandelt, wobei diese Wärme typischer Weise im Bereich der Warmwasserbereitung und/oder Raumwärmebereitstellung eingesetzt wird. Mit konzentrierenden Systemen sind prinzipiell auch höhere Temperaturniveaus erreichbar, die einen Einsatz solarer Wärme im Prozesswärmebereich ermöglichen.

### 5.8.1 Allgemeine Aspekte der Solarthermie

Als typische Konversionstechnologien stehen folgende Kollektortypen zur Verfügung:

1. **Der Flachkollektor:** der heute mit großem Abstand am häufigsten eingesetzte Kollektortypus<sup>38</sup>. Ein in einem flachen kastenartigen Korpus befindlicher, mit einem Wärmeträgermedium durchströmter Metallblechabsorber wird durch eine Glasabdeckung hindurch mit Sonnenlicht bestrahlt, wobei der Metallblechabsorber dabei auf einer Wärmedämmung zur Reduktion der Transmissionsverluste ruht. Es erfolgt die Nutzung von Direkt- und Diffusstrahlung im Niedertemperaturbereich. Typische Anwendungen sind die Warmwasserbereitung und die (teil)solare Raumheizung.
2. **Der Vakuumrohrkollektor:** ein vergleichsweise selten eingesetzter Kollektortyp, der mittels konzentrierendem System und Vakuumisolation Wärmeauskopplung auf hohem Temperaturniveau ermöglicht. Mit einem Wärmeträgermedium durchströmte Absorberelemente liegen hierfür in der Achse evakuierter und halbseitig verspiegelter Glasrohre. Typische Anwendungen dieses Kollektortyps sind jene, welche höhere Temperaturniveaus erforderlich machen. In Luxemburg werden Vakuumrohrkollektoren oftmals in Verbindung mit der teil-solaren Raumheizung eingesetzt.
3. **Der Kunststoffabsorber:** der Standardkollektortyp für die Schwimmbaderwärmung. Der Kunststoffabsorber wird hierbei ohne Abdeckungs- und Isolierungsmaßnahmen mit Sonnenlicht bestrahlt und ist für die Bereitstellung von Wärme auf geringem Temperaturniveau ausgelegt.

---

<sup>38</sup> Die im Jahr 2004 in Österreich neu installierten solarthermischen Anlagen bestehen zu ca. 94 % aus Flachkollektoren, 5 % entfallen auf den Kunststoffabsorber (Schwimmbadabsorber) und nur ca. 1 % der Kollektorfläche entfällt auf den Vakuumrohrkollektor.

4. **Der Luftkollektor:** obwohl erst einige Anlagen umgesetzt sind, könnte gerade die Kombination mit der kontrollierten Wohnraumlüftung, aber auch die Erwärmung von großvolumigen Bauten ein großer Zukunftsmarkt sein. Das technologische Spektrum reicht hier von metallischen und Kunststoffabsorbern bis zu textilen Absorbern, wobei die entstehende Wärme auf unterschiedliche Art und Weise abtransportiert werden kann.

## 5.8.2 Potenziale aus Solarthermie

### Theoretisches Potenzial aus Solarthermie

Das theoretische Potenzial aus Solarthermie in Luxemburg ergibt sich, ähnlich wie bei der Kalkulation des Potenzials aus Photovoltaik, aus dem theoretischen Strahlungsangebot, der für den Einsatz von Photovoltaik theoretisch zur Verfügung stehenden Landesfläche von Luxemburg und Kennzahlen der Konversionstechnologie. Das durchschnittliche Strahlungsangebot auf die horizontale Fläche, das bei der Analyse der Photovoltaik auf Monatsbasis dargestellt wurde, beträgt für Luxemburg im Mittel  $1043 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ .

Zur Kalkulation des theoretischen Potenzials wird im Weiteren angenommen, dass zu 100% der Kollektortyp des selektiven Flachkollektors zum Einsatz gelangt. Praktisch gemessene Nutzwärmeerträge von unterschiedlichen Kollektortypen in Österreich sind in Tabelle 5-31 dokumentiert. Da die klimatischen (strahlungstechnischen) Randbedingungen der untersuchten Anlagen ähnlich den luxemburger Verhältnissen sind, werden diese Zahlen auch für die weitere Kalkulation übernommen.

Tabelle 5-31: Annahmen für die Berechnung des Nutzwärmeertrages<sup>39</sup> von solarthermischen Anlagen

Kollektortyp	Nutzwärmeertrag	
	Betriebsdaten in $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$	Rechenwert in $\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$
Kunststoffabsorber	250 bis 300	300
Flachkollektor	300 bis 400	350
Vakuumrohrkollektor	450 bis 650	550

Quelle: Faninger (2005c)

<sup>39</sup> Als Nutzwärme wird hier jene Wärme verstanden, welche in den Wärmespeicher (Puffer oder Boiler) eingebracht wird. Die angegebenen Werte widersprechen damit nicht der Forderung einer luxemburgischen Verordnung vom 3. August 2005 über einen erforderlichen spezifischen Kollektorsertrag von  $525 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$  da dieser Kennwert nur die Kollektoreffizienz beschreibt.

Die Landesfläche von Luxemburg beträgt 2586 km<sup>2</sup>. Abzüglich der bereits im Bereich der Biomassenutzung verwendeten Flächen und unter Berücksichtigung der Flächenkonkurrenz zur Photovoltaik ergibt sich eine Flächenkalkulationsbasis von 212 km<sup>2</sup>. Aus den oben erläuterten Faktoren ergibt sich in der Folge ein theoretisches energetisches Potenzial aus Solarthermie für Luxemburg von 74.200 GWh/a.

### **Technisches Potenzial aus Solarthermie**

Das technische Potenzial aus Solarthermie resultiert, ähnlich wie bei der Photovoltaik, aus den für die Installation von solarthermischen Kollektoren verfügbaren Flächen, dem regionalen Strahlungsangebot und der eingesetzten Anlagentechnik.

Der kritische Punkt bei der Abschätzung des technischen Potenzials ist, ebenfalls wie bei der Kalkulation des technischen Potenzials für Photovoltaik, die praxisrelevante Einschätzung des technischen Flächenpotentials. Das Flächenpotential für Solarthermie setzt sich aus folgenden möglichen Installationsflächen zusammen:

**Dachflächen von Gebäuden:** Aus unterschiedlichen Gebäudestatistiken (z.B. Bulletin du STATEC) kann für Luxemburg ein Gesamtgebäudebestand für das Jahr 2005 von ca. 127.000 Gebäuden ermittelt werden. Aus den Angaben über die Gebäudenutzflächen kann unter Berücksichtigung mehrgeschossiger Bauten die Gesamtdachfläche abgeschätzt werden. Diese ergibt sich zu 21,3 Mio. m<sup>2</sup>, wobei der Kontrollwert pro Gebäude 168 m<sup>2</sup> beträgt, was für diese Abschätzung realistisch erscheint. Nach der landesüblichen Dachkonstruktion als Sattel- oder Walmdach kann der Südsektor der Dachfläche und zu geringen Anteilen der Ost- und Westsektor zur Integration oder Aufständigung der Photovoltaikmodule herangezogen werden. Das technische Flächenpotential wird aus diesem Grund mit einem Korrekturfaktor von 0,6 multipliziert, wodurch sich ein Flächenpotential auf Dachflächen von 12,8 Mio. m<sup>2</sup> ergibt. Da dieses Flächenpotential prinzipiell sowohl durch Solarthermie als auch durch Photovoltaik genutzt werden kann, wird diese Fläche im Weiteren noch halbiert. Das Flächenpotential für Solarthermie in Luxemburg wird somit auf ca. 6,4 Mio. m<sup>2</sup> eingeschätzt. Das technische energetische Potenzial aus Solarthermie auf Dächern in Luxemburg ergibt sich in der Folge zu 2.241 GWh/a.

**Gebäudefassaden:** Die solare Einstrahlung auf die vertikale Fläche ist als Jahressumme geringer als jene auf die horizontale Fläche. Die Globalstrahlungssumme auf die nach Süden orientierte vertikale Fläche beträgt in Luxemburg im Mittel 843 kWh/(m<sup>2</sup>\*a). Aus Gründen der technischen Effizienz werden zur Anbringung von solarthermischen Kollektoren prinzipiell nur die nach Süden orientierten Fassadenteile in Betracht gezogen. Zusätzlich dürfen diese Gebäudeteile weder einer Verschattung oder Teilbeschattung unterliegen noch für eine andere funktionale Ver-

wendung vorgesehen sein (Fenster, Türen, Loggien,...). Das technische Flächenpotential zur Nutzung von Solarstrahlung auf vertikalen Gebäudeflächen wird unter Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren auf ca. 543.000 m<sup>2</sup> eingeschätzt, wobei die getroffenen Annahmen den hohen Verschattungsanteil der Fassaden vor allem im städtischen Bereich berücksichtigen. Dieses Flächenpotenzial unterliegt wiederum der Flächenkonkurrenz von Solarthermie und Photovoltaik, was in der Kalkulation zur Halbierung des Flächenpotenzials für die Solarthermie führt. Das technische energetische Potenzial aus Solarthermie auf Gebäudefassaden in Luxemburg ergibt sich in der Folge zu 77 GWh/a.

**Freiflächen:** Das Potenzial an Freiflächen für den Einsatz von solar thermischen Anlagen ist restriktiver einzuschätzen, als dies bei der Kalkulation der Photovoltaik der Fall war. Der Unterschied liegt in der Transportierbarkeit der produzierten Endenergie, welche im Fall des elektrischen Stromes kostengünstig und technisch effizient durch eine Einspeisung in das Verteilnetz erfolgen kann, der Standort einer solar thermischen Anlage jedoch weitestgehend an den Ort des entsprechenden Wärmebedarfs gebunden ist. Bei der Abschätzung der, für die technische Installation von Solarthermie zur Verfügung stehenden Freifläche müssen weiters die Flächenkonkurrenzen zu weiteren Erneuerbaren Energieträgern beachtet werden, wobei diese Restriktion durch erstere beinahe auf die Flächenkonkurrenz zur Photovoltaik reduziert wird. Die verbleibende Landesfläche Luxemburgs mit einer Fläche von 420 km<sup>2</sup> setzt sich aus urbanen Räumen, Verkehrsflächen und privat genutzten Flächen (z.B. Gärten) zusammen. Besonders die urbanen Räume wurden im Bereich der Dach- und Fassadennutzung bereits berücksichtigt. Grünflächen wurden im Zusammenhang mit der Berechnung des Grünschnittpotenzials berücksichtigt, jedoch nicht zur Gänze. Zur Installation von solar thermischen Anlagen, welche nicht auf Dach- bzw. Fassadenflächen angebracht werden, eignen sich somit jene Bereiche der Verkehrsinfrastruktur, welche in unmittelbarer Nähe einer möglichen Wärmeabnahme angesiedelt sind und Grünflächen in der Nähe von Gebäuden, welche sich z.B. zur Aufständigung von Kollektoren eignen und einem entsprechenden nahe gelegenen Wärmebedarf gegenüber stehen.

Das Flächenpotential für Solarthermie aus diesem Bereich wird auf 5% der soeben diskutierten „sonstigen Flächen“, also auf ca. 21 km<sup>2</sup> eingeschätzt. Bei dieser Zahl handelt es sich um ein technisches Flächenpotenzial, welches keine Aussagen über eine wirtschaftliche Machbarkeit enthält. Dieses Flächenpotential entspricht einem Energieertrag von 7.420 GWh/a.

In Summe kann das technische Potenzial für Solarthermie in Luxemburg mit 9.738 GWh/a angegeben werden.

## Technisches Entwicklungspotenzial der Solarthermie

Die technologischen Zukunftstrends im Bereich Solarthermie liegen in der stärkeren Diffusion heute noch wenig verbreiteter Anwendungen. So ist bereits kurzfristig in einigen europäischen Ländern ein deutlicher Trend zur verstärkten Heizungseinbindung von solarthermischen Anlagen abzusehen. Dabei wächst die durchschnittliche je "Solarhaushalt" installierte Kollektorfläche von zurzeit ca. 8 m<sup>2</sup> in den kommenden Jahren auf durchschnittlich ca. 18 m<sup>2</sup> an. Eine weitere zukunftssträchtige Anwendung von Solarthermie ist die solare Kühlung. Die Markteinführung dieser Technologie wird in ca. 5 Jahren erwartet und soll eine weitere Vergrößerung der mittleren installierten Kollektorfläche pro solarthermische Anlage mit sich bringen. Denkbar ist in diesem Zusammenhang die Entwicklung von kombinierten Kompaktgeräten, welche die Energiedienstleistungen Warmwasserbereitung, Raumwärmebereitstellung und sommerliche Klimatisierung vereinen.

Die technologische Entwicklung der Kollektoren selbst kann sowohl aus der Sicht des noch verfügbaren technologischen Potenzials (z.B. Absorber- u. Kollektorwirkungsgrade) als auch aus der Sicht der wirtschaftlichen Aspekte (z.B. Lernkurve des Kupferblech-Absorbers) als ausgereizt betrachtet werden. Die Marktanteile der vom einfach verglasten Flachkollektor mit selektiv beschichtetem Absorber abweichenden Kollektortypen wurden in den letzten Jahren sowohl absolut als auch relativ immer geringer und sind nur noch von untergeordneter Bedeutung.

Technologisches Innovationspotenzial ist sicherlich im Bereich der eingesetzten Materialien zu sehen. Hochwertige Rohstoffe wie beispielsweise Kupferbleche könnten aufgrund steigender Weltmarktpreise in Zukunft durch kostengünstigere Materialien substituiert werden. Neue Kollektortypen wie der Luftkollektor stehen am Beginn ihrer Entwicklung.

Innovative Anwendungen bereits verfügbarer Kollekorttechnologie, wie beispielsweise der fassadenintegrierte Kollektor, bieten noch vielgestaltige zukünftige Anwendungsmöglichkeiten und ein hohes technisches Ausbaupotential. Momentan wird die Montage der Flachkollektoren in EU-Ländern jeweils zur Hälfte auf der Dachhaut und dachintegriert durchgeführt. Fassadenintegrierte Kollektoren sind noch die Ausnahme.

Die Lernkurven von Flachkollektoren zeigen im Zeitraum von 1995 bis 2004 (Zeitraum 10 Jahre) eine Kostensenkung von ca. -35 % bei einer gleichzeitigen Wirkungsgradsteigerung um 25 %. Dies bedeutet, auf die Marktentwicklung umgelegt, einen ökonomischen Lerneffekt von ca. -29 % je Marktverdopplung. Mittelfristig kann die ungebrochene Fortsetzung dieses Trends nicht erwartet werden, da die Produktion dieser Technologie mittlerweile auf eine großindustrielle Basis gestellt

wurde und weitere Effizienzsteigerungen im Bereich der Produktion und im Bereich des Produktdesigns dadurch kaum mehr erwartet werden können. Ein ökonomisches Lernpotenzial liegt im Bereich von Systeminnovationen, wie sie beispielsweise von der Weiterentwicklung von Luftkollektoren erwartet werden könnten oder im Bereich des Einsatzes von kostengünstigeren Rohstoffen.

Aus der Sicht der Gesamt-Systemkosten werden vor allem im Bereich der Installateure Lerneffekte durch die sukzessive Senkung von Transaktionskosten wirksam. Diese werden vor allem im Bereich der frühen Technologiediffusion als starkes Hemmnis der Marktentwicklung angesehen, was in Luxemburg noch zum Tragen kommen könnte. Die langsam wirkenden Instrumente der Erwachsenen- bzw. Expertenbildung bezüglich innovativer Technologien (z.B. Ausbildung zum Solarinstallateur, Energieberater,...) zeigen jedoch nach internationaler Erfahrung ihre Wirkung.

### **Realisierbares Potenzial aus Solarthermie**

Das realisierbare Potenzial aus Solarthermie wird im betrachteten Zeitraum bis zum Jahr 2020 durch die Restriktion des technischen Potenzials bei der Anwendung realistischer Fördermechanismen nicht begrenzt. Die Unterstützung der Marktdiffusion von Solarthermie hat in Luxemburg auch in Hinblick auf die Kitzoziele des Landes interessante Auswirkungen, da mit Solarwärme vor allem Heizöl und Erdgas in den Energiedienstleistungsbereichen Warmwasserbereitung und Raumwärme substituiert werden.

Eine Verstärkung der Diffusionsraten erscheint insbesondere deshalb realistisch, da Solarthermie in Luxemburg eine bereits in den Markt eingeführte Technologie darstellt und die sehr frühe Phase der Markteinführung bereits überschritten wurde. Ein kombinierter Ansatz aus informatorischen und anreizorientierten Instrumenten bewirkt hier eine weitere Steigerung der Marktdiffusion.

Der Status quo 2005 bezüglich der in Luxemburg installierten solar thermischen Anlagen wird von den in Tabelle 5-32 dargestellten Daten abgeleitet. Im Zeitraum von 2001 bis Ende 2005 wurden in Luxemburg insgesamt 749 solar thermische Anlagen mit einer Gesamtfläche von ca. 5.600 m<sup>2</sup> bezuschusst. Die Entwicklung der Anzahl der bezuschussten Anlagen verlief dabei unstetig. Im Jahr 2005 wurden deutlich weniger Anlagen gefördert als in den 3 Jahren davor. Der Schluss liegt dabei nahe, dass die Umstellung des Fördersystems hier Einfluss genommen hat.

Zusätzlich zu den dokumentierten bezuschussten Anlagen von Privatpersonen wurden im Zeitraum 1998 bis 2005 in Summe 15 kommunale solar thermische Anlagen errichtet, welche über das PEEC-Programm bzw. über den Umweltschutz-

fonds (fonds pour la protection de l'environnement) bezuschusste wurden.

Tabelle 5-32: Über die Verordnung vom 17. Juli 2001 und die Verordnung vom 3. August 2005 bezuschusste solar thermische Anlagen von Privatpersonen in Luxemburg

Jahr	Anlagen ohne Heizungseinbindung			Anlagen mit Heizungseinbindung			Alle Anlagen		
	m <sup>2</sup>	Stk	m <sup>2</sup> /Stk	m <sup>2</sup>	Stk	m <sup>2</sup> /Stk	m <sup>2</sup>	Stk	m <sup>2</sup> /Stk
2001	346	68	5,1	271	31	8,7	617	99	6,2
2002	764	132	5,8	636	60	10,6	1.400	192	7,3
2003	767	128	6,0	374	43	8,7	1.141	171	6,7
2004	653	123	5,3	1.100	63	17,5	1.753	186	9,4
2005	298	55	5,4	385	46	8,4	683	101	6,8
Summe	2.828	506		2.766	243		5.593	749	

Quelle: Umweltverwaltung

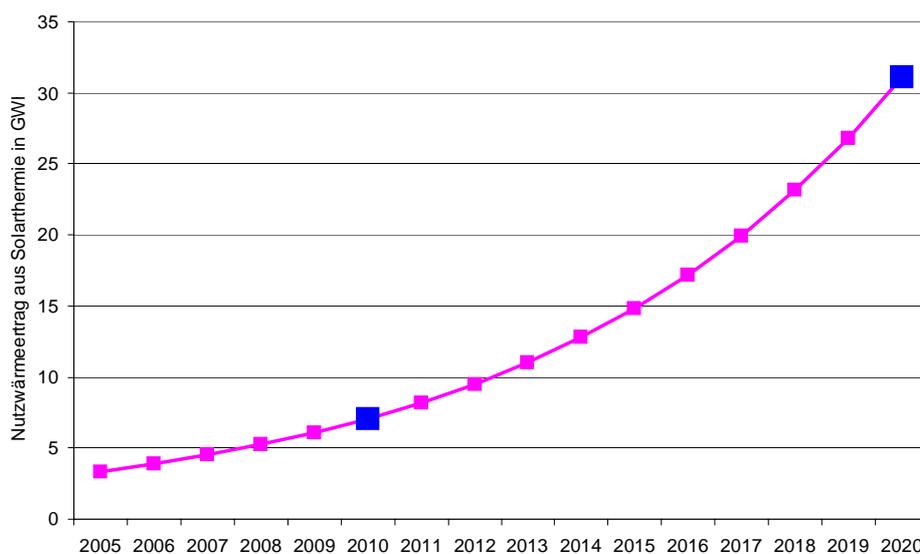
Über den Zeitraum vor 2001 bei privaten Anlagen bzw. über den Zeitraum vor 1998 bei kommunalen Anlagen liegen keine statistischen Aufzeichnungen vor. Weiters ist mit einer gewissen Anzahl von Anlagen zu rechnen, welche nicht um Bezuschussung angesucht haben. Der EuroObservER (2005) nennt eine kumulierte Kollektorfläche in Luxemburg für das Jahr 2004 von 11.500 m<sup>2</sup>. Diese Zahl erscheint angesichts der verfügbaren disaggregierten Daten als hoch gegriffen, zumal der Diffusionsgrad dieser Technologie vor den Zeiten der hier dargestellten Aufzeichnungen laut der Aussage von luxemburgischen Experten sehr gering war. Zur Abschätzung des Status quo für das Jahr 2005 wurde deshalb angenommen, dass im Zeitraum vor 2001 bereits eine Kollektorfläche von 848 m<sup>2</sup> im Bereich der Anlagen ohne Heizungseinbindung und 277 m<sup>2</sup> im Bereich der Anlagen mit Heizungseinbindung installiert waren. Die Anlagen welche in Zeiträumen der prinzipiellen Möglichkeit einer Bezuschussung ohne Bezuschussung errichtet wurden, wurden mit 1804 m<sup>2</sup> eingeschätzt. Insgesamt ergibt dies eine Einschätzung des Status quo für das Jahr 2005 von 9603 m<sup>2</sup> Kollektorfläche bzw. einem energetischen Ertrag dieser Anlagen von 3 GWh.

Da die weitere Technologiediffusion der Solarthermie in Luxemburg stark von den zukünftigen energiepolitischen Rahmenbedingungen abhängen wird, werden im Folgenden, wie dies schon bei der Photovoltaik durchgeführt wurde, 2 Szenarien für die realisierbaren Potenziale aus Solarthermie in Luxemburg gerechnet und dokumentiert. Dies sind einerseits ein konservativer Ansatz und andererseits ein ambitionierter Ansatz, wobei die Ergebnisse eine Bandbreite der möglichen Entwicklung angeben.

### Konservativer Ansatz

Für die weitere Marktdiffusion der Solarthermie in Luxemburg kann eine Obergrenze im Bereich der neu errichteten Gebäude gesehen werden, da zurzeit äußerst wenige Anlagen im Bereich des Gebäudebestandes realisiert werden. Ein Richtwert sind hier 1000 Einfamilienhäuser welche typischer Weise pro Jahr in Luxemburg neu errichtet werden. Die vergangenen Jahre wiesen Diffusionsraten von ca. 180 Anlagen oder ca. 1.500 m<sup>2</sup> Kollektorfläche pro Jahr auf.

Abbildung 5-31 ist das im Weiteren verwendete konservative Wachstumsszenario für die Diffusion der Solarthermie in Luxemburg dargestellt. Es geht von einem exponentiellen Diffusionsverlauf mit dem Startwert des Status quo im Jahr 2005 aus und entwickelt sich bis zum Jahr 2020 zu einer jährlich neu installierten Kollektorfläche von 12.300 m<sup>2</sup> pro Jahr. Dies würde bedeuten, dass im Jahr 2020 auf jedem der hypothetisch 1000 neu errichteten Einfamilienhäuser ein Kollektor von 12,3 m<sup>2</sup> Fläche installiert wird, welcher folglich zur teilsolaren Raumheizung eingesetzt wird. Das jährliche Wachstum beträgt in diesem Szenario 16 %/a.



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 5-31: Szenario zur weiteren Diffusion der Solarthermie in Luxemburg bis 2020

Da eine 100%ige Ausstattung des gesamten Einfamilien-Hausbaues im Jahr 2020 mit großen Kollektorflächen unrealistisch erscheint (z.B. ist auf einem Passivhaus ein großer Kollektor nicht unbedingt technisch sinnvoll), wird in diesem Szenario damit gerechnet, dass auch ein Anteil der ausgewiesenen Kollektorflächen im Gebäudebestand installiert wird. Obwohl dies zurzeit eine unübliche Praxis in Luxem-

burg darstellt, kann angenommen werden, dass sich die entsprechende „Baukultur“ im betrachteten Zeitabschnitt diesbezüglich ändern wird. Die realisierbaren energetischen Potenziale im Bereich solar thermischer Anlagen betragen demnach im konservativen Szenario im Jahr 2010 einen Wert von 7 GWh und im Jahr 2020 einen Wert von 31 GWh.

### **Ambitionierter Ansatz**

Im ambitionierten Szenario wird von einer jährlichen Wachstumsrate der Marktdiffusion der Solarthermie in Luxemburg von 25 %/a ausgegangen. Diese Wachstumsrate bewirkt ein energetisches Potenzial aus Solarthermie in Luxemburg von 10 GWh/a im Jahr 2010 und 96 GWh/a im Jahr 2020. Dies bedeutet einen jährlichen Neubau von solarthermischen Anlagen im Jahr 2010 von ca. 5900 m<sup>2</sup>/a und im Jahr 2020 von 54.600 m<sup>2</sup>/a. Dies würde in Hinblick auf die Umsetzung der genannten Potenziale bedeuten, dass bereits im Jahr 2010 jedes in Luxemburg neu errichtete Einfamilienhaus ohne Ausnahme eine solarthermische Anlage von knapp 6 m<sup>2</sup> aufweisen müsste und dass im Jahr 2020 über diese Annahme hinaus pro Jahr auch noch 8.100 Haushalte im Gebäudebestand mit einer jeweils 6 m<sup>2</sup> großen solarthermischen Anlage ausgestattet werden müssten.

### **5.8.3 Kosten der Solarthermie**

Die Investitionskosten für solarthermische Anlagen bewegen sich in Abhängigkeit von der Systemgröße sowie der eingesetzten Technik innerhalb einer sehr großen Bandbreite. Mit zunehmender Anlagengröße sinken die spezifischen Kosten vor allem für den Kollektor und den Speicher deutlich. Für die für Luxemburg relevante Kollektortechnologie des einfachverglasten Flachkollektors mit selektivem Absorber geben Neubart und Kaltschmitt (2000) spezifische Kosten von 218 Euro/m<sup>2</sup> Kollektorfläche an. Werden Kollektoren vom Betreiber selbst montiert (z.B. Indachmontage von Streifenabsorbern) so liegen die Kosten deutlich unter diesem Wert.

In Tabelle 5-33 sind die Investitionskosten von solarthermischen Anlagen unterschiedlicher Kollektorfläche dokumentiert. Die Kosten sind dabei in die wesentlichen Anlagenelemente und Dienstleistungen aufgegliedert. Anhand der spezifischen Gesamtinvestitionskosten ist die Kostendegression bei größeren Anlagen gut ersichtlich.

Tabelle 5-33: Investitionskosten von solarthermischen Anlagen in Österreich

Anlagengröße in m <sup>2</sup>	7,4	25
Investitionskosten Kollektor in Euro	1635	5313
Investitionskosten Speicher in Euro	1374	2951
Investitionskosten Regelung in Euro	218	356
Investitionskosten Montage in Euro	1076	3190
Summe in Euro	4302	11810
Spezifische Investitionskosten in Euro/m <sup>2</sup>	581	472

Quelle: Neubarth und Kaltschmitt (2000)

Realisierte Beispiele von Solarsystemen in Luxemburg zeigen spezifische Systemkosten die teilweise deutlich über den hier dokumentierten Werten liegen. Ein konkretes Beispiel weist System-Investitionskosten von 1150 Euro/m<sup>2</sup> Kollektorfläche auf.

## 5.9 Wärmepumpen

Die Wärmepumpentechnologie ermöglicht die Nutzung von Umgebungswärme, deren Temperaturniveau für eine direkte Nutzung nicht ausreicht. Unter Umgebungswärme (in der Literatur oftmals auch als "Umweltwärme" bezeichnet) soll hier Wärme aus der Umgebungsluft, aus oberflächennahen Erdschichten (bis 200 Meter Tiefe) sowie aus Oberflächengewässern und aus Erdreich mit Grundwasser verstanden werden. Wärmepumpen heben das Temperaturniveau der Umgebungswärme über einen thermodynamischen Kreisprozess unter Einsatz von Zusatzenergie (im Regelfall elektrischer Strom) auf das Temperaturniveau der Nutzwärme an.

### 5.9.1 Allgemeine Aspekte der Wärmepumpen

Zur Erschließung der Potenziale aus Umgebungswärme stehen im Weiteren unterschiedliche Wärmequellenanlagen zur Verfügung.

**Wärmequellenanlagen für Erdreich** können in zwei Grundtypen gegliedert werden: horizontal verlegte Anlagen bestehen aus Rohren, welche nach unterschiedlichen Verlegemustern und Verschaltungen in das Erdreich eingebracht werden. In diesen Rohren kann ein Wärmeträgermedium (Sole) zirkulieren oder in Direktverdampfungssystemen auch das Arbeitsmedium der Wärmepumpe. Vertikal verlegte Anlagen (auch Erdwärmesonden genannt) werden durch Bohrungen hergestellt, welche bis über 100 Meter Tiefe erreichen können. In diese Bohrungen werden Erdwärmesonden eingebracht, welche die Erdwärme über ein Wärmeträgermedium (Sole) zur Wärmepumpe transportieren. Beschränkungen bezüglich der Ge-

nehmung von Bohrungen sind bei Erdwärmesonden zu beachten, da die benötigten Bohrungen Einfluss auf das Grundwasser haben können.

**Wärmequellenanlagen für Grundwasser** zeichnen sich durch das konstante Temperaturniveau des Wärmeträgers aus und bestehen in der Regel aus einem Entnahme- und einem Schluckbrunnen, die eine gewisse räumliche Distanz aufweisen müssen. Bei Grundwasserwärmequellen sind wasserrechtliche Bestimmungen sowie chemische und physikalische Eigenschaften des Grundwassers zu beachten.

**Wärmequellenanlagen für Oberflächenwasser** können als Wärmequelle dienen, wenn ein jahreszeitlich ausgeglichenes Temperaturniveau des Gewässers vorliegt (z.B. thermische Gewässerbelastung durch kalorische Kraftwerke).

**Wärmequellenanlagen für Außenluft** entziehen die benötigte Wärme der Außenluft, welche uneingeschränkt zur Verfügung steht. Im Vergleich zu den bereits genannten Wärmequellenanlagentypen hat diese Variante den Nachteil der geringen Dichte von Luft, welche einen hohen Ventilationsaufwand nach sich zieht und der gegenläufigen jahreszeitlichen Charakteristik von Lufttemperatur und Wärmebedarf, was eine vergleichsweise niedrige Arbeitszahl der Wärmepumpe bedingt.

**Wärmequellenanlagen für die Abwärmenutzung** beziehen Wärme aus unterschiedlichen Einrichtungen, in denen Abwärme als meist ungenutztes Nebenprodukt technischer Prozesse anfällt. Dies kann die Abwärme bzw. auch geothermale Wärme in Tunnelanlagen ebenso betreffen wie die Abluft aus Parkhäusern, U-Bahnschächten oder Bergwerksgebäuden.

## 5.9.2 Potenziale aus Wärmepumpen

### Theoretisches Potenzial aus Wärmepumpen

Zur Ermittlung des theoretischen Potenzials an Umgebungswärme in Luxemburg werden folgende Annahmen getroffen: für Wärmequellenanlagen für Erdreich stehen 16% der Landesfläche Luxemburgs zur Verfügung, was jenen Flächen entspricht, welche nicht von Wald bewachsen bzw. landwirtschaftlich genutzt sind. Diese Annahme ist auf die Flächenkonkurrenz mit weiteren Technologien zur Nutzung Erneuerbarer zurückzuführen. Die für Erdreich-Wärmequellenanlagen (horizontale und vertikale Systeme) zur Verfügung stehende Fläche beträgt somit 424 km<sup>2</sup>.

Weiters steht eine 100 Meter dicke Luftschicht über der gesamten Landesfläche zur Verfügung, welche um 1 Grad Kelvin abgekühlt werden kann. Die Kalkulation geht weiters davon aus, dass Erdkollektoren mit einer nach Neubarth und

Kaltschnitt (2000) erzielbaren Leistungsdichte von  $15 \text{ W/m}^2$  eingesetzt werden. Im Falle von Erdsonden wird mit einer typischen Leistungsdichte von  $40 \text{ W/m}$  gerechnet, wobei die Bohrtiefe  $100 \text{ m}$  und die Maschenweite des Bohrungsnetzes  $50 \text{ m}$  beträgt. Typische Wärmeleistungen von Erdkollektoren und Erdsonden sind in Tabelle 5-34 und Tabelle 5-35 dokumentiert.

Tabelle 5-34: Entziehbare Wärmeleistung aus dem Erdreich

Bodenart	Wärmeleistung in $\text{W/m}^2$
Trockener sandiger Boden	10-15
Feuchter sandiger Boden	15-20
Trockener lehmiger Boden	20-25
Feuchter lehmiger Boden	25-30
Grundwasserführender Boden	30-35

Quelle: Stiebel-Eltron (1991)

Tabelle 5-35: Richtwerte für den maximalen Wärmeentzug aus dem Erdreich durch Erdsonden

Art des Untergrunds	Wärmeleistung in $\text{W/m}$
Schlechter Untergrund (trockene Lockergesteine)	20
Festgesteins-Untergrund, wassergesättigte Lockergesteine	50
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit	70
Kies und Sand	80-100

Quelle: VDI-Richtlinie 4640 1998

Der energetische Ertrag aus den beschriebenen Anlagen ist natürlich von der Volllaststundenanzahl abhängig, welche im Zuge der Berechnung des theoretischen Potenzials mit Dauerbetrieb ( $8760 \text{ h/a}$ ) angenommen wird, obwohl sich dies nicht mit dem Bedarf deckt, welcher erst im Zuge der Kalkulation des technischen Potenzials berücksichtigt wird.

Der energetische Ertrag aus Umweltwärme beträgt unter den oben dokumentierten Annahmen im Bereich Erdkollektoren  $55.714 \text{ GWh}$ , im Bereich Erdsonden  $5.943 \text{ GWh}$  und im Bereich Umgebungswärme aus der Luft  $87 \text{ GWh}$  pro Jahr. In Summe sind dies  $61.743 \text{ GWh/a}$ .

### Technisches Potenzial aus Wärmepumpen

Bei der Diskussion des technischen Potenzials aus Wärmepumpen müssen verschiedene Restriktionen technischer Natur betrachtet werden. Der Fokus ist dabei auf die Wärmequellenanlage gerichtet. Horizontale Erdreichkollektoren können nur

zum Einsatz kommen, wenn die dafür benötigte Erdfläche zur Verfügung steht. Typischer Weise ist dies im Einfamilienhausbereich der Fall, nicht jedoch im Bereich des verdichteten Wohnbaus (Mehrfamilienhäuser) in urbanen Gebieten. Die Errichtung von vertikalen Erdkollektoren ist an die Durchführung von Bohrungen gebunden. Diese Bohrungen sind in großen Landesteilen Luxemburgs aus Umwelttechnischen Gründen (Grundwasser) gar nicht möglich oder müssen im Einzelfall geprüft werden. Die diesbezüglich wirksamen Restriktionen wurden im Abschnitt Geothermie detailliert dargestellt. Der Einsatz von Umgebungsluft-Wärmepumpen ist aus technischer Sicht fast in jedem Gebäude möglich, die Jahresarbeitszahl ist jedoch systembedingt schlecht. Zusätzlich müssen im technischen Potenzial auch die strukturellen Randbedingungen der Nachfrageseite berücksichtigt werden, eine Produktion aus Wärmepumpen, welche im Einzelfall über den Bedarf hinausgeht macht also keinen Sinn, da diese Wärme im Regelfall weder mittelfristig gespeichert noch transportiert werden kann.

Typische praxisbezogene und realistische Kennzahlen und Rechenwerte im Zusammenhang mit Wärmepumpenanlagen sind in Tabelle 5-36 dargestellt. Diese Werte stellen im Weiteren die Berechnungsgrundlage für die Kalkulation des technischen und der realisierbaren Potenziale dar.

Aus der Sicht der oben genannten Aspekte wird zur Abschätzung des technischen Potenzials aus Wärmepumpen im Folgenden ein nachfrageseitiger Ansatz verfolgt. In einem einfachen Modell wird angenommen, dass von jeder Gebäudeklasse Luxemburgs (Einfamilienhäuser, Reihenhäuser, Mehrfamilienhäuser und sonstige) jeweils die Hälfte der existierenden Anzahl prinzipiell mit Wärmepumpen ausgestattet werden könnte. Der jeweilige Wärmebedarf wird mittels jener Daten abgebildet, welche auch als Eingangsdaten im Modell Invert verwendet wurden. Einfamilienhäusern wurden dabei mit Sole-Wasser Systemen ausgestattet (horizontale Erdkollektoren), Reihenhäuser mangels verfügbarer Flächen mit vertikalen Systemen und alle anderen Gebäude aus der technischen Notwendigkeit heraus mit Luftsystemen. Dieses Modell ergibt ein technisches Potenzial an Umgebungswärme durch Wärmepumpen von 1516 GWh/a (in diesem Wert ist nur die Umgebungswärme enthalten, nicht die Antriebsenergie, die ja auf Basis konventioneller Energiequellen aufgewendet werden muss).

Tabelle 5-36: Annahmen zur Berechnung des Nutzwärmeertrages der in Österreich installierten Wärmepumpen

<b>Heizungs-Wärmepumpen</b>				
Mittlere Heizleistung pro Wärmepumpe	1977-1999: 24 kW <sub>therm</sub> , 2000 - 2002: 14,5 kW <sub>therm</sub> , 2003 u. 2004: 11 kW <sub>therm</sub>			
Mittlere elektrische Anschlussleistung pro Wärmepumpe	1977-1999: 6 kW <sub>el</sub> , 2000 - 2002: 2,9 kW <sub>el</sub> , 2003 u. 2004: 2,2 kW <sub>el</sub>			
Mittlere Betriebsstunden pro Jahr	1800 h/a			
Mittlere Jahresarbeitszahl	2001-2004: 3,3 bis 3,8 vor 1999: 3,0			
Mittlerer Nutzungsgrad des Ölkessels (Heizperiode)	80 %			
Mittlere Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe				
Wärmequellenanlage	2001	2002	2003	2004
Sole/Wasser	3,0	3,2	3,8	3,8
Direktverdampfung	3,3	3,5	4,2	4,2
Wasser/Wasser	3,0	3,0	4,0	4,0
Luft/Wasser <sup>40</sup>	2,5	2,7	3,0	3,0
Mittelwert	3,3	3,4	3,8	3,8
<b>Brauchwasser-Wärmepumpe</b>				
Mittlere elektrische Anschlussleistung pro Wärmepumpe	1,1 kW <sub>el</sub>			
Jahresheizarbeit	3600 kWh/a			
Mittlere Jahresarbeitszahl	Bis 2002: 2,5 nach 2002: 2,8			
Mittlerer Jahresnutzungsgrad des Ölkessels	60 %			
Wärmepumpen zur kontrollierten Wohnraumlüftung (konv. WRG in Verb. mit Heizung)				
Mittlere elektrische Anschlussleistung pro Wärmepumpe	1,2 kW <sub>el</sub>			
Jahres-Volllaststunden	1800 h/a			
Mittlere Jahresarbeitszahl	2,5			
Mittlerer Jahresnutzungsgrad des Ölkessels (Heizperiode)	80 %			
Wärmepumpen zur kontrollierten Wohnraumlüftung in Passivhäusern				
Mittlere elektrische Anschlussleistung pro Wärmepumpe	0,6 kW <sub>el</sub>			
Jahres-Volllaststunden	900 h/a			
Mittlere Jahresarbeitszahl	2,5			
Mittlerer Jahresnutzungsgrad des Ölkessels (Heizperiode)	80 %			

Quelle: Faninger (2005a)

<sup>40</sup> Anmerkung Fa. Ochsner: Die Wärmequelle Luft ist nach neuesten Entwicklungen mit hohen Leistungszahlen erhältlich, wobei COPs von 3,6 bis 3,9 erreicht werden.

## Technisches Entwicklungspotenzial von Wärmepumpen

Die Wärmepumpentechnologie erlitt nach einem frühen Diffusionsmaximum in der Mitte der 1980er Jahre aus technologisch bedingten Gründen einen Rückschlag, welcher das Image dieser Technologie mittelfristig belastete. Die anfänglichen technischen Mängel und unbefriedigenden Arbeitszahlen wurden behoben bzw. durch fortschreitende Entwicklung deutlich verbessert und seit den frühen 1990er Jahren ist wieder ein stetes Wachstum der Diffusion zu verzeichnen. Diese Entwicklung kann in zahlreichen europäischen Ländern nachvollzogen werden. Prinzipiell gilt dies auch für Luxemburg, wobei die sehr geringe absolute Anzahl von Anlagen hier nur eine qualitative Einschätzung gestattet.

Die jüngste Entwicklung der Wärmepumpentechnologie, welche mit der Weiterentwicklung der allgemeinen Energieeffizienz von Gebäuden einhergeht, eröffnet für die Wärmepumpentechnologie in der Zukunft große Chancen. Einerseits wird durch die Verbesserung der Gebäude-Energieeffizienz der Einsatz von Wärmepumpen durch die geringeren nötigen Vorlauftemperaturen und Leistungsanforderungen effizienter und dadurch attraktiver, andererseits eröffnen sich Möglichkeiten des Einsatzes völlig neuer Wärmepumpensysteme im Bereich der kontrollierten Wohnraumlüftung.

Ein weiterer Trend zeichnet sich im Bereich der rasch steigenden Nachfrage nach Wohnraumkühlung bzw. Wohnraumklimatisierung ab. In diesem Marktsegment kann die Wärmepumpentechnologie durch die gegebenen technischen Voraussetzungen relativ rasch entsprechenden Marktentwicklungen folgen und neue Energiedienstleistungsanforderungen erfüllen.

Im Bereich der Altbausanierung spielt die Wärmequelle Luft eine zunehmende Rolle. Dieses Marktsegment, welches in Zukunft rasch an Volumen gewinnen wird, ist auch aus der Sicht der „Energiedienstleistung“ der Altbauentfeuchtung ein zukünftiges Anwendungsgebiet der Wärmepumpe gegeben. Durch neue technologische Entwicklungen sind Leistungszahlen in Zusammenhang mit der Wärmequelle Luft von 3,6 bis 3,9 möglich, wodurch auch die nötige Effizienz gewährleistet werden kann.

Ein aus dem Blickwinkel der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion viel versprechender Anwendungsbereich von Wärmepumpen zur Warmwasserbereitung besteht im Bereich der Substituierung von Boilern mit elektrischen Widerstandsheizungen. Die Diffusion in diesem Bereich ist u.a. von den energiepolitischen Rahmenbedingungen abhängig.

Weitere neue technologische Ansätze betreffen die Nutzung neuer Wärmequellenanlagen in geothermischen oder auch tiefbautechnischen Bereichen. Beispielsweise kann in tiefen Tunnelbauwerken geothermische Wärme auf niedrigen Tempera-

turniveaus mit Wärmepumpentechnologie effizient genutzt werden. Hinzu kommt die indirekte Nutzung von Betriebsabwärme wie z.B. in Autobahntunnels oder U-Bahn Schächten. In diesem Zusammenhang ist auch der Aspekt der Klimatisierung interessant.

Technologiesprünge bezüglich der zugrunde liegenden prinzipiellen Mechanismen bzw. der Anlageneffizienzen sind in Zukunft nicht zu erwarten, da die Annäherung an die thermodynamisch vorgegebenen Grenzen bereits fortgeschritten ist. Die ökonomischen Lerneffekte im Bereich der Wärmepumpentechnologie hätten nach Auskunft befragter Technologieproduzenten in den vergangenen 10 Jahren, also im Zeitraum von 1995 bis 2004 ca. -30 % betragen, wenn diese Lerneffekte nicht in eine deutliche Effizienzsteigerung umgelegt worden wären. Anreize zur Effizienzsteigerung stammen dabei aus dem Wettbewerb des Wärmepumpenmarktes selbst, wobei diese Effizienzkriterien fallweise auch in Förderungsregelwerke übernommen wurden und werden und über diesen Weg weitere Anreize setzen. Ein Umlegen der oben angeführten Lernrate auf die Änderung des Marktvolumens (Lerneffekt je Marktverdopplung) ist im Falle der Wärmepumpentechnologie nicht sinnvoll möglich, da es sich bei dieser Technologie um einen atypischen Diffusionsverlauf handelt. Würde die angegebene virtuelle Lernrate auf das aggregierte historische Marktvolumen bezogen werden, wären rein rechnerisch unrealistisch hohe Lernraten je Marktverdopplung die Folge.

### **Realisierbares Potenzial aus Wärmepumpen**

Die Wärmepumpentechnologie ist in Luxemburg kaum verbreitet. Historisch führten die bereits oben beschriebenen schlechten Erfahrungen mit dieser Technologie dazu, dass heute kaum Anlagen installiert werden. In den vergangenen 10 Jahren wurden in ganz Luxemburg ca. 40 Wärmepumpenanlagen in privaten Einfamilienhäusern installiert. Dies entspricht einem Status quo der Umweltwärmenutzung durch Wärmepumpen in Luxemburg im Jahr 2005 von ca. 1 GWh. Auf dieser Basis ist es schwierig, in absehbarer Zeit eine merkbare Technologiediffusion zu initiieren. Zusätzliche Anstrengungen sind nötig, um das vielleicht immer noch anhängige schlechte Image der Technologie zu korrigieren bzw. diese Technologie überhaupt bekannt zu machen.

Zur Abschätzung von realisierbaren Potenzialen mit den Zeithorizonten 2010 und 2020 werden Annahmen bezüglich der Diffusionsraten getroffen. Prinzipiell werden in Luxemburg pro Jahr zurzeit ca. 1000 Einfamilienhäuser errichtet. Diese Neubauten sind auch potenzielle Adressaten neuer Heizsysteme. Im Falle eines Kesseltausches im Gebäudebestand ist die Neuinstallation von Wärmepumpen unrealistischer, zumal die Errichtung der Wärmequellenanlage im Erdbereich mit groben

baulichen Maßnahmen verknüpft ist, welche vermutlich ein Akzeptanzproblem darstellen (z.B. Errichtung horizontaler Systeme) und die Errichtung von Luftsystemen aus Gründen der niedrigeren Energieeffizienz kaum in Frage kommt.

In einem Szenario für das Jahr 2010 wird angenommen, dass es unter dem Einsatz von anreizorientierten und informatorischen Instrumenten möglich ist, 2500 bis zum Jahr 2010 neu errichtete Einfamilienhäuser mit Wärmepumpen auszustatten. Diese Gebäude weisen eine gute Gebäudeenergieeffizienz auf und werden wahlweise mit horizontalen oder vertikalen Erdkollektoren ausgestattet. Die Wärmepumpen sind Sole-Wasser-Systeme mit einer mittleren Jahresarbeitszahl von 4. Das Ergebnis weist einen energetischen Ertrag an Umweltwärme aus Wärmepumpenanlagen von 30 GWh/a aus.

Das Szenario für das Jahr 2020 sieht im Zeitraum von 2010 bis 2020 die Installation von Wärmepumpensystemen in 5000 weiteren neuen Einfamilienhäusern sowie in 3500 Einfamilienhäusern des Bestands vor. Dies erscheint als realistische Annahme, zumal im Bereich der Neubauten zunehmend Effizienzmaßnahmen wie die Errichtung von Niedrigstenergie- und Passivhäusern zu erwarten ist und andererseits die Wärmepumpentechnologie im Bereich des Gebäudebestandes mit beispielsweise automatisierten biogenen Heizsystemen konkurrenzieren muss. Das Ergebnis weist einen energetischen Ertrag an Umweltwärme aus Wärmepumpenanlagen von im Jahr 2020 von 180 GWh/a aus.

### **5.9.3 Kosten der Wärmepumpentechnologie**

Die Höhe der spezifischen Investitionskosten von Wärmepumpensystemen wird im Wesentlichen von der eingesetzten Technik sowie der Systemgröße bestimmt. Generell sinken mit zunehmender Anlagengröße die spezifischen Kosten. Dies trifft vor allem auf das Wärmepumpenaggregat inklusive der Warmwasserbereitung zu. Demgegenüber zeigen die Wärmequellenanlagen mit Ausnahme einer Nutzung von Grundwasser als Wärmequelle eine geringe Kostendegression.

Typische Investitionskosten sind nach Neubarth und Kaltschmitt (2000):

- Wärmequellenanlagen:
  - Erdsonden: 538-610 Euro/kW
  - Systeme mit Grundwassernutzung: 211-603 Euro/kW
  - Erdkollektoren für Sole oder Direktverdampfung: 233-305 Euro/kW
  - Schlagbrunnen: 212-363 Euro/kW
- Wärmepumpenaggregat:
  - Sole/Wasser bzw. Wasser/Wasser Wärmepumpen: 269-988 Euro/kW

## **5.10 Windkraft**

Unter der Nutzung von Windkraft wird im Weiteren die großtechnische Umwandlung der Windenergie mittels netzgekoppelter Windkraftanlagen in elektrischen Strom verstanden. Aus der Geografie Luxemburgs ergibt sich, dass ausschließlich Onshore-Anlagen betrachtet werden.

### **5.10.1 Allgemeine Aspekte der Windkraft**

Die Grundlage zur Ermittlung eines theoretischen Windkraftpotentials in Luxemburg ist durch die mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten über der Landesfläche gegeben. Abbildung 5-32 zeigt die Verteilung von Zonen gleicher Windgeschwindigkeiten in Luxemburg. Zur Kalkulation des theoretischen Potenzials wird eine mittlere Windgeschwindigkeit für Luxemburg von 5 m/s angenommen.

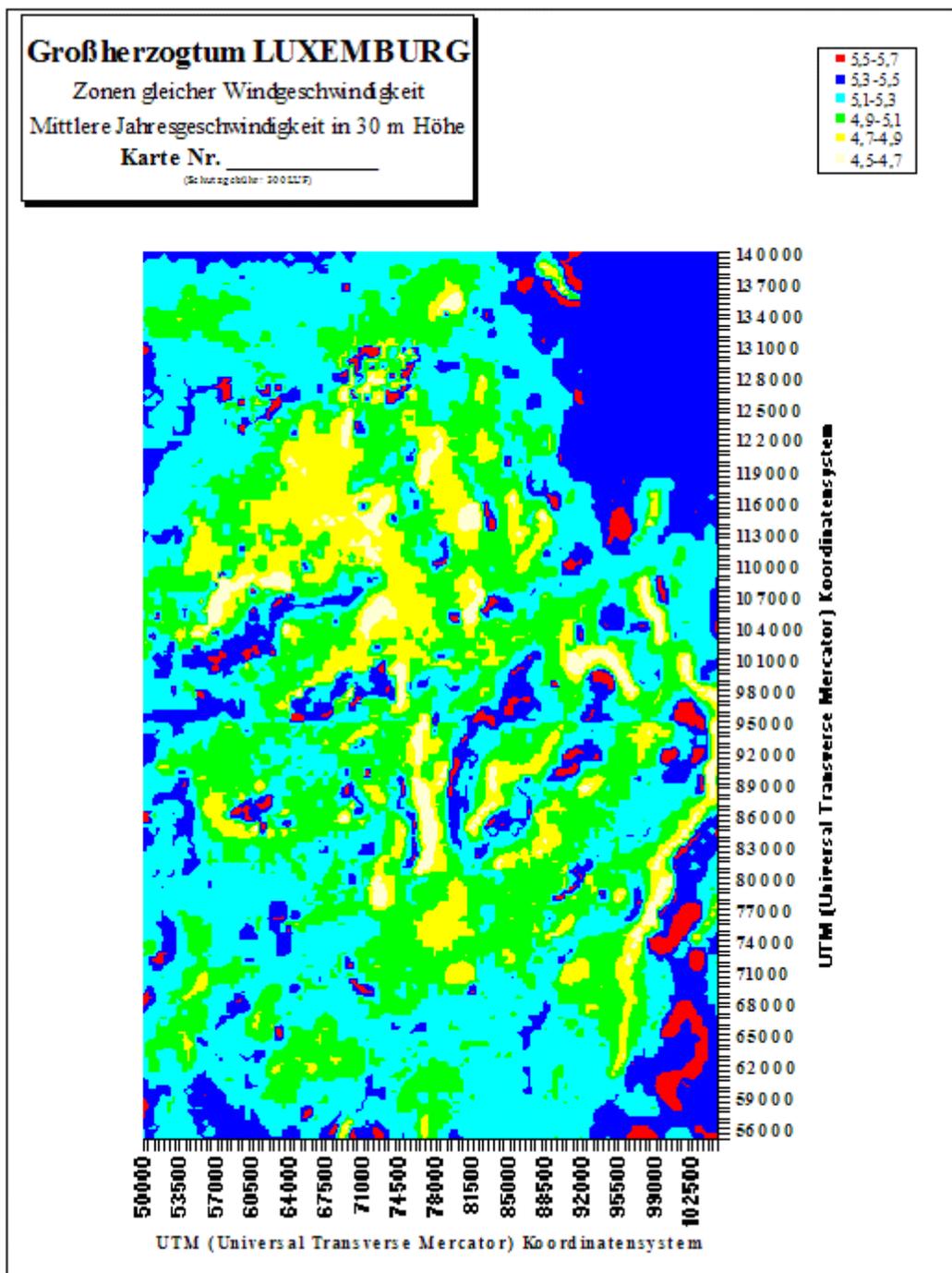


Abbildung 5-32: Zonen gleicher Windgeschwindigkeiten in Luxemburg

## 5.10.2 Potenziale aus Windkraft

### Theoretisches Potenzial aus Windkraft

Die Berechnung des theoretischen Windkraftpotenzials in Luxemburg stützt sich auf die Annahme, dass die landwirtschaftliche Nutzfläche Luxemburgs im Umfang von 1266 km<sup>2</sup> zur Gänze durch Windkraft genutzt wird. Diese Annahme berücksichtigt grobe strukturelle Restriktionen wie die Nutzung fester Biomasse auf den Waldflächen bzw. schließt die Windkraftnutzung auf urbanen Flächen und in Siedlungsgebieten aus. Einer Doppelnutzung der landwirtschaftlichen Flächen durch Windkraft und der Produktion von z.B. Energiepflanzen ist nichts entgegenzusetzen, da die Abschattung dieser Flächen durch die Windkraftnutzung vernachlässigt werden kann. Weiters wird eine mittlere Windgeschwindigkeit von 5 m/s und eine Jahresvolllaststundenzahl von 1800 angenommen. Der Abstand zwischen den einzelnen Windkraftanlagen beträgt jeweils 6 Rotordurchmesser. Aus diesen Annahmen resultieren 2 Szenarien:

1. der Ausbau der gesamten verfügbaren Fläche mit Anlagen vom 2 MW-Typ ergibt ein theoretisches Windkraftpotenzial von 19.781 GWh/a.
2. der Ausbau der gesamten verfügbaren Fläche mit Anlagen vom 5 MW-Typ ergibt ein theoretisches Windkraftpotenzial von 20.584 GWh/a.

Die Ergebnisse sind geringfügig unterschiedlich, da bei den größeren Anlagen entsprechend weniger Anlagen installiert werden können. Das theoretische Potenzial wird wegen des größeren Ergebniswertes von der 5-MW Ausbauvariante übernommen.

### Technisches Potenzial aus Windkraft

Das technische Potenzial aus Windkraft berücksichtigt die für die Windkraftnutzung prinzipiell zur Verfügung stehenden und geeigneten Flächen aus technischer Sicht und aus der Sicht der Flächenkonkurrenz zu anderen Nutzungsformen Erneuerbarer Energie.

Da ein Betrieb von Windkraftanlagen unter einer Ausnutzung von 1500 Volllaststunden (dies entspricht im Fall einer 1,5 MW Windkraftanlage einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5 m/s) aus Gründen des mangelnden Ertrages nicht sinnvoll umsetzbar ist, werden nur Regionen mit Windgeschwindigkeiten von mindestens 5 m/s betrachtet. Momentan bestehende Waldflächen in Luxemburg sind der Windkraftnutzung nicht zugänglich, wie dies schon im theoretischen Potenzial berücksichtigt wurde. Ebenso wird der urbane Raum (Stadt- und Dorfflächen und deren unmittelbares Umland) aus den Berechnungen ausgenommen. Die landwirtschaftlichen Flächen Luxemburgs bestehend aus Ackerflächen, Weiden und Wie-

sen in einem Ausmaß von 1266 km<sup>2</sup> können weiterhin als Basis für die Berechnung des technischen Potenzials herangezogen werden. In Hinblick auf das Winddargebot wird angenommen, dass 50 % dieser Flächen dem Qualitätskriterium der mittleren Windgeschwindigkeit von mindestens 5 m/s entsprechen. Weiters wird angenommen, dass aus topografischen Gründen (Abschattung, ungeeignete Geländeformen, Nähe zu urbaner Infrastruktur) weitere 50 % der verbleibenden Fläche entfallen. Aus technischer Sicht muss bei der Aufstellung von Windkraftanlagen ein minimaler Abstand der Anlagen von 6 Rotordurchmessern gewährleistet sein. Da die Technologie der 5-MW-Windkraftanlagen als verfügbar angesehen werden kann, ist der Ausbau des Flächenpotenzials mit diesem Typ vorgesehen. Der Zusammenhang von Nennleistung und Rotordurchmesser ist in Tabelle 5-37 dokumentiert.

Tabelle 5-37: Typische Leistungsdaten von Windkraftanlagen

<b>Jahr</b>	<b>Leistungsklasse (kW)</b>	<b>Rotordurchmesser (m)</b>
1980	50	15
1985	100	20
1990	500	40
1995	600	50
2000	2000	80
2003	5000	124

Quelle: BTM Consult (2005)

Zur Berechnung des technischen Potenzials wird angenommen, dass Windkraftanlagen mit einer Anlagenleistung von 5 MW eingesetzt werden, wobei diese Anlagen eine mittlere Auslastung von 1800 Volllaststunden pro Jahr aufweisen. Die Kalkulation ergibt ein Flächenpotential für die Aufstellung von Windkraftanlagen von 317 km<sup>2</sup>, dies entspricht einer Zahl von 572 umsetzbaren Anlagen. Die installierte Gesamtleistung dieser Anlagen von 2.859 MW hat ein technisches Potenzial an Stromertrag aus Wind von 5.146 GWh/a zur Folge.

Technische Faktoren wie die Netzanbindung der Anlagen werden hier nicht als ausschließende Parameter gesehen, da sie in der Regel technisch beherrschbar sind und sich lediglich im Bereich der Wirtschaftlichkeitsrechnung (siehe Abschnitt Kosten) niederschlagen. Laut Aussagen des Luxemburger Energieversorgers CEGEDEL erfolgt die Einspeisung von Windkraft prinzipiell in das 20 kV-Netz, wobei an vielen möglichen Einspeisestellen die Einspeisung von 2 MW (also eine 2 MW-Windkraftanlage) unproblematisch sein dürfte. Höhere Einspeiseleistungen sind zu prüfen und gegebenenfalls ist eine Kabellegung zum nächsten passenden Einspeisepunkt erforderlich. Die maximale Distanz zum nächsten Netzknoten be-

trägt in Luxemburg dabei 10 km.

### **Technisches Entwicklungspotential der Windkraft**

Die Entwicklung von Windkraftanlagen findet auf internationaler Ebene statt. Europa weist in diesem Zusammenhang starke Wachstumsmärkte auf, welche einen entsprechenden Anreiz zur Weiterentwicklung dieser Technologie mit sich bringen. Die Erhöhung der Leistung pro Anlage ist, wie bereits oben dargestellt, der wesentliche technologische Trend dieser Technologie und hat damit unter der Annahme von nur begrenzt zur Verfügung stehenden Standorten einen direkten Einfluss auf das realisierbare Potenzial dieser Technologie.

Weitere Ansatzpunkte für technologische Weiterentwicklungen stellen die Optimierung der Windausbeute (Rotoren mit variabler Drehzahl, Pitch-Regelung), die Verbesserung von Anlagenwirkungsgraden sowie die Optimierung von Windparks dar, wobei die wesentlichen richtungweisenden Innovationen technologisch bereits zur Verfügung stehen. Große Entwicklungsbemühungen betreffen auch den Offshore-Bereich, der jedoch für Luxemburg nicht relevant ist. Generell handelt es sich bei aktuellen Innovationen im Bereich von Windkraftanlagen um Verbesserungsinnovationen, auch um die Wirtschaftlichkeit selbiger und einen wirtschaftlichen Betrieb zu optimieren.

Lernkurven für Windkraftanlagen sind im internationalen Kontext zu sehen. Luxemburg ist in diesem technologischen Bereich (wie dies quasi bei allen diskutierten Technologien aufgrund der Marktgröße der Fall ist) ein Preisnehmer. Abbildung 5-33 zeigt den Verlauf der Lernkurve von Windkraftanlagen von 1982 bis ins Jahr 2001. Am Beginn des Diffusionsverlaufes (Markt von USA dominiert) ist ein Lerneffekt von rund 20% je Marktverdopplung zu beobachten. Ab 1993 flacht der weitere Verlauf der Lernkurve im Bereich des nunmehrigen Weltmarktes auf 5 % je Marktverdopplung ab. Möglicher Weise erbringen die neuesten Entwicklungen im Bereich der größten Anlagenklassen neue Lernpotentiale aufgrund der möglichen geringeren Kosten je installierter Leistungseinheit.

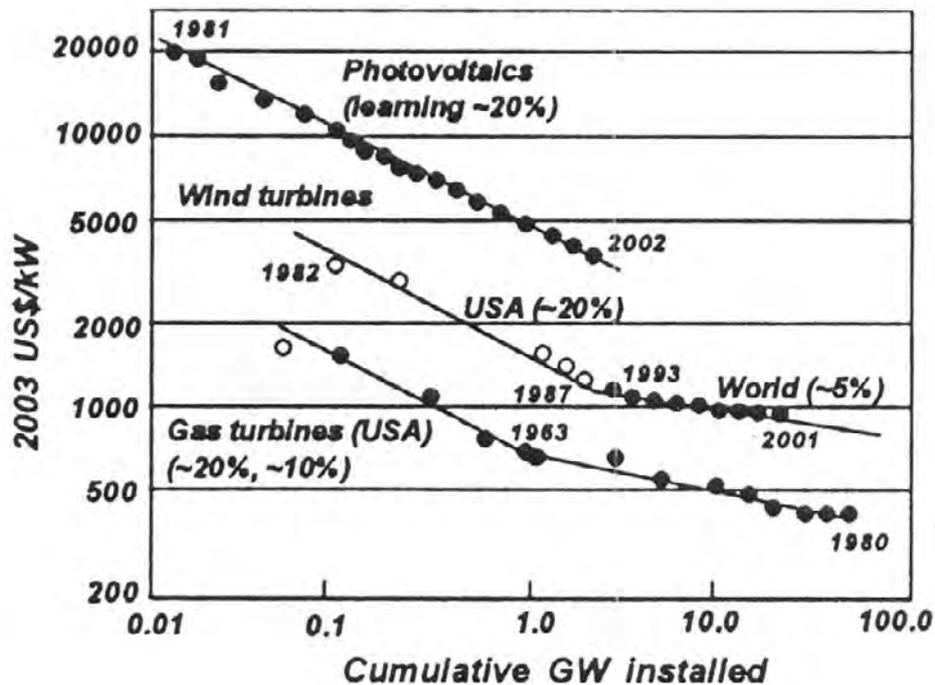


Abbildung 5-33: Lernkurven unterschiedlicher Technologien; Quelle: Green (2005)

### Realisierbares Potenzial aus Windkraft

Das aus einer realistischen Betrachtung heraus bis ins Jahr 2020 realisierbare Potenzial an Windkraft in Luxemburg ist deutlich geringer als das errechnete technische Potenzial. Das entscheidende Hemmnis in diesem Bereich ist die Standortfrage. Die tatsächlich für den Neubau von Windkraftanlagen verfügbaren Flächen sind wesentlich geringer als bei der Kalkulation der technischen Potenziale angenommen. Faktoren, welche die für den Windkraftausbau nutzbaren Flächen reduzieren sind die Akzeptanzfrage in der Bevölkerung (Veränderung des Landschaftsbildes, optische und akustische Belastung), der Naturschutz (Schutz von Vogelhabitaten, Naturschutzgebiete) und die vermehrte anderwärtige Nutzung von Flächen (Ausdehnung von Siedlungsräumen und Gewerbeflächen). Ein kommunales Referendum über einen konkreten Windpark brachte eine Ablehnung dieses Projekts. In Bezug auf zukünftige Investitionen ergibt sich für potentielle Investoren aus den zuvor genannten Aspekten und aus der Unsicherheit, welche aus dem behördlichen Genehmigungsverfahren resultiert ein gedämpftes Investitionsklima. Die höchste Umsetzungswahrscheinlichkeit haben diesbezüglich kommunale Projekte, welche die lokale Bevölkerung in das Projekt einbinden bzw. zu Teilhabern an den Anlagen machen.

Die treibende Kraft hinter den großen Windkraftprojekten in Luxemburg ist das Unternehmen SEO. Der Luxemburger Elektrizitätsversorger CEGEDEL wird bei kommunalen Projekten oftmals als Projektpartner angefragt und ist an entsprechenden Projekten auch interessiert, ohne jedoch selbst initiativ zu werden.

Die Thematik des Repowering ist für Luxemburg nicht von kurzfristiger aktueller Relevanz, da die Abschreibedauer von Windkraftanlagen typischer Weise 10 Jahre beträgt und die erste Windkraftanlage im Land im Jahr 1997 errichtet wurde. Die leistungsmäßige Umrüstung bestehender Anlagen wird somit erst ab dem Jahr 2010 berücksichtigt. Bei Repowering-Projekten ist prinzipiell mit einer höheren Akzeptanz zu rechnen als dies bei der Erschließung neuer Standorte der Fall ist.

Nach Auskunft der Luxemburger Energieagentur stehen aktuell folgende Windkraftprojekte zur Diskussion:

1. Rédange 7 x 2 MW (Ende 2007, Genehmigung steht noch aus)
2. Buerer Bierg 4 x 2 MW (Ende 2007, Genehmigung steht noch aus)
3. Kayl 4 x 2 MW (2009)
4. Pafebiert 2 x 2 MW
5. Garnich 1 x 2 MW
6. Roullingen/Wiltz
7. Winccrange

Zur Berechnung des Luxemburger Windkraftpotenzials bis zum Jahr 2010 wird die Umsetzung der oben dokumentierten Projekte 1. bis 5. kalkuliert. Die Projekte entsprechen in Summe einer zusätzlich zum Status quo im Jahr 2005 installierten Windkraftanlagenleistung von 36 MW. Bei einer Kalkulationsbasis von 1800 Volllaststunden entspricht dies einem energetischen Gesamtpotenzial aus Windkraft im Jahr 2010 von 118 GWh/a.

Im Zeitraum von 2010 bis 2020 wird einerseits von der Durchführung von Repowering-Projekten in einem Umfang von zusätzlichen 35 MW und andererseits von der zusätzlichen Neuinstallation von 31 MW Windkraftanlagen ausgegangen. Diese Annahmen werden von unterschiedlichen Gesprächen mit wesentlichen Akteuren in Luxemburg abgeleitet. Die Gesamtleistungserhöhung im betrachteten Zeitraum von 2010 bis 2020 beträgt somit 66 MW. Das energetische Gesamtpotenzial aus Windkraft im Jahr 2020 kann somit mit 237 GWh/a beziffert werden.

### 5.10.3 Kosten der Windkraftnutzung

Prinzipiell können die Kosten der Windkraftnutzung in folgende Kategorien aufgliedert werden:

#### Investitionskosten:

- Windkraftanlage (Konverter inklusive Kostenkomponenten wie z.B. Kran und Wartungskosten während der Gewährleistungszeit)
- Fundament und Zufahrt
- Trafostation und Übergabestation
- Netzanschluss und Verkabelung
- Planung
- Werbung
- Sonstiges

Die Kosten der Windkraftanlage machen den bei weitem größten Anteil an den Gesamtkosten aus. Dieser Kostenanteil lag bei den in Luxemburg errichteten Anlagen im Jahr 2002 bei etwa 890 €/kW für eine 2 MW Anlage und bei 1050 €/kW für eine 1.5 MW Anlage.

Die Erfahrungswerte bezüglich der spezifischen Infrastrukturkosten für die in Luxemburg errichteten Anlagen schwanken für das Jahr 2002 zwischen 250 und 360 €/kW.

Die spezifischen Projekt-Gesamtkosten belaufen sich somit auf etwa 1140 bis 1410 Euro pro kW. Zwischen 2003 und 2007 sind die Infrastrukturkosten um 18,7% gestiegen (basierend auf dem Anstieg der Lohnkosten, Erdarbeiten, Zement, Stahl, und Bitumen); die spezifischen Anlagenkosten mit etwa 8%.

Zur Einschätzung einzelner Kostenkomponenten können dabei nach Hantsch et al. (2003) folgende Richtwerte angesetzt werden:

#### Krankkosten

Die Krankkosten enthalten die Kosten für den Transport und die Errichtung der Anlage. Zu erwartende mittlere Kosten sind in Tabelle 5-38 dargestellt.

Tabelle 5-38: Krankkosten für die Errichtung von Windkraftanlagen

Leistungsklasse in kW	Krankkosten in Euro/Anlage
500	14.500
600-660	18.200

750-1000	21.800
1300	43.700
1800	50.900

Quelle: Hantsch et al. (2003)

### Trafostationen

Richtpreise für Trafostationen für die Anlagenkategorie 500-660 kW können mit ca. 22.500 Euro und für die Anlagenkategorie 1,8 MW mit ca. 38.500 Euro eingeschätzt werden.

### Fundamente

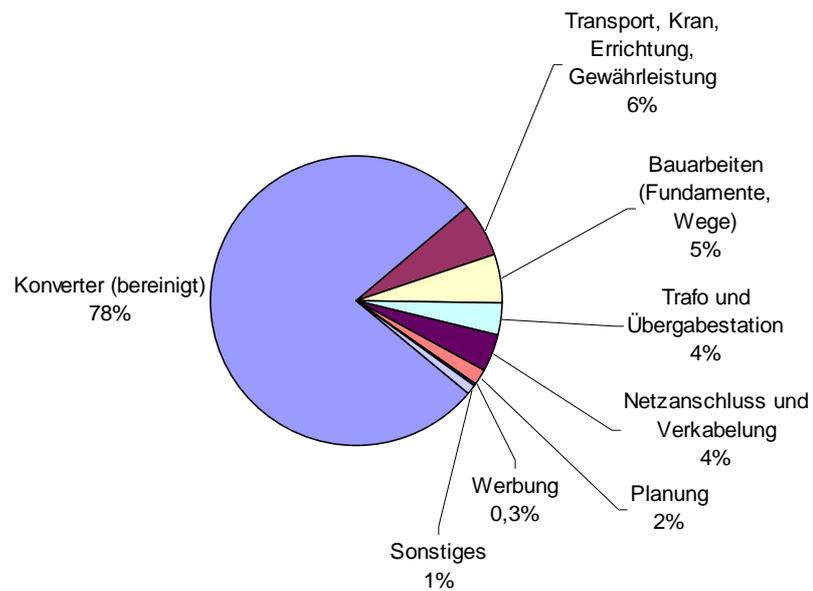
Die Kosten von Fundamenten können je nach den lokalen Gegebenheiten stark variieren und betragen bei konkreten Projekten in Österreich für 1,8 MW Projekte ca. 36.300 Euro.

Die Aufteilung der Gesamt-Projektkosten für ein 1,8 MW-Projekt in Österreich im Jahr 2000 ist in Tabelle 5-39 und in Abbildung 5-34 dargestellt.

Tabelle 5-39: Aufteilung der Gesamt-Projektkosten eines 1,8 MW-Windkraftprojektes im Jahr 2000 in Österreich

Bauteil	Anteil an Gesamtkosten
	%
Konverter (bereinigt)	77,7
Transport, Kran, Errichtung, Gewährleistung	6,16
Bauarbeiten (Fundamente, Wege)	5,2
Trafo und Übergabestation	3,8
Netzanschluss und Verkabelung	4
Planung	1,7
Werbung	0,34
Sonstiges	1,1
Projekt-Gesamtkosten	100

Quelle: Hantsch et al. (2003) und eigene Berechnungen



Quelle: Hantsch et al. (2000) und eigene Berechnungen

Abbildung 5-34: Anteilige Kosten eines 1,8 MW-Windkraftprojektes im Jahr 2000 in Österreich

## 6 Szenarien und Zielpfade

Im Rahmen dieses Abschnitts werden unterschiedliche Szenarien des künftigen Ausbaus erneuerbarer Energien vorgestellt. Diese basieren im Wesentlichen auf Anwendung des Computermodells **Green-X**, wobei unterschiedliche Annahmen seitens der Ausgestaltung einer künftigen nationalen Energiepolitik im Hinblick auf EE sowie der begleitenden Rahmenbedingungen betrachtet wurden. Einleitend werden die betrachteten Zielpfade im Rahmen der Szenariendefinition vorgestellt, gefolgt von einer Erläuterung der zentralen Rahmenannahmen. Abschließend werden die Resultate dargestellt, wobei die einzelnen Szenarienpfade im Detail diskutiert werden. Für eine vergleichende Kosten-Nutzen-Analyse sei auf den nachfolgenden Abschnitt 7 verwiesen.

### 6.1 Szenariendefinition

Es stehen **drei unterschiedliche Pfade des zukünftigen Ausbaus erneuerbarer Energien** im Fokus der modellhaften Betrachtung:

- Ein (hypothetisches) Szenario „*keine Förderanreize*“, das das **wirtschaftliche Realisierungspotenzial** skizziert. Hier wird gezeigt, welcher (geringe) Ausbau ohne jegliche Förderanreize resultieren würde – d.h. keine Weiterführung der bestehenden Maßnahmen, aber auch keine Alternativansätze diesbezüglich.
- Ein **Business-as-usual Szenario**, das die Entwicklung auf Basis der derzeit implementierten Förderanreize darstellt. Im Hinblick auf zu untersuchende energiepolitische Instrumente impliziert dies einerseits eine Diskussion der bestehenden sektorspezifischen Instrumente (BAU-Politiken).
- Ein Szenario "**verstärkte Anstrengungen**": Im Hinblick auf zu untersuchende energiepolitische Instrumente impliziert dies die Erarbeitung von Alternativvorschlägen<sup>41</sup> zu den bestehenden sektorspezifischen Instrumente (BAU-Politiken) im Einklang mit der Abschaffung bestehender nicht-ökonomischer Hemmnisse sowie. Dabei werden zwei Alternativvarianten untersucht:

*Verstärkte Anstrengungen (Kyoto):* Diese Variante verfolgt das Ziel eines möglichst hohen Beitrags EE zur Erreichung der Kyoto-Verpflichtung.

*Gebäudesektor:* Forcierung von Wärmeschutzmaßnahmen (zur Verringerung des Heizenergiebedarfs); Forcierung einzelner RES-H Technologien, insbes. der Biomasse.

*Stromsektor:* geringeres Gewicht auf Verstromung von Biomasse

---

<sup>41</sup> Es sei angemerkt, dass weitere Alternativvorschläge auf Basis einer realitätsnahen Politikdiskussion gesondert in Kapitel 8 (Politikempfehlungen) dieser Studie vorgestellt werden.

*Verkehrssektor:* identisch mit Szenario „Verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)“

*Verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare):* Diese Variante verfolgt das Ziel einer möglichst starken Nutzung Erneuerbarer Energieträger.

*Gebäudesektor:* keine Anreizänderung für Wärmeschutzmaßnahmen, einzelne RES-H Technologien forcieren

*Stromsektor:* höheres Gewicht auf Verstromung von Biomasse

*Verkehrssektor:* identisch mit Szenario „Verstärkte Anstrengungen (Kyoto)“

Sensitivitätsuntersuchungen werden für zwei Szenarien – d.h. den Business-as-usual Fall sowie eine passende Szenarienvariante des Pfades „verstärkte Anstrengungen“ – durchgeführt und beinhalten die Variation der folgenden Parameter: Zinssatz (bzw. die entsprechende Risikobewertung), Referenzenergiepreise, Nachfrageentwicklung (Referenz vs. Energieeffizienzscenario), technologisches Lernen (moderates vs. beschleunigtes Lernen durch moderaten bzw. erhöhten Referenzausbau auf globaler Ebene). Im Hinblick auf den Stromsektor wird weiters die Möglichkeit der Biogasdirekteinspeisung (in Kopplung mit Gaskraftwerk) untersucht sowie die Fortführung bzw. Abschaffung der Photovoltaikförderung entsprechend diskutiert.

Ebenso werden Varianten bez. möglicher Biomasseimporte diskutiert – dies beinhaltet vor allem Pellets (im Wärmebereich) sowie Biotreibstoffimporte. In diesem Zusammenhang wird ein Produkt, das auf Basis eines Rohstoffs, der in Luxemburg wuchs oder anfiel, im Ausland verarbeitet und dann (re)importiert wurde, nicht als Importprodukt definiert. Die Ergebnisse werden jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Treibstoffexporten dargestellt.

## **6.2 Rahmenannahmen**

Die wesentlichen Eingangsdaten für die Modellierung sind neben den in Abschnitt 5 dargestellten Potenzialen und Kosten erneuerbarer Energieträger die Entwicklung der Energienachfrage, der fossilen Energiepreise sowie der CO<sub>2</sub> Zertifikatspreise. Diese Annahmen sollen in diesem Abschnitt erläutert werden. Ebenso werden weitere Angaben zu den Eingangskenngrößen der modellhaften Betrachtung skizziert.

### **6.2.1 Energiebedarf**

Es wurden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Szenarien im Hinblick auf die künftige Entwicklung der Energienachfrage erarbeitet – ein Referenzscenario, das den „Business-as-usual (BAU)“ Trend fortschreibt, sowie ein Szenario, in dem ver-

stärkte Energieeffizienzmaßnahmen unterstellt wurden. Einen Überblick bezüglich der resultierenden Kenngrößen des Endenergieverbrauchs gibt Tabelle 6-1 für beide Fälle.

Tabelle 6-1: Wesentliche Kenngrößen des Endenergieverbrauchs

Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2020	Referenzszenario (BAU)			Verstärkte Energieeffizienz	
	2005	2010	2020	2010	2020
<b>Stromverbrauch, brutto (inkl. Verluste) in GWh</b>	<b>6597</b>	<b>7247</b>	<b>8924</b>	<b>7073</b>	<b>7989</b>
<b>Wärmeverbrauch, gesamt in GWh</b>	<b>14133</b>	<b>15307</b>	<b>18909</b>	<b>14991</b>	<b>18064</b>
Gebäudesektor in GWh	4277	4036	3577	3906	3346
Industrielle Prozesswärme in GWh	7746	9062	12553	8982	12247
Dienstleistungs- u. Landwirtsch.sektor in GWh	1526	1589	2077	1525	1897
Fernwärmebedarf in GWh	584	620	702	578	574
<b>Kraftstoffverbrauch Inland in GWh</b>	<b>6456</b>	<b>7395</b>	<b>8231</b>	<b>6075</b>	<b>5388</b>
<b>Kraftstoffverbrauch inkl. Treibstoffexport in GWh</b>	<b>26900</b>	<b>32153</b>	<b>45914</b>	<b>29349</b>	<b>38881</b>

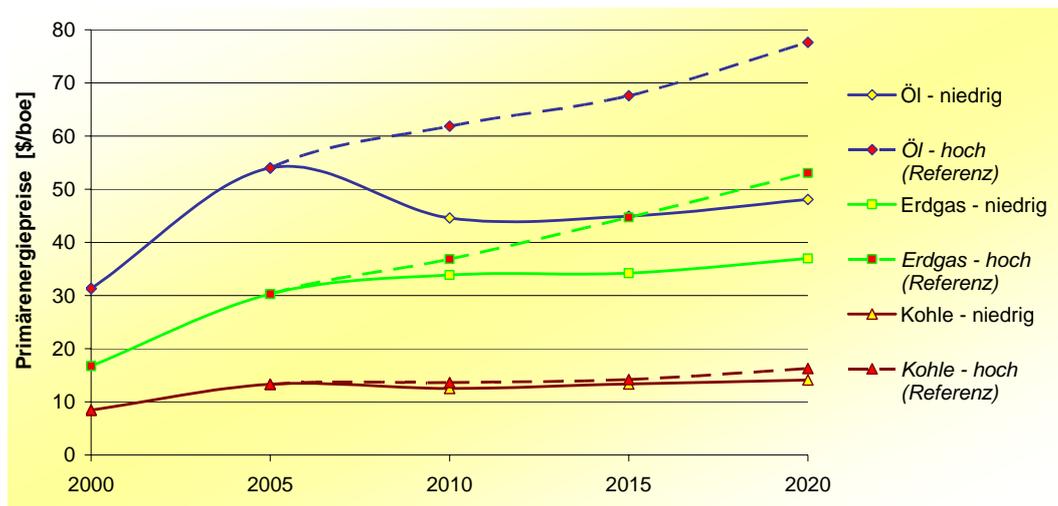
Anmerkung: Die Daten für den gesamten Primärenergieverbrauch wurden auf Basis der Endenergieaufbringung und der Umwandlungseffizienz der einzelnen Sektoren endogen im Modell *Green-X* für die unterschiedlichen Fälle in Abhängigkeit des Ausbaus erneuerbarer Energien endogen bestimmt und sind folglich in obiger Darstellung nicht enthalten.

Die Ausgangsbasis stellten hierbei in beiden Fällen reale Verbrauchsdaten des Jahres 2005 dar. Die künftige Bedarfsentwicklung wurde in beiden Fällen auf sektoraler Ebene untersucht, wobei unterschiedliche Annahmen zugrunde gelegt wurden:

- Für den Strombereich wurde im Hinblick auf Entwicklungstrends, im Detail die künftigen prozentuellen Wachstumsraten, einerseits im BAU-Fall das Referenzszenario der EU unterstellt ("European Energy and Transport Trends to 2030"), und andererseits im Falle verstärkter nachfrageseitiger Maßnahmen auf eine entsprechende EU-Projektion zurückgegriffen („Efficiency case“ gemäß „Scenarios on energy efficiency and renewables“ (Mantzos et al., 2006)).
- Für den Wärmebedarf des Gebäudesektors wurden eigene Projektionen auf Basis der Simulationssoftware INVERT vorgenommen. Für die industrielle Prozesswärme, den Dienstleistungs- und Landwirtschaftssektor sowie den Fernwärmeverbrauch wurde wie im Strombereich auf die entsprechenden EU-Projektionen zurückgegriffen.
- Der Energiebedarf im Verkehrssektor wurde auf der Basis nationaler Projektionen behandelt – eine Referenzprojektion gemäß historischer Trends sowie ein Szenario im Einklang mit Luxemburgs nationalem Allokationsplan. An dieser Stelle wurden insbesondere die Fälle mit und ohne Treibstoffexport unterschieden.

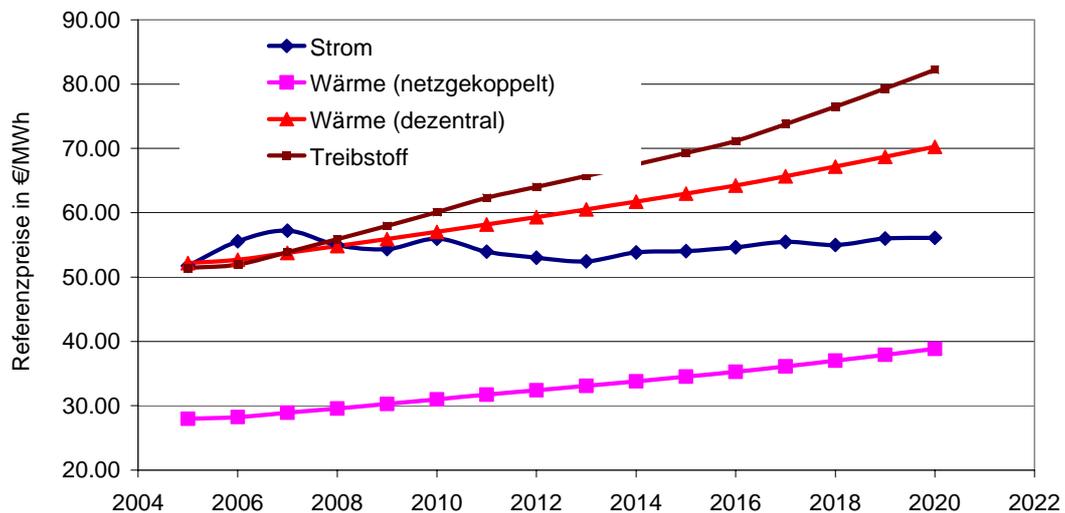
Die sich ergebende primärenergetische Bilanz weist eine Abhängigkeit vom endogen entwickelten Ausbau erneuerbarer Energien auf, sodass eine entsprechende Darstellung im Rahmen der diskutierten Ausbauszenarien nachfolgend vorgenommen wurde.

## 6.2.2 Referenzenergiepreise



Quelle: EU DG TREN

Abbildung 6-1: Primärenergiepreise für Öl, Erdgas und Kohle



Anmerkung: Alle Angaben auf realer Basis in €<sub>2005</sub>.

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 6-2: Endenergiepreise ohne Steuern für das Referenzszenario

Die Referenz-Primärenergiepreise, welche für das Hoch- und Niedrigpreisszenario in Abbildung 6-1 dargestellt sind, entsprechen den Szenarien der EU (DG TREN). Basierend auf diesen Primärenergiepreisen wurden die Preise für Strom, Wärme (netzgekoppelte und dezentral) sowie für Treibstoffe im Verkehr bestimmt, siehe Abbildung 6-2. Für den Stromsektor wurden diese Preise endogen in **Green-X** bestimmt. Für den Wärmesektor wurden die Referenzpreise basierend auf ausgewählten Umwandlungstechnologien und dem luxemburgischen Split verschiedener Energiequellen im Wärmesektor bestimmt. Die Endenergiepreise im Transportsektor wurden auf Basis realistischer Korrelationen zwischen internationalem Ölpreis und Benzin und Dieselpreis in Luxemburg bestimmt. Sämtliche Endenergiepreise wurden entsprechend der Sensitivitäten bezüglich der Primärenergiepreise variiert.

Weiterhin wurde für die durchgeführten Analysen ein CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis von 20 €/t zugrunde gelegt.<sup>42</sup>

### **6.2.3 Kosten und Potenziale erneuerbarer Energien**

Annahmen zu den Kosten und Potenzialen der einzelnen Technologien auf Basis erneuerbarer Energien stehen im Einklang mit den detaillierten Ausführungen gemäß Kapitel 5 dieser Studie. Hierbei sei angemerkt, dass im Hinblick auf die Ressourcenverfügbarkeit bzw. deren dynamische Entwicklung die identifizierten realisierbaren Potenziale gemäß Tabelle 5-1 die Ausgangsbasis darstellen.<sup>43</sup> Abgesehen von den hierin beschriebenen inländischen Ressourcen wurde auch die Möglichkeit von Energieimporten untersucht. Hierbei wurde für Pellets – von Relevanz im Wärmebereich – bereits im Regelfall, also bei allen untersuchten Fällen, angenommen, dass Importe bis hin zu 30% des zusätzlich realisierbaren Energieholz-Potenzials möglich wären.<sup>44</sup> Für Biokraftstoffe wurden hingegen standardmäßig lediglich einheimischen Ressourcen in Betracht gezogen, da ansonst aufgrund des

---

<sup>42</sup> Die in den vergangenen Jahren am Markt zu beobachtende Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise war keineswegs stetig. Es zeigten sich zum Teil hohe Schwankungen in einer Bandbreite von rund 7 bis 20 € je Tonne CO<sub>2</sub>, mit einem Mittelwert in Höhe von etwa 15 bis 20 €/t. Für die Folgejahre ist jedoch aufgrund der restriktiveren Zielvorgaben mit einem konstanteren Preisverlauf in Höhe von 20 €/t auszugehen.

<sup>43</sup> Im Bereich der solarthermischen Sonnenenergienutzung sowie der Photovoltaik, wo Tabelle 5-1 Bandbreiten hinsichtlich der mittelfristig realisierbaren Potenziale enthält, dienen die unteren Bandbreiten im Referenzfall als Ausgangsbasis. Größere realisierbare Potenziale entsprechend den oberen Bandbreiten wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalysen betrachtet.

<sup>44</sup> Die getroffene Annahme, dass bis zu 30% des Zuwachses im Bereich der Energieholznutzung durch Biomasseimporte gedeckt werden können, steht im Einklang mit der historisch in vergleichbaren Marktsegmenten beobachteten sowie der prognostizierten Marktentwicklung auf europäischer Ebene.

zu erwartend hohen Importpotenzials klare Aussagen bezüglich der Luxemburgischen Ressourcen an erneuerbaren Energien nur erschwert zu verifizieren wären.

Die ökonomische Beschreibung der verschiedenen EE Technologien basiert sowohl auf wirtschaftlichen als auch technischen Spezifikationen im Einklang mit den in Luxemburg identifizierten Spezifika. Hierzu wurden die langfristigen Grenzkosten der Stromerzeugung berechnet, wobei für die Berechnung der Annuität abgesehen vom unterstellten Zinssatz in Höhe von 6,5%<sup>45</sup> sowohl eine einheitliche Abschreibungsdauer von 15 Jahren als auch die technologiespezifische Lebensdauer herangezogen wurde.

#### **6.2.4 Eingangsparemeter allgemeiner Natur**

Abgesehen von den zuvor diskutierten Kernannahmen wie Energiepreise werden nachfolgend weitere Eingangsparemeter in aller Knappheit aufgelistet.

- **Risikobewertung**

Die Bestimmung der notwendigen Rendite basiert auf der „Weighted Average Cost of Capital“ (WACC) Methode. Zwei unterschiedliche Raten wurden berücksichtigt, nämlich 6,5% (Basiswert) und 8,6% (höhere Risikobewertung). Abweichungen hiervon sind lediglich im BAU-Szenario von Bedeutung, wo aufgrund der fehlenden Garantie hinsichtlich des Beibehaltens der derzeitigen Vergütungshöhe technologiespezifisch ein deutlich höherer Risikoaufschlag angesetzt wurde. Die resultierende Bandbreite liegt im Bereich vom 1,3 bis 2-fachen des Basiswerts.

- **Technologischer Wandel**

Die Abschätzung der zukünftigen Investitionskostenentwicklung beruht für die meisten Technologien auf dem Prinzip technologischen Lernens. Dies bedeutet, dass auf Technologieebene Lernraten angenommen wurden, welche die Kostendegression bei Verdopplung der installierten Kapazität beschreiben. Die künftige Kapazitätsentwicklung auf globaler Ebene bestimmt somit die Kostenreduktion.<sup>46</sup> Zwei Szenarien der globalen Entwicklung erneuerbarer Energien wurden im Rahmen dieser Studie in Betracht gezogen. Den Referenzfall bildet

---

<sup>45</sup> Der unterstellte Zinssatz von 6,5% wurde gemäß der „Weighted Average Cost of Capital (WACC)“-Methode entwickelt und korrespondiert beispielsweise zu einer Eigenkapitalrendite in Höhe von 7,1% sowie 5% Risikoaufschlag bei unterstelltem 75%-igem Fremdkapitalbezug.

<sup>46</sup> Es sei angemerkt, dass der Einfluss des endogen im Rahmen der Szenarien bestimmten Ausbaus erneuerbarer Energien in Luxemburg auf die globale Kostenentwicklung vernachlässigt wurde. Luxemburg agiert somit als Preisnehmer.

ein Business-as-usual Szenario, während als Sensitivität ein beschleunigter Ausbau EE unterstellt wurde. Für die Abschätzung der Entwicklung innerhalb der EU wurde hierbei auf entsprechende aktuelle Modellierungen<sup>47</sup> zurückgegriffen, währenddessen für die Entwicklung im Rest der Welt aktuelle Szenarien der Internationalen Energieagentur, beschrieben im kürzlich veröffentlichten „World Energy Outlook 2006“ (IEA, 2006), zugrunde gelegt wurden.

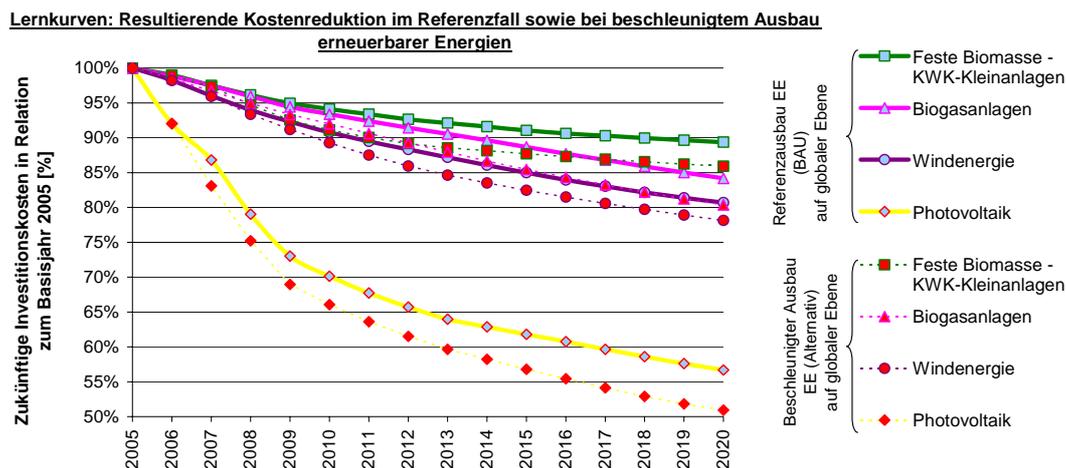


Abbildung 6-3: Resultierende technologiespezifische Kostenreduktionen durch technologisches Lernen im Referenzfall sowie bei beschleunigtem Ausbau erneuerbarer Energien

Eine Darstellung der resultierenden Lernkurven für beide Fälle bietet Abbildung 6-3 am Beispiel ausgewählter EE-Technologien. In beiden Fällen sind die höchsten Kostenreduktionen im Bereich der Photovoltaik zu beobachten, gefolgt von der Windenergie. Generell sei angemerkt, dass die Unterschiede im Hinblick auf die resultierenden Lernkurven zwischen dem moderaten (gemäß BAU-Szenario) und dem beschleunigten Ausbau EE vergleichsweise gering ausfallen.

#### • Technologiediffusion / Hemmnisse des Ausbaus erneuerbarer Energien

Zur Einschätzung der Marktdiffusion der betrachteten Energietechnologien wurden zweierlei Varianten in Betracht gezogen:

Basierend auf einer umfassenden Analyse der historischen Entwicklung wurde eine Parameterabstimmung vorgenommen, die derzeit bestehende Barrieren

<sup>47</sup> Diese Szenarien wurden mittels Green-X im Rahmen der Studie PROGRESS erstellt. Es handelt sich hierbei um eine aktuelle Auftragsstudie seitens der Europäischen Kommission, GD Energie & Verkehr zur Analyse des Fortschritts erneuerbarer Energien in den EU-Mitgliedsstaaten unter der Leitung von Ecofys sowie unter Mitwirkung von FhG-ISI und TU Wien, EEG (Kontrakt Nr. TREN/D1/42-2005/S07.56988).

nicht ökonomischer Natur widerspiegelt. Dies umfasst Markteintrittsdefizite wie aufwendige Genehmigungsverfahren, Informationsdefizite der Marktakteure, aber auch Hemmnisse technologischer (z.B. Netzanschluss im Falle von Windenergie) und soziologischer Natur. Derartige Barrieren resultieren in einer *verzögerten Technologiediffusion*.

Andererseits wurde auch der Fall untersucht, in dem ein massiver Abbau dieser Hemmnisse unterstellt wird und der folglich – bei entsprechenden ökonomischen Rahmenbedingungen – zu einer *beschleunigten Technologiediffusion* führt. Dies stellt insbesondere die Basiseinstellung bei Betrachtung des Szenarienpfads „verstärkter Anstrengungen“ dar, wohingegen die aufgrund bestehender Hemmnisse verzögerte Technologiediffusion die Ausgangsbasis des Referenzfalls einer Fortführung bestehender Politiken darstellt.

### 6.2.5 Annahmen bezüglich der Förderpolitiken

Sowohl die Effektivität als auch die ökonomische Effizienz der Förderinstrumente hängen wesentlich von den jeweils gesetzten Rahmenbedingungen wie garantierte Förderzeit, Höhe der Förderung, usw. ab. In dieser Studie soll unter anderem aufgezeigt werden, wie mittels geeigneter Marktanzreizsysteme ein verstärkter Ausbau erneuerbarer Energien erreicht werden kann und welche Konsequenzen hieraus resultieren. Konkret werden hierbei für den Szenarienpfad „verstärkte Anstrengungen“ folgende optimistische Bedingungen vorausgesetzt:

- Stabiler Planungshorizont,
- kontinuierliche Förderpolitik für erneuerbare Energien mit langfristig gesetzten Zielen auf sektoraler bzw. Technologieebene,
- klar definierte Tarifstrukturen bzw. transparente Genehmigungsverfahren,
- die einzelnen Instrumente werden nur für neue Kapazitäten angewandt, d.h. die Förderung für bereits bestehender Anlagen bleibt unverändert und
- die Unterstützungsdauer für die einzelnen Technologien wird auf 15 Jahre beschränkt.

Abschließend sei angemerkt, dass bei allen Politikvarianten, deren Wirkung im Zeitraum 2006 bis 2020 untersucht wird, davon ausgegangen wurde, dass deren Umsetzung unmittelbar erfolgt.

## 6.3 Ergebnisse

Einleitend sei angemerkt, dass im Rahmen der nachfolgenden Ergebnisdiskussion die untersuchten Zielpfade hinsichtlich des Ausbaus erneuerbarer Energien getrennt dargestellt werden: Einleitend wird der hypothetische Fall des wirtschaftlichen Realisierungspotenzials knapp vorgestellt, gefolgt von einer detaillierten Betrachtung des *Business-as-usual (BAU) Szenarios* und dessen Sensitivitätsunter-

suchungen. Abschließend wird aufgezeigt, wie mittels verstärkter Anstrengungen, entweder mit Fokus auf den Stromsektor oder im Hinblick auf die Erhöhung des Beitrags EE zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele, eine nahezu vollständige Ausschöpfung der identifizierten realisierbaren Potenziale erneuerbarer Energien erreicht werden kann. Es sei angemerkt, dass schließlich eine vergleichende Kosten-Nutzen-Analyse im nachfolgenden Kapitel 7 vorgenommen wird.

### 6.3.1 Das wirtschaftliche Realisierungspotenzial erneuerbarer Energien

Eingangs sei der (hypothetische) Fall „*keiner Förderanreize*“ skizziert, welcher das **wirtschaftliche Realisierungspotenzial** erneuerbarer Energien aufzeigt. Hier wird dargestellt, welcher (geringe) Ausbau ohne jegliche Förderanreize resultieren würde – d.h. ohne Weiterführung der bestehenden Maßnahmen, aber auch ohne Alternativansätze diesbezüglich.

Ohne jegliche Förderanreize ist mit einem geringen Ausbau erneuerbarer Energien zu rechnen.

Abbildung 6-4 veranschaulicht die zeitliche Entwicklung bei Betrachtung der prozentualen Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das betrachtete Szenario des rein wirtschaftlichen Realisierungspotenzials. Bei Betrachtung der primärenergetischen Anteile gemäß Substitutionsprinzip<sup>48</sup> ist ein Rückgang von derzeit rund 1,4% auf etwa 1,2% zu beobachten. Bereinigt man diese Bilanzierung um die derzeitigen als auch zu erwartenden zukünftigen Treibstoffexporte, so resultiert ein Rückgang von heute etwa 2,4% auf 2,1% bis 2020. Im Stromsektor erscheint der Rückgang noch weitaus dramatischer: Aufgrund des gemäß BAU-Referenzentwicklung prognostizierten ver-

---

<sup>48</sup> Das *Substitutionsprinzip* wurde zur Darstellung der Primärenergieanteile vorrangig verwendet, da es als aussagekräftiger im Hinblick auf die Veranschaulichung des Beitrags EE erachtet wurde. Hierbei erfolgt für erneuerbare Energien wie Wind-, Solarenergie oder Wasserkraft die Umrechnung von End- zu Primärenergie entsprechend dem sektoralen mittleren konventionellen Umwandlungswirkungsgrad.

Im Gegensatz dazu besagt die häufig angewandte *Eurostat-Konvention*, dass die Umrechnung von End- zu Primärenergie stets gemäß dem technologiespezifischen Umwandlungswirkungsgrad zu erfolgen habe. Im Falle von erneuerbaren Energien wie Wind-, Solarenergie oder Wasserkraft wird aufgrund der Unbestimmtheit der tatsächlich auf Anlagenebene bzw. im Mittel anfallenden Konversionseffizienz ein Vereinfachung vorgenommen und der Wirkungsgrad fiktiv mit 100% angesetzt. Dies bedingt, dass beispielsweise ein hoher Windenergieanteil gemessen an der Stromaufbringung aber nur bedingt in der Primärenergiebilanz aufscheint, da im Vergleich hierzu thermische Kraftwerke mit einem rund 2 bis 3-fach höheren Primärenergiebeitrag entsprechend des Brennstoffeinsatzes bilanziert werden.

gleichsweise hohen Nachfragewachstums sowie aufgrund des überwiegend fehlenden wirtschaftlichen Realisierungspotenzials EE in diesem Sektor resultiert ein Rückgang des EE-Anteils von derzeit rund 3,4% auf 2,6% bis 2020. Lediglich im Wärmebereich ergibt sich ein Anstieg auch bei Betrachtung des relativen Ausbaus von derzeit 1,8% auf 2,0%. Dies veranschaulicht weitaus klarer Abbildung 6-5, die den Ausbau EE in absoluten Zahlen skizziert. Im Detail wird hier auf sektoraler Ebene die zeitliche Entwicklung der EE-Energieerzeugung gezeigt, als auch die im Jahr 2020 resultierenden Anteile der einzelnen Sektoren bezogen auf die gesamte EE-Erzeugung aufgeschlüsselt. Der Wärmesektor scheint als einziger auch ohne Förderanreize von den derzeit hohen Energiepreisen zu profitieren, wodurch ein geringer Ausbau EE resultieren würde. Seine Dominanz gemessen an der Gesamtaufbringung auf Basis EE würde folglich weiter ausgebaut werden, sodass im Jahr 2020 rund 60% der gesamten EE-Erzeugung dem Wärmesektor zuzurechnen wäre.

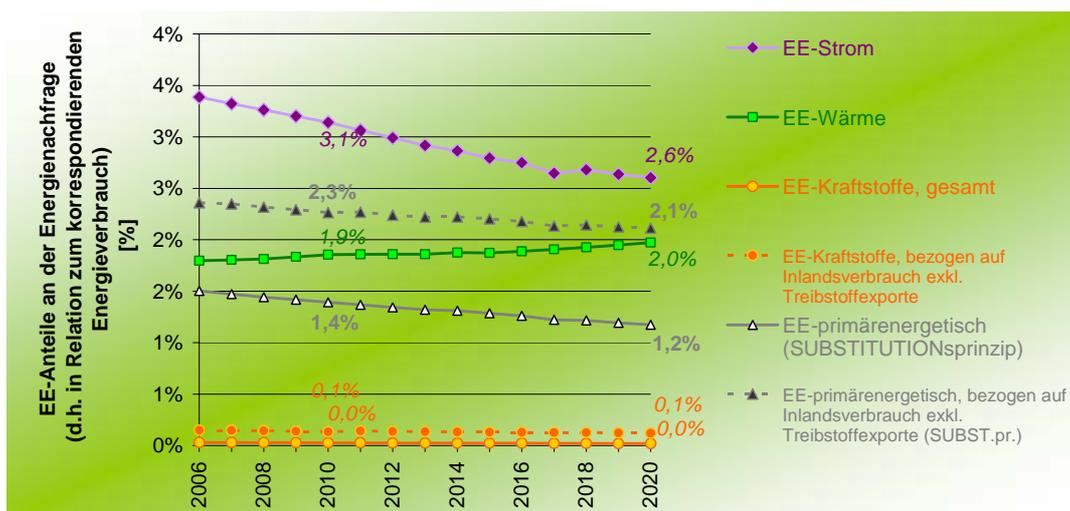


Abbildung 6-4: Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene gemäß dem *wirtschaftlichen Realisierungspotenzial*

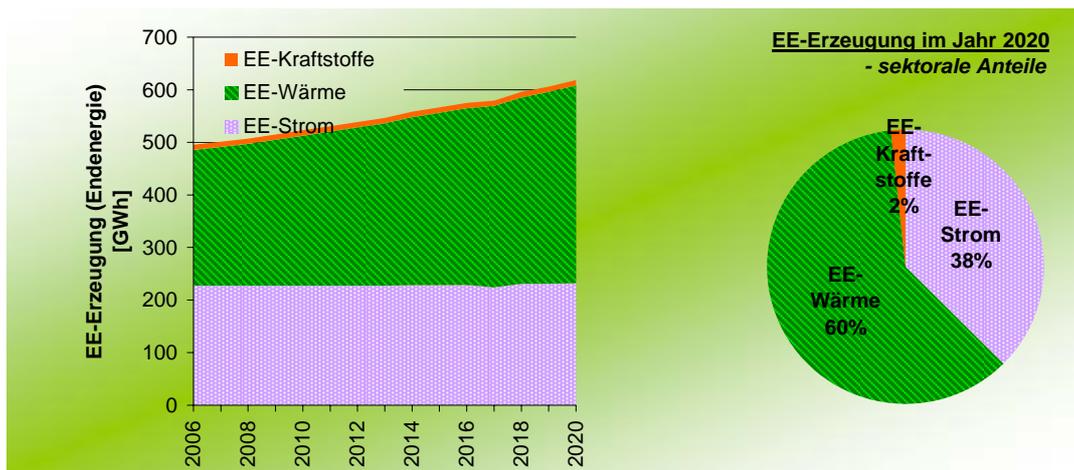


Abbildung 6-5: EE-Energieerzeugung auf sektoraler Ebene gemäß dem *wirtschaftlichen Realisierungspotenzial*. Aufgeschlüsselt hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung (links) sowie im Hinblick auf sektorale Anteile im Jahr 2020 (rechts).

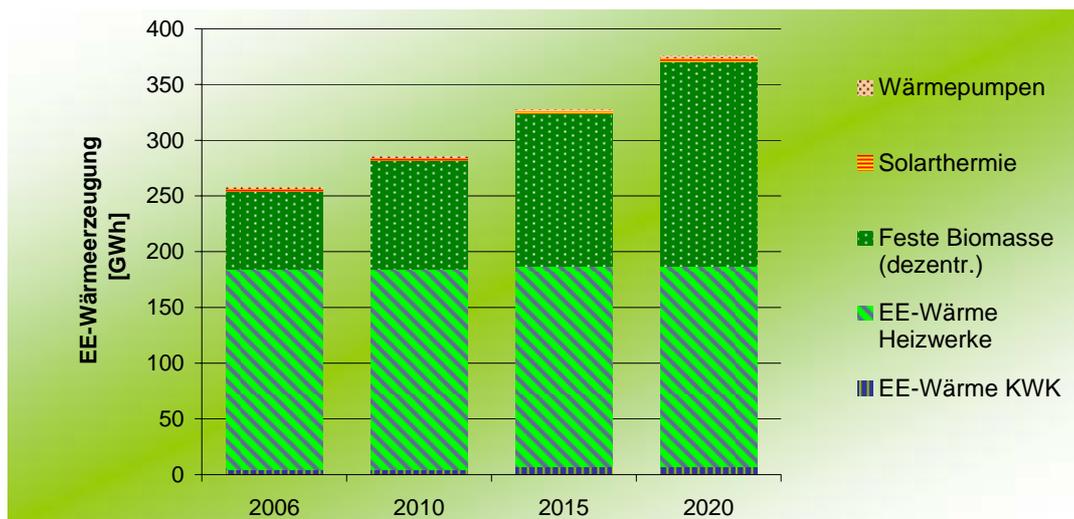


Abbildung 6-6: Entwicklung der EE-Wärmeproduktion auf Technologieebene gemäß dem *wirtschaftlichen Realisierungspotenzial*

Abbildung 6-6 verrät, welche Technologien für den Zuwachs an EE-Wärme gemäß dem wirtschaftlichen Realisierungspotenzial verantwortlich wären. Die dezentrale Biomassenutzung dominiert hierbei den Ausbau klar, wobei rund 80% auf Hack-schnitzelanlagen entfallen und die verbleibenden 20% der Nutzung von (importierten) Pellets entsprechen. Sonstige EE-Technologien im Wärmebereich zeigen keine Veränderung gegenüber der Ausgangslage.

Förderkosten erscheinen bei Betrachtung des wirtschaftlichen Realisierungspoten-

zials ohne Relevanz. Dies mag auch im Hinblick auf Neuanlagen, also jene im betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020 errichteten Anlagen, zustimmen, andererseits fallen auch ohne zukünftige Ausbauanreize in den kommenden Jahren Kosten an. Diese beziehen sich auf den bereits errichteten EE-Anlagenpark. Insbesondere im Bereich der Stromerzeugung, wo eine erzeugungsbezogene Vergütung mittels Einspeisetarife derzeit aber auch in der Vergangenheit bestimmend war, fallen in Folge noch Förderkosten an. Die in nachfolgender Abbildung 6-7 ausgewiesenen Kosten im Strombereich entsprechen folglich der Vergütung der von Altanlagen eingespeisten Energie. Entsprechendes gilt auch für den Bereich der Biokraftstoffe, wo wie im Stromsektor im betrachteten Szenario unterstellt wurde, dass Altanlagen trotz fehlender vertraglicher Fördergarantie wie gehabt eine mengenbezogene Vergütung erhalten würden. Im Detail zeigt Abbildung 6-7 die zeitliche Entwicklung der notwendigen Transferzahlungen für Altanlagen seitens der Konsumenten bezogen auf den Gesamtverbrauch auf sektoraler Ebene. Im Strombereich ist ein Absinken des Aufpreises je Megawattstunde Gesamtnachfrage von derzeit 2,0 auf etwa 0,9 €/MWh zu erwarten. In den anderen Sektoren bestehen keine merkenswerten Verpflichtungen, welche unter der gegebenen Skalierung ersichtlich würden.

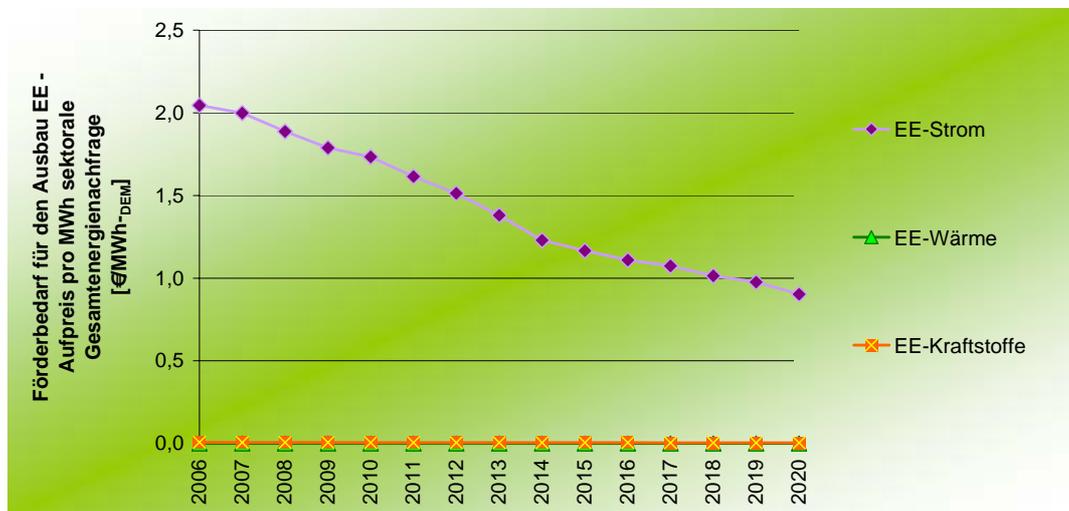


Abbildung 6-7: Entwicklung des notwendigen Aufpreises pro MWh Gesamtnachfrage auf sektoraler Ebene für bereits bestehende EE-Anlagen (gemäß dem *wirtschaftlichen Realisierungspotenzial*)

Obige Ausführungen unterstreichen die Notwendigkeit energiepolitischer Instrumente gemäß den derzeitigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen, will man den Weg zu einem nachhaltigen Energiesystem unter anderem durch einen forcierten

Ausbau EE beschreiten. Selbst bei Fortbestand der derzeit hohen Energiepreise im Bereich der fossilen Energieträger, wie in dieser Betrachtung unterstellt, resultiert in Luxemburg auf Basis der identifizierten Ressourcen nur ein marginaler Ausbau EE.

### 6.3.2 Das Business-as-usual (BAU) Szenario

Das *Business-as-usual (BAU)* Szenario beschreibt die Entwicklung erneuerbarer Energien auf Basis der derzeit implementierten Förderanreize. Es wird folglich der zu erwartende Ausbau EE aufgezeigt sowie die damit verbundenen Auswirkungen im Hinblick auf Klimaschutz und Versorgungssicherheit diskutiert. Weiters wird die resultierende Kostenbelastung dargestellt. Abschließend zeigen Sensitivitätsuntersuchungen die Abhängigkeit der gezeigten Ergebnisse von den getroffenen Annahmen im Hinblick auf Energiepreise, Nachfrageentwicklung sowie Ressourcenverfügbarkeit. Ebenso wird anhand von Ausgestaltungsvarianten der implementierten Regelungen skizziert, welche Auswirkungen mit ergänzenden Maßnahmen verbunden wären.

#### 6.3.2.1 Der künftige Ausbau erneuerbarer Energien

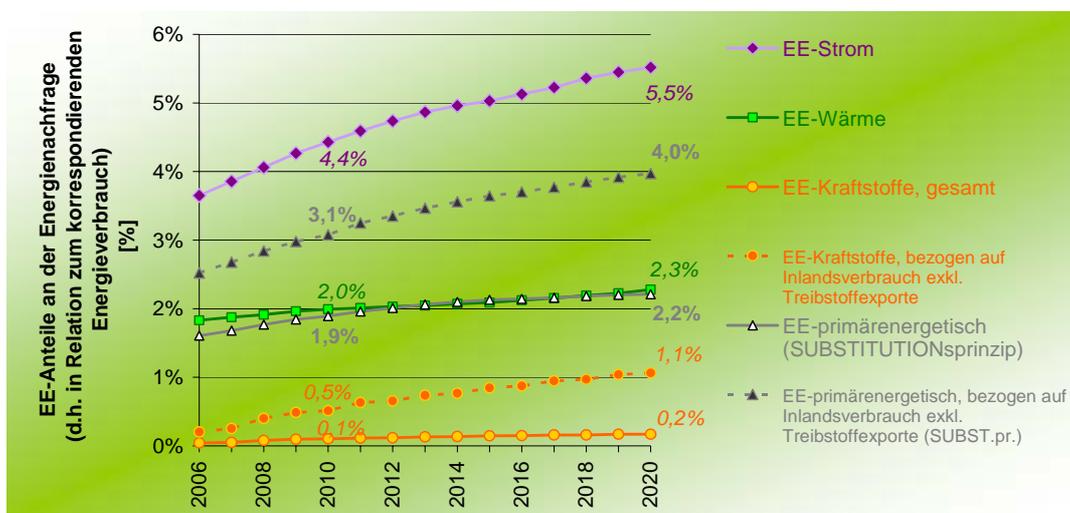


Abbildung 6-8: Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das BAU-Szenario

Bei *Beibehaltung der derzeitigen Fördersysteme (BAU)* ist von einer Erhöhung des Anteils EE am Inlandsenergieverbrauch von derzeit 1,4% auf etwa 2,2% bis 2020 auszugehen.<sup>49</sup> Der Anteil als auch der Anstieg mögen marginal erscheinen, es ist

<sup>49</sup> Die Angaben bez. Primärenergie beruhen auf Anwendung des Substitutionsprinzips.

jedoch zu beachten, dass dieses Bild seitens der Treibstoffexporte wesentlich beeinflusst wird. Bereinigt man die Primärenergiebilanz um diesen Einflussfaktor, so resultieren wesentlich höhere Beiträge seitens der Erneuerbaren – 2,4% als Status Quo sowie 4,0% im Jahr 2020. Eine Darstellung des zeitlichen Verlaufs des relativen Beitrags EE primärenergetisch als auch auf sektoraler Ebene ist nachfolgender Abbildung 6-8 zu entnehmen.

Mit einem Primärenergiebeitrag von mehr als 50% in allen untersuchten Fällen nimmt die Stromerzeugung aus EE hierbei heute als auch künftig eine zentrale Rolle ein. Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien decken derzeit 3,45% der Stromnachfrage, dies entspricht in absoluten Zahlen etwa 219 GWh. Trotz eines stetigen Wachstums der Stromnachfrage, wie im Referenzfall unterstellt, wird der Anteil am Gesamtstrombedarf bei Fortführung derzeitiger Förderpraktiken (BAU) bis 2010 auf 4,4% ansteigen und im Jahr 2020 5,5% betragen. Gemessen am 2010er Ziel gemäß RES-E Direktive für Luxemburg in Höhe von 5,7% bedeutet dies eine Verfehlung um etwa 23%. Eine Zielerreichung ist aber durch Verbesserung der Rahmenbedingungen im Bereich des Möglichen. Insbesondere durch massiven Abbau nicht-ökonomischer Hemmnisse und gleichzeitiges Setzen von Energieeffizienzmaßnahmen kann kurzfristig durch Fokus auf rasch verfügbare Technologien die EU-Vorgabe erfüllt werden.

Im Wärmesektor erscheint der Zuwachs weniger dramatisch: 2,3% im Jahr 2020 stehen im Vergleich zu etwa 1,8% derzeit. Ein rasanter Ausbau ist hingegen im Bereich der Biokraftstoffe absehbar. So wird allein im Zeitraum 2010 bis 2020 der prozentuale Anteil von beispielsweise 0,5% auf 1,1% in Relation zum inländischen Kraftstoffverbrauch des Straßenverkehrs mehr als verdoppelt.

Die absoluten Zahlen der prognostizierten Energieerzeugung auf Technologieebene zeigt nachfolgende Tabelle 6-2. Diese Tabelle beinhaltet ebenso Angaben zu den korrespondierenden technologiespezifischen Anteilen an der sektoralen Gesamtbilanz EE für die Jahre 2010 und 2020.

Die Stromerzeugung aus EE verzeichnet einen Zuwachs in absoluten Zahlen von 214 GWh (2005) auf 493 GWh im Jahr 2020, was mehr als einer Verdopplung entspricht. Auf Technologieebene erscheint unter den betrachteten Rahmenbedingungen ein vergleichsweise bedeutsamer Ausbau auf dem Gebiet der Windenergie sowie der Biogas- und Biomasse-Verstromung als realistisch. Andere Optionen wie Photovoltaik oder Kleinwasserkraft zeigen kein Wachstum.

Ähnlich zur Stromerzeugung wird auch im Wärmesektor der Bestand nahezu verdoppelt – es ist ein Ausbau von derzeit etwa 240 GWh auf 431 GWh zu erwarten. Im Detail wird hierbei ein massiver Ausbau dezentraler Technologien antizipiert –

insbesondere moderne Biomasse-Heizsysteme wie Pellets- oder Hackschnitzelanlagen weisen ein hohes Zukunftspotenzial auf, das unter den unterstellten ökonomischen Randbedingungen erschlossen werden kann. Wärmepumpen zeigen ebenfalls hohe Wachstumsraten auf, vor allem da ihr derzeitiger Beitrag (siehe Kapitel 3) auch noch sehr gering ist.

Im Bereich der Biokraftstoffe ist davon auszugehen, dass bei Beibehaltung der bestehenden Maßnahmen das identifizierte realisierbare Potenzial nahezu vollständig ausgeschöpft wird. Es ist ein Ausbau von derzeit rund 15 GWh auf 87 GWh im Jahr 2020 prognostiziert.

Tabelle 6-2: Energieproduktion aus EE auf Technologieebene bis 2020 für das BAU-Szenario

<b>EE-Strom</b>	<b>Stromerzeugung</b>				<i>Anteile an EE-Strom gesamt [%]</i>	
	[Einheit]	2010	2015	2020	2010	2020
Biogas	[GWh/a]	64	89	105	20%	21%
Feste Biomasse	[GWh/a]	19	41	63	6%	13%
Biogener Müll	[GWh/a]	20	22	22	6%	4%
Kleinwasserkraft	[GWh/a]	101	101	101	31%	21%
Photovoltaik	[GWh/a]	19	19	19	6%	4%
Windenergie	[GWh/a]	97	141	183	30%	37%
<b>EE-Strom gesamt</b>	<b>[GWh/a]</b>	<b>321</b>	<b>412</b>	<b>493</b>		
EE-Strom KWK	[GWh/a]	35	56	76	11%	15%
<b>EE-Wärme</b>	<b>Wärmeerzeugung</b>				<i>Anteile an EE-Wärme gesamt [%]</i>	
	[Einheit]	2010	2015	2020	2010	2020
Biogas (netzgek.)	[GWh/a]	6	9	11	2%	3%
Feste Biomasse (netzgek.)	[GWh/a]	187	194	203	61%	47%
Biogener Müll (netzgek.)	[GWh/a]	0	3	3	0%	1%
Feste Biomasse (dezentr.)	[GWh/a]	104	144	190	34%	44%
Solarthermie	[GWh/a]	6	8	13	2%	3%
Wärmepumpen	[GWh/a]	2	4	12	1%	3%
<b>EE-Wärme gesamt</b>	<b>[GWh/a]</b>	<b>305</b>	<b>363</b>	<b>431</b>		
EE-Wärme KWK	[GWh/a]	13	26	36	4%	8%
EE-Wärme Heizwerke	[GWh/a]	180	180	181	59%	42%
EE-Wärme dezentral	[GWh/a]	111	157	214	37%	50%
<b>EE-Kraftst.</b>	<b>Biokraftstofferzeugung</b>				<i>Anteile an EE-Kraftst. gesamt [%]</i>	
	[Einheit]	2010	2015	2020	2010	2020
Biokraftstoffe	[GWh/a]	38	64	87	100%	100%
<b>EE-Kraftstoffe gesamt</b>	<b>[GWh/a]</b>	<b>38</b>	<b>64</b>	<b>87</b>		

Abschließend zeigt Tabelle 6-3 einen Vergleich der unter den betrachteten Rahmenbedingungen zu erwartenden Ausschöpfung mit den identifizierten realisierbaren Potenzialen auf Energieträgerebene für die Jahre 2010 und 2020. Die ersichtlichen Angaben bestätigen obige Ausführungen: So ist etwa im Bereich der reinen Stromerzeugung noch ein Restpotenzial in Höhe von etwa 30% verfügbar, ein noch weitaus Bedeutenderes zeigt der Blick auf die Nutzung fester biogener Energieträger und der reinen Wärmeerzeugungsoptionen, wo nur 44% bzw. 11% der verfügbaren Ressourcen ausgeschöpft würden. Die identifizierten mittelfristig realisierbaren Ressourcen an gasförmigen und flüssigen biogenen Energieträgern werden hingegen nahezu vollständig genutzt.

Tabelle 6-3: Ausschöpfung des realisierbaren Potenzials der erneuerbaren Energieträger im Jahr 2010 und 2020 gemäß *BAU-Szenario*

Ausschöpfung des realisierbaren Potenzials (Angaben in GWh bzw. %)		2010			2020		
		<u>Gesamt</u>	<u>% des Potenzials</u>	<u>Potenzial</u>	<u>Gesamt</u>	<u>% des Potenzials</u>	<u>Potenzial</u>
<b>Feste biogene Energieträger, gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>1</sup></b>	<b>505</b>	<b>83%</b>	<b>610</b>	<b>753</b>	<b>44%</b>	<b>1.713</b>
Energieholz	Heizwert	92	79%	117	156	30%	517
Alt- und Restholz	Heizwert	270	100%	270	445	93%	481
Energiepflanzen	Heizwert	0	0%	71	0	0%	284
Biogener Müllanteil	Heizwert	133	96%	138	143	95%	151
Feste landwirtschaftliche Reststoffe	Heizwert	10	69%	14	10	3%	280
<b>Flüssige biogene Energieträger, gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>2</sup></b>	<b>38</b>	<b>92%</b>	<b>41</b>	<b>87</b>	<b>99%</b>	<b>88</b>
Energiepflanzen	Heizwert	24	90%	27	59	99%	60
Altspeiseöle und -fette	Heizwert	14	98%	14	28	100%	28
<b>Gasförmige biogene Energieträger, gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>3</sup></b>	<b>160</b>	<b>91%</b>	<b>176</b>	<b>349</b>	<b>95%</b>	<b>369</b>
Landwirtschaftliches Biogas	Heizwert	130	89%	146	311	94%	331
Klärgas	Heizwert	29	100%	29	37	100%	37
Deponiegas	Heizwert	1	100%	1	1	100%	1
<b>Reine Stromerzeugungsoptionen</b>	<b>Strom</b>	<b>217</b>	<b>87%</b>	<b>250</b>	<b>303</b>	<b>70%</b>	<b>433</b>
Kleinwasserkraft	Strom	101	95%	106	101	74%	137
Photovoltaik	Strom	19	73%	26	19	32%	59
Windkraft	Strom	97	82%	118	183	77%	237
<b>Reine Wärmeerzeugungsoptionen</b>	<b>Heizwert</b>	<b>7</b>	<b>20%</b>	<b>37</b>	<b>24</b>	<b>11%</b>	<b>211</b>
Solarthermie	Heizwert	6	83%	7	13	41%	31
Wärmepumpen	Heizwert	2	5%	30	12	6%	180

<sup>1</sup> Angaben bez. auf eingesetzten Brennstoff, unterer Heizwert

<sup>2</sup> Angaben bez. des unteren Heizwerts der flüssigen biogenen Energieträger

<sup>3</sup> Angaben bez. des unteren Heizwerts des gasförmigen Energieträgers

### 6.3.2.2 Resultierende Förderkosten

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist derzeit stark von der Politik getrieben, d.h. es kommt unter den derzeitigen Rahmenbedingungen zu einem schnelleren Ausbau als ohne politischen Eingriff wie der Vergleich des Ausbaus EE gemäß BAU-Szenario mit dem wirtschaftlichen Realisierungspotenzial verdeutlicht. Dies führt letztendlich zu Mehrkosten, die die Gesellschaft im Allgemeinen bzw. wie im Stromsektor durch entsprechende Aufbringungsmechanismen geregelt direkt der Konsument zu tragen hat. Im Gegenzug sind hiermit aber auch positive Aspekte verbunden, welche im Anschluss an dieses Kapitel diskutiert werden.

Der Begriff *Förderkosten* sei einleitend kurz erläutert: Im Rahmen dieser Studie wurden die *direkten Förderkosten* untersucht. Diese umfassen jene finanziellen Aufwendungen, die im direkten Zusammenhang mit einer gewährten Förderung der Errichtung bzw. des Betriebs einer Anlage auf Basis erneuerbarer Energien anfallen. Im Falle einer Einspeisevergütung wie im Stromsektor üblich, widerspiegeln sie die Differenz zwischen dem gewährten Abnahmepreis und dem handelsüblichen Marktpreis der Energiedienstleistung. Im Falle von Investitionsanreizen resultieren die Förderkosten unmittelbar aus den gewährten Zuschüssen. *Direkte Förderkosten* bedeutet, dass eventuell anfallende zusätzliche administrative Aufwendungen nicht in Betracht gezogen werden, ebenso wie auch externe Kosten der erneuerbaren Energien bzw. der vermiedenen fossilen Erzeugung keine Berücksichtigung finden.

Abbildung 6-9 zeigt für das hier betrachtete BAU-Szenario die zeitliche Entwicklung der anfallenden direkten Förderkosten des Ausbaus EE in Luxemburg. Die Grafik stellt weiters für neu zu errichtende Anlagen – also jene Anlagen, die gemäß Projektion im betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020 installiert werden – die sektoralen Anteile dar. Jene Kosten, die bereits errichteten Anlagen anzulasten sind, werden zur besseren Übersichtlichkeit kumuliert dargestellt. Man erkennt, dass von den jährlich anfallenden rund 18 bis 23 Mill. € ein Großteil der Kostenbelastung dem Stromsektor anzurechnen ist, welcher in späterer Folge einer detaillierten Betrachtung unterzogen wird.

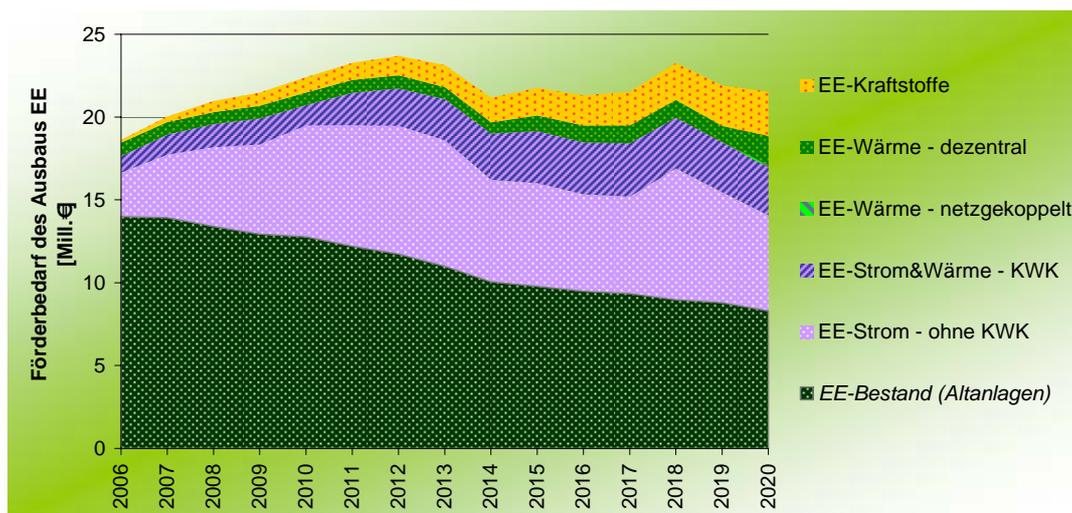


Abbildung 6-9: Entwicklung der direkten Förderkosten für EE gemäß *BAU-Szenario*

Die zeitliche Entwicklung der zu obiger Abbildungen korrespondierenden notwendigen Transferzahlungen (für Alt- und Neuanlagen) der Konsumenten bezogen auf den Gesamtverbrauch gibt Abbildung 6-10 wieder. Der relative Bezug auf die jeweilige sektorale Gesamtnachfrage verdeutlicht die Größenordnung der resultierenden Belastung. Wie bei Betrachtung der absoluten Beträge bereits festgestellt, rückt der Stromsektor in den Vordergrund, da in den anderen Sektoren Wärme und Verkehr nur marginale Beträge aufscheinen. Die Kosten für EE-Strom bleiben in etwa stabil bis etwa 2012, wobei das Niveau von rund 2,4 €/MWh im internationalen Vergleich<sup>50</sup> eher gering bis moderat erscheint. In den Folgejahren bis 2020 ist ein Absinken der Belastung auf etwa 2,0 €/MWh zu bemerken, was hauptsächlich auf den stetigen Wegfall an Förderkosten für Altanlagen zurückzuführen ist. Dies veranschaulicht auch die nachfolgende Abbildung 6-11.

Es sei angemerkt, dass die jährlichen Transferzahlungen, wie in Abbildung 6-10 dargestellt, nicht die gesamten von den Konsumenten zu leistenden Mehrzahlungen darstellen und somit nicht die Gesamtbelastung, welche die Konsumenten für die EE-Förderung zu tragen haben, abbilden. Sie skizzieren lediglich den Verlauf der jährlichen Beträge, nicht aber kumulierte Summen. Etwaige Unstetigkeiten im Verlauf resultieren aus der Tatsache, dass im Falle von Investitionsförderungen, welchen in beiden Fällen begleitend zu etwaigen Einspeisevergütungen angesetzt wurden, eine höhere Belastung im Installationsjahr resultiert, welche die Kostenbelastung in den Folgejahren aber im Vergleich zu anderen Instrumenten für diese

<sup>50</sup> Im Nachbarland Deutschland zeigen kompatible Darstellungen ein Kostenniveau von etwa 4 bis 5 €/MWh, ähnliche Aussagen treffen auch auf Österreich zu.

Anlagen verringert.

Abbildung 6-11 schlüsselt für den Stromsektor die direkten Förderkosten auf Technologieebene auf. Es zeigt sich die Dominanz von Biogas sowie des Weiteren auch hohe Anteile der Windenergie sowie der Biomasse-Verstromung. Aufgrund des fehlenden Ausbaus fallen für PV und Kleinwasserkraft keine Kosten an.

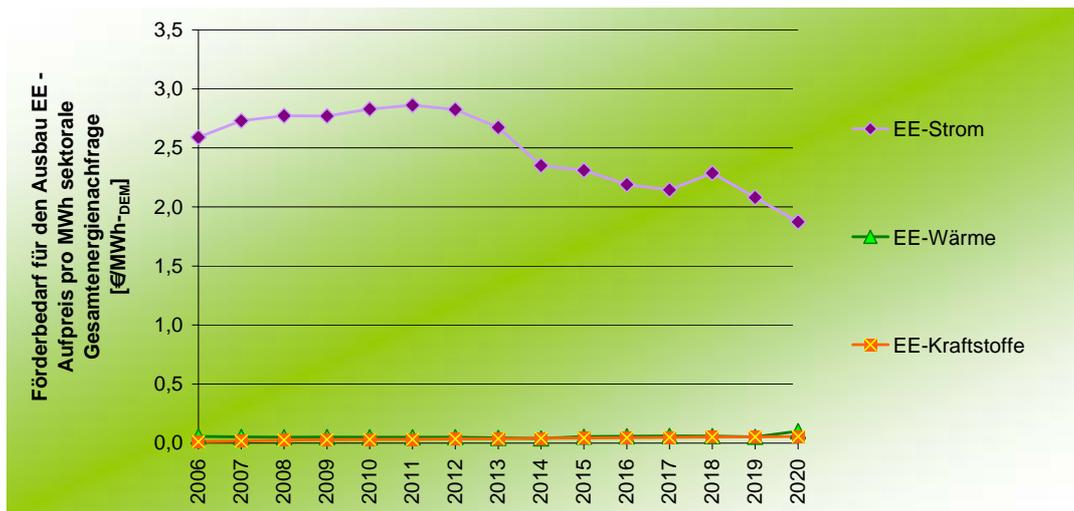


Abbildung 6-10: Entwicklung des notwendigen Aufpreises pro MWh Gesamtnachfrage auf sektoraler Ebene zur Erreichung des Ausbaus EE gemäß *BAU-Szenario*

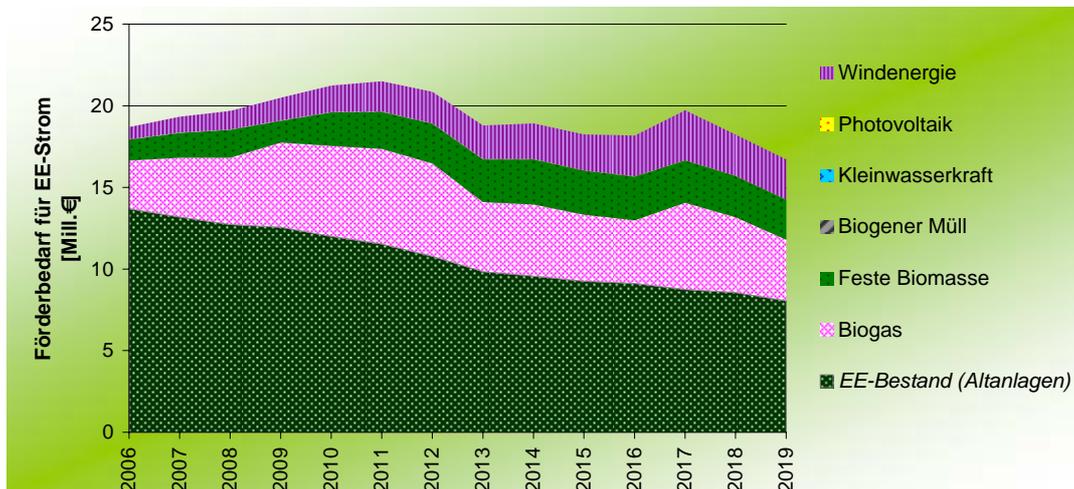


Abbildung 6-11: Entwicklung der direkten Förderkosten für EE im Stromsektor gemäß *BAU-Szenario*

### 6.3.2.3 Vermiedene CO<sub>2</sub> Emissionen

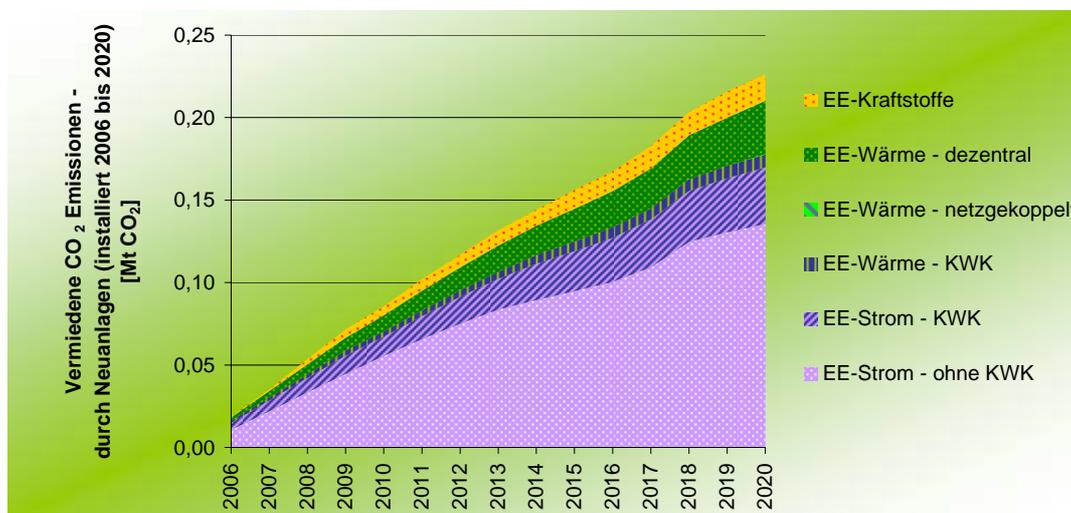


Abbildung 6-12: Entwicklung der vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden mit dem Ausbau EE gemäß BAU-Szenario

Die zusätzlich vermiedenen CO<sub>2</sub> Emissionen durch den Zubau von Neuanlagen nach 2005 sind auf der Ebene der einzelnen Sektoren in Abbildung 6-12 dargestellt. Es zeigt sich insgesamt ein moderater Beitrag der EE gemessen an den Emissionsverpflichtungen Luxemburgs. Im Bereich der Stromerzeugung wären hierbei prinzipiell zwei Fälle zu unterscheiden: Erneuerbare Stromproduktion verdrängt luxemburgischen Strom mit der durchschnittlichen nationalen CO<sub>2</sub> Intensität; und erneuerbare Stromproduktion verdrängt importierten Strom, wobei die damit verbundenen CO<sub>2</sub> Vermeidungen nicht in Luxemburg bilanziert werden.<sup>51</sup> Es erscheint letzterer Fall als wahrscheinlicher, da der bestehende Luxemburger Kraftwerkspark auf vergleichsweise hohem technischem Standard ist und in Folge wohl nicht die marginale Option darstellt. Von den im Jahr 2020 anfallenden vermiedenen CO<sub>2</sub> Emissionen in Höhe von 227 kt sind folglich nur 57 kt, also 25% der gesamten vermiedenen Emissionen, als gesicherter Beitrag zur nationalen Klimaschutzverpflichtung zu erachten. Dies umfasst alle verbleibenden Sektoren – von Biokraftstoffen über dezentraler EE-Wärme bis hin zu dem wärmerelevanten Teil der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis biogener Energieträger. Es sei abschließend angemerkt, dass die im Falle einer vollständigen Anrechnung vermiedenen Emissionen

<sup>51</sup> Im Falle von KWK-Anlagen erfolgt die Bilanzierung für Strom und Wärme getrennt. Für den Stromteil wird wie bei anderen EE-Stromerzeugungstechnologien die CO<sub>2</sub>-Intensität (im Mittel auf europäischer Ebene) zur Abschätzung der vermiedenen Emissionen herangezogen, während für die produzierte Wärme die CO<sub>2</sub>-Intensität gemäß der nationalen Wärmeerzeugung als Ausgangsbasis dient.

etwa 4,5% des luxemburgischen Defizits in Bezug auf die Kyoto Ziele für die Jahre 2008-2012 entsprechen.

Monetär<sup>52</sup> betrachtet entsprechen die für das Jahr 2020 ausgewiesenen vermiedenen CO<sub>2</sub> Emissionen einer Ersparnis in Höhe von 4,5 Mill. €, wovon rund 1,1 Mill. € gesichert auf nationaler Ebene anfallen.

#### **6.3.2.4 Vermiedener Einsatz fossiler Energien**

In direktem Zusammenhang mit den vermiedenen CO<sub>2</sub> Emissionen durch den Ausbau erneuerbarer Energien steht die Verringerung unseres Hungers nach fossiler Energie. Wie zuvor am Thema Klimaschutz skizziert leisten Erneuerbare auch einen merklichen Beitrag zur Versorgungssicherheit. In der nachfolgenden Betrachtung wird dieser Umstand anhand des *BAU-Szenarios* skizziert.

Allein durch im betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020 neu installierte Anlagen werden im Jahr 2020 etwa 888 GWh an fossilen Energieträgern eingespart. Aufgeschlüsselt gemäß den mittleren sektoralen Anteilen ergibt dies 46 Mill. m<sup>3</sup> Erdgas, 15 ktoe Erdöl sowie Kohle im Ausmaß von rund 38 kt SKE. In monetären Beträgen resultiert eine Summe von rund 21 Mill. € für selbiges Jahr. Wie zuvor bei der Thematik vermiedener Emissionen erläutert, sind diese Werte aber bei rein nationaler Betrachtung mit Vorsicht zu genießen. Es ist fraglich wo im europäischen Strommarkt eine in Luxemburg eingespeiste Kilowattstunde Windstrom eine ansonst thermisch erzeugte ersetzt. Der monetäre Nutzen bleibt jedoch hiervon nahezu ungeachtet erhalten, da entweder fossile Primärenergie oder elektrische Energie in geringerem Maße importiert werden muss, was in beiden Fällen eine positive Auswirkung auf die Handelsbilanz Luxemburgs zu Folge hat.

#### **6.3.2.5 Sensitivitätsanalyse**

Im Rahmen des vorgestellten BAU-Szenarios wurden die folgenden Sensitivitäten genauer betrachtet:

**Niedrige fossile Energiepreise** bewirken eine Reduktion der über den Zeitraum 2006 bis 2020 kumulierten Förderkosten (inkl. Kosten für Altanlagen) um -5%. Dieser marginale Kostenrückgang wird jedoch von einer Reduktion der Energieerzeugung aus Neuanlagen um 18% begleitet. Das heißt niedrige Energiepreise haben einen deutlich stärkeren negativen Effekt auf das mögliche Wachstum erneuerbarer Energien als auf die Entwicklung der Förderkosten. Unter BAU betrifft die An-

---

<sup>52</sup> Hierbei wird der unterstellte CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis in Höhe von 20 €/t zugrunde gelegt.

nahme niedriger Energiepreise insbesondere den Bereich Biotreibstoffe (Reduktion des EE-Anteils um 76% im Jahr 2020), es resultiert jedoch auch eine signifikante Schwächung des Neuausbaus dezentraler Wärmeerzeugung auf Basis EE (-10%) sowie der Stromerzeugung auf Basis EE (-8%).

**Beschleunigtes technologisches Lernen** ausgelöst durch erhöhtes Wachstum auf globaler Ebene bewirkt unter BAU Annahmen eine marginale Erhöhung der Förderkosten (+1%) im betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020<sup>53</sup>, bedingt durch einen geringfügigen Erhöhung des weiteren Ausbaus EE (+1%). Auf Technologieebene zeigt sich ein Mehrausbau bei der Biogasnutzung und der Solarthermie.

Eine **ambitionierte Steigerung der Energieeffizienz** zeigt keine Auswirkungen im Hinblick auf Förderkosten sowie Ausbau EE in absoluten Zahlen. Sehr wohl bewirkt die gestiegene Energieeffizienz jedoch einen signifikanten Anstieg des relativen Anteils EE an der Gesamtnachfrage: Der Beitrag EE zur Deckung des Primärenergiebedarfs steigt um +18%, sodass im Jahr 2020 ein Anteil von 2,6% resultiert. Bereinigt man dies um jenen Primärenergieverbrauch, der dem Treibstoffexport zuzuordnen ist, so ergibt sich ein primärenergetischer Beitrag EE in Höhe von 4,8% für das Jahr 2020. Im Stromsektor ist ein Zuwachs von +12% zu verzeichnen und der Anteil EE an der Gesamtstromnachfrage 2020 beträgt folglich 6,2%. Im Wärmesektor sind die Auswirkungen gesteigerter Energieeffizienz gemäß der verwendeten Prognose geringer einzuschätzen: Ein marginales Plus von +3% bewirkt eine Anhebung des Anteils EE auf rund 2,4%. Im Verkehrsbereich hingegen ist ein dramatischer Einfluss zu beobachten – der Anteil am gesamten Kraftstoffbedarf steigt um 20%, sodass ein Beitrag EE in Höhe von 0,2% mit bzw. 1,6% ohne Berücksichtigung des Mehrverbrauchs durch Treibstoffexporte resultiert. Die abschließende Abbildung 6-13 veranschaulicht diese Ausführungen.<sup>54</sup>

Die eben beschriebenen Unterschiede im Hinblick auf die relativen Verbrauchsanteile EE zwischen gesteigerter Energieeffizienz und dem Referenzfall widerspiegeln klar die antizipierten sektoralen Effizienzpotenziale, die im Falle nachfrageseitiger Maßnahmen erschlossen werden.

---

<sup>53</sup> Schließt man aber auch die Folgekosten, also jene Förderkosten, die nach 2020 aufgrund des bis dahin erfolgten Ausbaus EE anfallen, in die Betrachtung ein, so ist ein geringfügiger Rückgang (-1%) der kumulierten Aufwendungen zu beobachten. Dies ist auf die aufgrund beschleunigten technologischen Lernens gesunkenen Kosten der EE-Technologien zurückzuführen.

<sup>54</sup> Man vergleiche Abbildung 6-13, welche die prozentualen Anteile im Falle gesteigerter Energieeffizienzmaßnahmen veranschaulicht, mit Abbildung 6-8, welche selbige Darstellung für die Referenznachfrageentwicklung (BAU) zeigt.

Abschließend sei angemerkt, dass im Vergleich zum Referenzfall durch die verringerte Nachfrage bei gleich bleibendem Fördervolumen in absoluten Zahlen höhere spezifische Transferzahlungen, also je konsumierter Energiemenge, resultieren. Diese Mehrkosten betragen etwa im Stromsektor im Mittel 5%, im Wärmebereich 2% und im Verkehrssektor rund 14%.

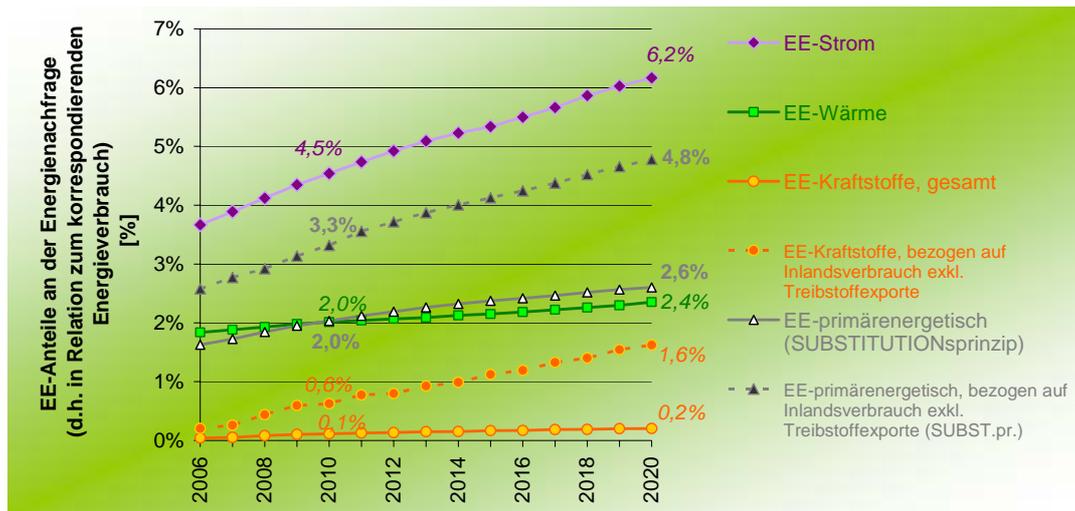


Abbildung 6-13: Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das *BAU*-Szenario im Falle einer Steigerung von Energieeffizienzmaßnahmen

**Eine erhöhte Risikobewertung**, gleichbedeutend mit einem höheren kalkulatorischen Zinssatz (8,6% anstelle von 6,5%) zeigt insbesondere negative Auswirkung auf die Wettbewerbsfähigkeit kapitalintensiver Technologien – was im Vergleich zu konventionellen Optionen die meisten EE-Technologien darstellen. Da unter den gegebenen energiepolitischen Rahmenbedingungen, also den BAU-Förderpolitiken, insbesondere im Strombereich aufgrund der fehlenden Abnahme- bzw. Vergütungsgarantie ohnehin eine erhöhte Risikobewertung vorgenommen wurde, verdeutlicht ein im Allgemeinen höher angesetzter Zinssatz die erhöhte Risikoaffinität potentieller Investoren in verstärktem Maße. Die Auswirkungen sind wie folgt: Es resultiert ein geringerer Ausbau EE (-9%) und in Folge geringere erforderliche Fördervolumina (-12% im Bezug auf Neuanlagen im Zeitraum 2006 bis 2020). Wie einleitend erwähnt sind hiervon insbesondere investitionsintensive Technologien wie etwa die Windenergie (-15% an kumulierter Anlagenleistung im Jahr 2020) oder die Wärmepumpen betroffen (-18%).

### 6.3.3 Szenario: Verstärkte Anstrengungen

Das Szenario *verstärkter Anstrengungen* impliziert die Fortentwicklung der bestehenden sektorspezifischen Instrumente (BAU-Politiken) im Einklang mit der Abschaffung bestehender nicht-ökonomischer Hemmnisse. Weiters werden hier begleitend verstärkte Energieeffizienzmaßnahmen unterstellt, die das Wachstum des künftigen Energieverbrauchs eindämmen. Es wurden zwei Alternativvarianten erarbeitet, die sich im Hinblick auf die detaillierte Fokussierung unterscheiden. Gemeinsam ist ihnen allerdings das Ziel einer nahezu vollständigen Ausschöpfung der identifizierten realisierbaren Potenziale erneuerbarer Energien. Wie bereits einleitend in Abschnitt 6.1 erwähnt, unterscheiden sich die beiden Varianten wie folgt:

- Die Variante „*verstärkte Anstrengungen (Kyoto)*“ verfolgt das Ziel eines möglichst hohen Beitrags EE zur Erreichung der Kyoto-Verpflichtung, was im Gebäudesektor eine Forcierung von Wärmeschutzmaßnahmen voraussetzt sowie die Forcierung einzelner RES-H Technologien, insbes. der Biomasse. Im Stromsektor hingegen wird ein geringeres Gewicht auf die reine Verstromung der Biomasse gelegt
- Im Gegensatz hierzu liegt der Fokus im Szenario „*verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)*“ auf einer möglichst starken Nutzung Erneuerbarer Energieträger, was im Gegensatz zu obigem Fall eine verstärkte Biomasse-Verstromung impliziert.

Die beiden Alternativvarianten werden nachfolgend im Hinblick auf den zu erwartenden Ausbau EE verglichen. Weiters werden wie im BAU-Szenario aufgezeigt die damit verbundenen Auswirkungen im Hinblick auf Klimaschutz und Versorgungssicherheit diskutiert und die resultierende Kostenbelastung dargestellt. Abschließend veranschaulichen Sensitivitätsanalysen die Abhängigkeit der gezeigten Ergebnisse von diversen unterstellten Annahmen. Einleitend wird anhand der BAU-Politiken aufgezeigt, welcher Ausbau EE allein durch Abbau nicht-ökonomischer Barrieren verbunden mit Maßnahmen zur Verminderung des Investorenrisikos resultieren würde.

#### ► **Anmerkung: Fortentwicklung der BAU-Politiken – Abbau nicht-ökonomischer Barrieren & Verminderung des Investorenrisikos**

Der Abbau nicht-ökonomischer Barrieren und die Erhöhung der Investitionssicherheit stellen die zwei zentralen Eckpfeiler einer erfolgreichen Energiepolitik dar. Ein Barrierenabbau erlaubt eine beschleunigte Technologiediffusion und bedingt in Folge auch eine verminderte Kostenbelastung, da verfügbare günstige Optionen vermehrt ihren Beitrag leisten können, beschlossene energiepoliti-

sche Ziele zu erreichen. Eine erhöhte Investitionssicherheit bedingt einen geringeren Risikoaufschlag auf das eingesetzte Kapital, was in weiterer Folge ebenso zu geringeren gesellschaftlichen Kosten zur Erreichung eines bestimmten Ausbauziels. Nachfolgend sei allerdings eine alternative Betrachtung vorgenommen: Es wird untersucht, welcher Ausbau bei Beibehaltung der derzeitigen (BAU) Förderpolitiken erreicht werden würde, unterstellt man einerseits ein massiven Abbau nicht-ökonomischer Hemmnisse und andererseits Maßnahmen zur Erhöhung der Investitionssicherheit. Letzteres sei durch eine Abnahme- und Vergütungsgarantie im Stromsektor veranschaulicht.

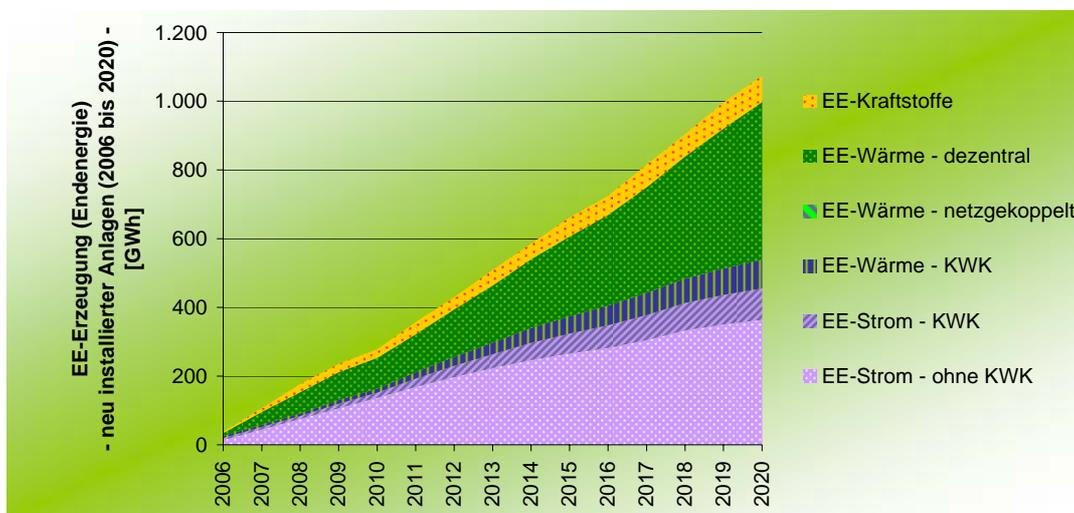


Abbildung 6-14: Energieerzeugung aus neuen EE-Anlagen (2006 bis 2020) bei Beibehaltung derzeitiger (BAU) Förderpolitiken, verbunden mit massivem Barrierenabbau und erhöhter Investitionssicherheit

Im Vergleich zum Referenzfall (BAU) resultiert ein massiver Mehrausbau in allen Sektoren: Eine um +97% erhöhte Energieproduktion aus Neuanlagen resultiert im Jahr 2020, wobei der größte Zuwachs im Bereich der dezentralen Wärmeerzeugung festzustellen ist (+211%). Abbildung 6-14 veranschaulicht dies einprägsam durch Darstellung der Energieerzeugung aus neuen EE-Anlagen.

Ebenso ist jedoch festzustellen, dass bei Beibehaltung des derzeitigen Förderniveaus auch massive Mehrkosten zu erwarten sind, da schließlich das mittelfristig verfügbare Potenzial an EE in Luxemburg nahezu vollständig ausgeschöpft werden würde. Im konkreten steigt das Fördervolumina im Zeitraum 2006 bis 2020 um +195% an, da insbesondere auch bei teuren Optionen wie etwa der Photovoltaik ein massiver Ausbau zu beobachten wäre.

In den nachfolgenden Betrachtungen wird nun ebenso ein massiver Abbau nicht-ökonomischer Hemmnisse vorausgesetzt. Wie dies konkret erreicht werden kann ist den Politikempfehlungen gemäß Kapitel 8 zu entnehmen.

### 6.3.3.1 Der künftige Ausbau erneuerbarer Energien

Durch *verstärkte Anstrengungen* kann eine Erhöhung des Anteils EE am Inlandsenergieverbrauch von derzeit 1,4% auf bis zu 4,5% im Jahr 2020 erreicht werden.<sup>55</sup> Bereinigt man die Primärenergiebilanz um die vergleichsweise hohen Treibstoffexporte, ergibt sich ein beinahe doppelt so hoher Beitrag seitens der Erneuerbaren – 2,4% als Status Quo sowie 8,2% im Jahr 2020.

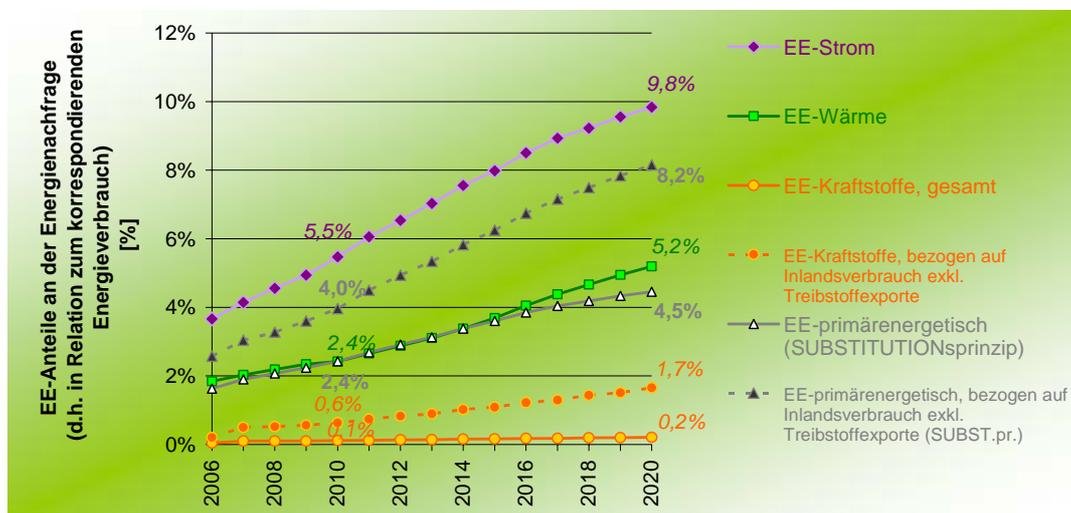


Abbildung 6-15: Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das Szenario „*verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)*“

Abbildung 6-15 stellt den zeitlichen Verlauf des relativen Beitrags EE sowohl primärenergetisch als auch auf sektoraler Ebene beispielhaft für die Szenarienvariante „*verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)*“ dar. Gemäß der in dieser Alternativvariante antizipierten Fokussierung auf die Biomasse-Verstromung, ist im Jahr 2010 ein Ausbau von EE-Strom auf 5,5% möglich, was mit einer nahezu vollständigen Erfüllung des Ziels gemäß RES-E Richtlinie gleichzusetzen ist. Im Jahr 2020 kann in Folge ein Ausbau auf bis zu 9,8% erreicht werden. Auch im Wärmesektor ist ein hoher Ausbau EE zu erkennen – auf 2,4% im Jahr 2010 und schließlich

<sup>55</sup> Die Angaben bez. Primärenergie beruhen auf Anwendung des Substitutionsprinzips.

5,2% 2020. Der Ausbau von Biokraftstoffen ist im Vergleich zu BAU unverändert, da ja bereits bei Beibehaltung der bestehenden Politiken das realisierbare Potenzial nahezu vollständig umgesetzt werden würde. Durch die unterstellten begleitenden nachfrageseitigen Maßnahmen resultiert aber ein weitaus höherer Beitrag in relativen Zahlen. 1,7% (BAU: 1,1%) des inländischen Kraftstoffbedarfs können bis 2020 durch EE abgedeckt werden.

Betrachtet man die resultierenden Verbrauchsanteile für die alternative Ausgestaltungsvariante „*verstärkte Anstrengungen (Kyoto)*“, so ist zu erkennen, dass der Schwerpunkt auf (gesicherter) Maximierung des Beitrags EE zur Erreichung nationaler Klimaschutzziele insbesondere für die Biomasse eine Verschiebung von der Verstromung hin zur Wärmenutzung bedingt. Wie in Abbildung 6-16 veranschaulicht, resultiert für EE-Strom ein Verbrauchsanteil von 8,9% im Jahr 2020, während EE-Wärme (von 5,2% gemäß obiger Variante) auf bis zu 6,6% ansteigt. Der Biokraftstoffausbau bleibt unverändert.

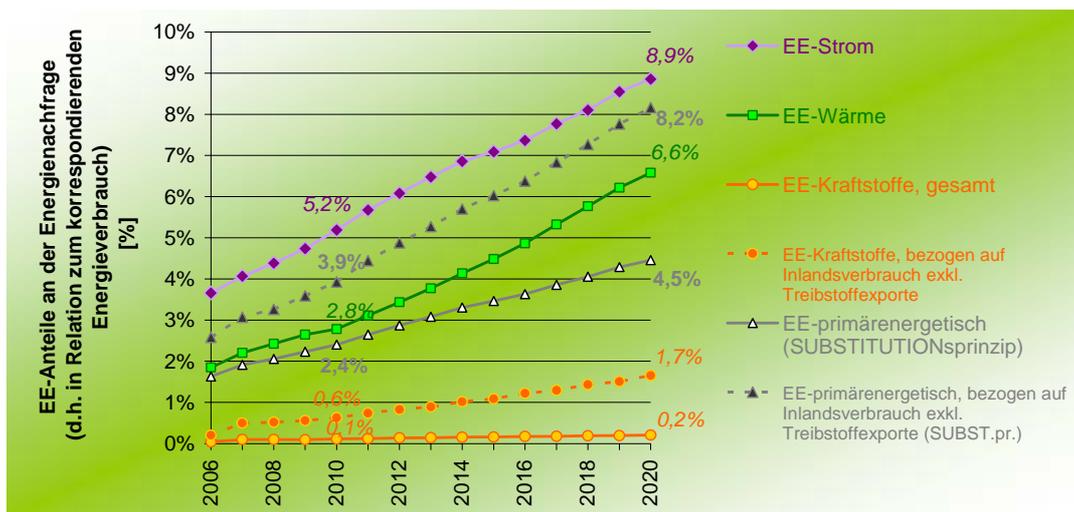


Abbildung 6-16: Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene für das Szenario „*verstärkte Anstrengungen (Kyoto)*“

stellt die absoluten Zahlen der prognostizierten Energieerzeugung in den Jahren 2010 und 2020 auf Technologieebene für beide untersuchte Ausgestaltungsvarianten dar.

Tabelle 6-4: Energieproduktion aus EE auf Technologieebene bis 2020 für das Szenario „verstärkte Anstrengungen“, aufgeschlüsselt nach Varianten: „(Erneuerbare)“ (links) und „(Kyoto)“ (rechts)

		Verstärkte Anstrengungen			
		(Erneuerbare)		(Kyoto)	
<b>EE-Strom</b>	<b>Stromerzeugung</b>				
	[Einheit]	<u>2010</u>	<u>2020</u>	<u>2010</u>	<u>2020</u>
Biogas	[GWh/a]	75	106	75	106
Feste Biomasse	[GWh/a]	38	249	18	171
Biogener Müll	[GWh/a]	20	22	20	22
Kleinwasserkraft	[GWh/a]	108	125	108	125
Photovoltaik	[GWh/a]	27	57	27	57
Windenergie	[GWh/a]	119	227	119	227
<b>EE-Strom gesamt</b>	<b>[GWh/a]</b>	<b>387</b>	<b>786</b>	<b>367</b>	<b>708</b>
EE-Strom KWK	[GWh/a]	35	220	44	203
<b>EE-Wärme</b>	<b>Wärmeerzeugung</b>				
	[Einheit]	<u>2010</u>	<u>2020</u>	<u>2010</u>	<u>2020</u>
Biogas (netzgek.)	[GWh/a]	20	53	20	53
Feste Biomasse (netzgek.)	[GWh/a]	187	353	238	590
Biogener Müll (netzgek.)	[GWh/a]	0	3	0	3
Feste Biomasse (dezentr.)	[GWh/a]	133	399	133	399
Solarthermie	[GWh/a]	8	23	8	25
Wärmepumpen	[GWh/a]	31	160	31	160
<b>EE-Wärme gesamt</b>	<b>[GWh/a]</b>	<b>378</b>	<b>991</b>	<b>430</b>	<b>1.230</b>
EE-Wärme KWK	[GWh/a]	27	228	34	210
EE-Wärme Heizwerke	[GWh/a]	180	180	225	436
EE-Wärme dezentral	[GWh/a]	172	582	172	584
<b>EE-Kraftst.</b>	<b>Biokraftstoffherzeugung</b>				
	[Einheit]	<u>2010</u>	<u>2020</u>	<u>2010</u>	<u>2020</u>
Biokraftstoffe	[GWh/a]	38	89	38	89
<b>EE-Kraftstoffe gesamt</b>	<b>[GWh/a]</b>	<b>38</b>	<b>89</b>	<b>38</b>	<b>89</b>

Der antizipierte Zuwachs im Bereich der Stromerzeugung aus EE ist in beiden Varianten beachtlich: Von derzeit 214 GWh (2005) auf 786 GWh im Jahr 2020 bei Fokussierung auf Strom, aber selbst bei vermehrter Wärmenutzung gemäß Variante „Kyoto“ resultiert ein Ausbau auf 708 GWh durch verstärkte Anstrengungen und optimierte Rahmenbedingungen. Auf Technologieebene wird ersichtlich, dass alle

verfügbaren Optionen auch eine Nutzung finden – von Biogas<sup>56</sup> über Biomasse bis hin zu Windenergie, Wasserkraft und PV. Unterschiede zwischen den Varianten zeigen sich bei der Biomasse: In der Variante „Erneuerbare“ wird die Biomasse nicht alleinig in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen verstromt, sodass eine vergleichsweise hohe Stromerzeugung von etwa 249 GWh im Jahr 2020 resultiert. Durch die vermehrte Wärmenutzung gemäß Variante „Kyoto“ reduziert sich dieser Wert um rund ein Viertel auf 171 GWh. Primärenergetisch wird zwar die selbe Ausschöpfung erreicht, jedoch bei unterschiedlicher sektoraler Gewichtung.

Das Pendant zur Stromerzeugung stellt der Wärmesektor dar. Hier wird im Falle von vorwiegend aus nationaler Sicht klimarelevanter Maßnahmen ein verstärkter Ausbau (1.230 GWh in 2020) erreicht, während gemäß Variante „Erneuerbare“ eine etwas geringere Penetration erfolgt (991 GWh). Die Dominanz der Biomasse in diesem Sektor wird offensichtlich: Selbst bei geringerer sektoraler Allokation umfasst der Beitrag dezentraler und netzgekoppelter Biomasse etwa 80% der gesamten EE-Wärmeproduktion. Der Unterschied zwischen beiden Alternativvarianten wird durch den vermehrten Ausbau der netzgekoppelten Biomasse erreicht, also mittels kleiner Nah- und mittelgroßer Fernwärme- bis hin zu KWK-Anlagen. Abgesehen von der Biomasse wird aber auch bei Wärmepumpen und solarthermischen Anlagen ein hoher Zuwachs antizipiert. Abschließend sei angemerkt, dass das verfügbare Potenzial im Bereich der Biokraftstoffe im Jahr 2020 vollständig ausgeschöpft wird.

Nachfolgende Tabelle 6-5 vergleicht schließlich die zu erwartende Ausschöpfung des mittelfristig (2020) verfügbaren realisierbaren Potenzials an erneuerbare Energieträgern für die Szenarien *BAU* und „*verstärkte Anstrengungen*“<sup>57</sup>. Die Darstellung veranschaulicht den massiven Mehrausbau EE in dem eben diskutierten Szenario. Während im BAU-Fall nur rund 44% der verfügbaren festen biogenen Energieträger einer energetischen Nutzung zugeführt werden, erfolgt durch die zugrun-

---

<sup>56</sup> Im Hinblick auf den Ausbau der Biogasnutzung sei angemerkt, dass bei beiden Szenarien „verstärkte Anstrengungen“ im Vergleich zum BAU-Fall im Endjahr 2020 eine ähnliche Stromproduktion resultiert, da sich zwei Effekte teilweise kompensieren: Während im BAU Szenario die finanzielle Förderung insbesondere aufgrund der hohen Investitionszuschüsse etwas höher ist, sind im Falle „verstärkter Anstrengungen“ geringere nicht-ökonomische Hemmnisse unterstellt, folglich erfolgt der Ausbau dort auch deutlich schneller. Am Ende werden in allen Fällen rund 90% des Gesamtpotenzials an Biogas ausgeschöpft. Eine noch höhere Ausschöpfung würde nur bei deutlich höheren Kosten möglich sein. Bei den dargestellten Ausbauszenarien ist somit ein vernünftiger Kompromiss zwischen Potenzialausschöpfung und Förderkosten gefunden worden.

<sup>57</sup> Es sei angemerkt, dass die Ausschöpfung in beiden Ausgestaltungsvarianten des Szenarios „*verstärkte Anstrengungen*“ ident ist.

de gelegten effizienten und effektiven Förderinstrumente eine nahezu vollständige Ausschöpfung (99%). Ebenso sind klare Unterschiede für reine Strom- (70% versus 94%) und Wärmeerzeugungsoptionen (11% vs. 88%) zu erkennen. Die identifizierten mittelfristig realisierbaren Potenziale gasförmiger und flüssiger biogener Energieträger werden hingegen in beiden Fällen (nahezu) vollständig umgesetzt.

Tabelle 6-5: Vergleich der Potenzialausschöpfung im Jahr 2020 gemäß der Szenarien *BAU* (links) und „*verstärkte Anstrengungen*“ (rechts)

Ausschöpfung des realisierbaren Potenzials (Angaben in GWh bzw. %)		BAU			Verstärkte Anstrengungen		
		Ausschöpfung im Jahr 2020			Ausschöpfung im Jahr 2020		
		Gesamt	% des Potenzials	Potenzial	Gesamt	% des Potenzials	Potenzial
<b>Feste biogene Energieträger, gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>1</sup></b>	<b>753</b>	<b>44%</b>	<b>1.713</b>	<b>1.697</b>	<b>99%</b>	<b>1.713</b>
Energieholz	Heizwert	156	30%	517	517	100%	517
Alt- und Restholz	Heizwert	445	93%	481	481	100%	481
Energiepflanzen	Heizwert	0	0%	284	276	97%	284
Biogener Müllanteil	Heizwert	143	95%	151	143	95%	151
Feste landwirtschaftliche Reststoffe	Heizwert	10	3%	280	280	100%	280
<b>Flüssige biogene Energieträger, gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>2</sup></b>	<b>87</b>	<b>99%</b>	<b>88</b>	<b>88</b>	<b>100%</b>	<b>88</b>
Energiepflanzen	Heizwert	59	99%	60	60	100%	60
Altspeiseöle und -fette	Heizwert	28	100%	28	28	100%	28
<b>Gasförmige biogene Energieträger, gesamt</b>	<b>Heizwert<sup>3</sup></b>	<b>349</b>	<b>95%</b>	<b>369</b>	<b>352</b>	<b>95%</b>	<b>369</b>
Landwirtschaftliches Biogas	Heizwert	311	94%	331	314	95%	331
Klärgas	Heizwert	37	100%	37	37	100%	37
Deponiegas	Heizwert	1	100%	1	1	100%	1
<b>Reine Stromerzeugungsoptionen</b>	<b>Strom</b>	<b>303</b>	<b>70%</b>	<b>433</b>	<b>409</b>	<b>94%</b>	<b>433</b>
Kleinwasserkraft	Strom	101	74%	137	125	91%	137
Photovoltaik	Strom	19	32%	59	57	97%	59
Windkraft	Strom	183	77%	237	227	96%	237
<b>Reine Wärmeerzeugungsoptionen</b>	<b>Heizwert</b>	<b>24</b>	<b>11%</b>	<b>211</b>	<b>185</b>	<b>88%</b>	<b>211</b>
Solarthermie	Heizwert	13	41%	31	25	81%	31
Wärmepumpen	Heizwert	12	6%	180	160	89%	180

<sup>1</sup> Angaben bez. auf eingesetzten Brennstoff, unterer Heizwert

<sup>2</sup> Angaben bez. des unteren Heizwerts der flüssigen biogenen Energieträger

<sup>3</sup> Angaben bez. des unteren Heizwerts des gasförmigen Energieträgers

### 6.3.3.2 Resultierende Förderkosten

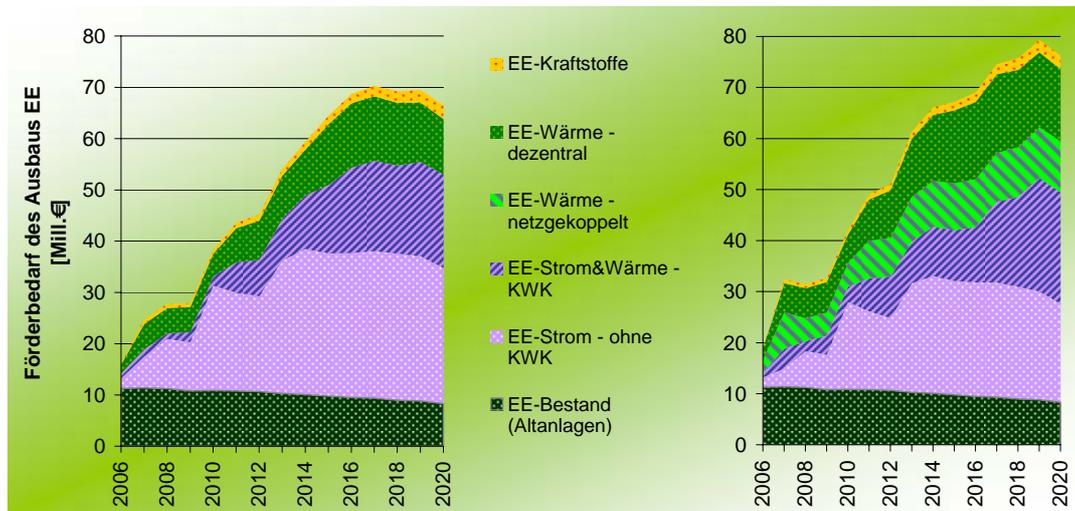


Abbildung 6-17: Entwicklung der direkten Förderkosten für EE gemäß dem Szenario „verstärkte Anstrengungen“, aufgeschlüsselt nach Varianten: „(Erneuerbare)“ (links) und „(Kyoto)“ (rechts)

Abbildung 6-17 illustriert den zeitlichen Verlauf der erforderlichen EE-Fördervolumina für beide Ausgestaltungsvarianten des Szenarios „verstärkte Anstrengungen“. Die anfallenden Beträge werden aufgeschlüsselt nach Altanlagen (gesamt) sowie im Hinblick auf neu zu errichtende EE-Anlagen weiters nach den sich ergebenden sektoralen Anteilen. Man ersieht klar die unterschiedliche Fokussierung der beiden Varianten. Fallen im Szenario „Erneuerbare“ vor allem im Strombereich hohe Kosten an, so weist etwa die netzgekoppelte Fern- und Nahwärme im „Kyoto“ Fall ebenso beträchtliche Fördervolumina auf. Im generellen ist ein Anstieg der Kosten über der Zeit zu beobachten, der bis etwa 2016 anhält, um nachfolgend wieder leicht zu sinken. Der Spitzenwert liegt im Fall „Erneuerbare“ etwas geringer bei rund 70 Mill. €, wo hingegen die „Kyoto“ Variante einen Höchstwert von knapp unter 80 Mill. € aufweist. Dieser Unterschied ist insbesondere durch die vermehrte Anwendung von Investitionszuschüssen im Wärmebereich zu suchen, welche im speziellen mit dem vermehrten Ausbau netzgekoppelter Fern- und Nahwärmanlagen einher gehen. Da diese bei Errichtung einer Anlage anfallen und somit ein singuläres Ereignis darstellen, resultieren im Vergleich zu mengenbasierter Vergütung wie etwa mittels Einspeisetarife höhere Fördervolumina im betrachteten Zeitraum. Ein Vergleich der resultierenden Fördervolumina zum BAU-Szenario zeigt einen deutlichen Anstieg. Die mittleren jährlichen Aufwendungen für Neuanlagen (errichtet im Zeitraum 2006 bis 2020) gemäß Variante „Erneuerbare“ in Höhe von 39,6 Mill. € liegen um 295% höher, während der „Kyoto“ Fall mit durchschnittlichen Kosten von 45,1 Mill. € sogar ein Plus von 324% im Ver-

gleich zu BAU aufweist. Schließt man in diese Betrachtung die Folgekosten im Zeitraum nach 2020 mit ein, also jene garantierten Vergütungen für eingespeiste Energiemengen der bis 2020 neu errichteten Anlagen, welche insbesondere im Strombereich von Relevanz sind, so verdeutlicht sich der Kostenanstieg noch dramatischer. Im „Erneuerbare“ Szenario resultieren diskontierte kumulierte Förderkosten in Höhe von 681 Mill. €, was einem Anstieg im Vergleich zu BAU von +347% entspricht. Die Fokussierung auf nationale Klimaziele verschlechtert die Bilanz wie schon zuvor angedeutet: Gemäß „Kyoto“ Variante resultieren kumulierte diskontierte Aufwendungen von 769 Mill. €, die einem Kostenanstieg um +404% entsprechen.

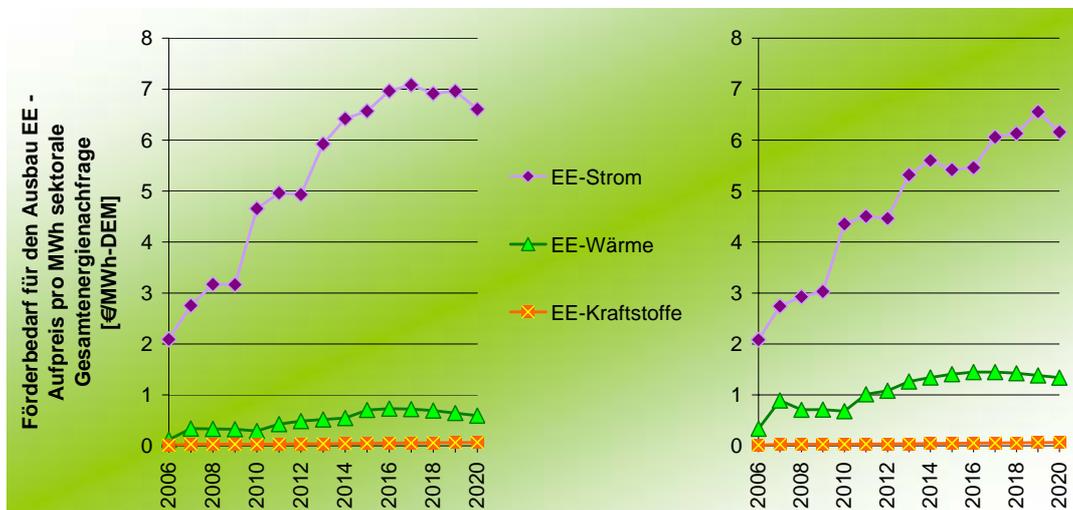


Abbildung 6-18: Entwicklung des notwendigen Aufpreises pro MWh Gesamtnachfrage auf sektoraler Ebene zur Erreichung des Ausbaus EE gemäß dem Szenario „*verstärkte Anstrengungen*“, aufgeschlüsselt nach Varianten: „*(Erneuerbare)*“ (links) und „*(Kyoto)*“ (rechts)

Die zeitliche Entwicklung der zur obigen Abbildung korrespondierenden notwendigen Transferzahlungen (für Alt- und Neuanlagen) seitens der Konsumenten in Relation zum Gesamtverbrauch gibt Abbildung 6-18 wieder. Wie bereits im BAU-Fall erwähnt, verdeutlicht der Bezug auf die jeweilige sektorale Gesamtnachfrage die Größenordnung der resultierenden Belastung aus Konsumentensicht. Durch den vergleichsweise hohen Gesamtwärmeverbrauch sowie aufgrund des Umstands, dass die Mehrkosten der KWK gemäß der üblichen Nomenklatur der Stromseite angerechnet werden, rückt der Stromsektor in den Vordergrund. Die Kosten für EE-Strom steigen in beiden Varianten massiv an und erreichen 2016 bzw. 2019

einen Spitzenwert von 7,1 €/MWh gemäß „Erneuerbare“ Variante bzw. 6,6 €/MWh im „Kyoto“ Fall. In den nachfolgenden Jahren ist ein Absinken der Kostenbelastung zu erwarten, das insbesondere aus der Verminderung der erforderlichen Aufwendungen für Altanlagen sowie der steigenden Nachfrage resultiert.

Im Wärmebereich treten wie zu erwarten höhere Belastungen im „Kyoto“ Fall auf. Umgelegt auf den Gesamtwärmeverbrauch resultiert allerdings ein vergleichsweise geringer Aufpreis in Höhe von durchschnittlich 1 €/MWh. Setzt man die Kosten allerdings in Relation zur Wärmenachfrage des Gebäudesektors, wo der massivste Ausbau EE-Wärme zu erwarten ist, so ergibt sich auch hier ein beachtliches Premium in Höhe von rund 5,4 €/MWh. Im Szenario „Erneuerbare“ fällt die Kostenbelastung deutlich geringer aus: Im Schnitt fallen spezifische Kosten von 0,5 €/MWh an, was bei Bezug auf den geringeren Energieverbrauch im Gebäudesektor einem Aufpreis in Höhe von 2,7 €/MWh entspricht.

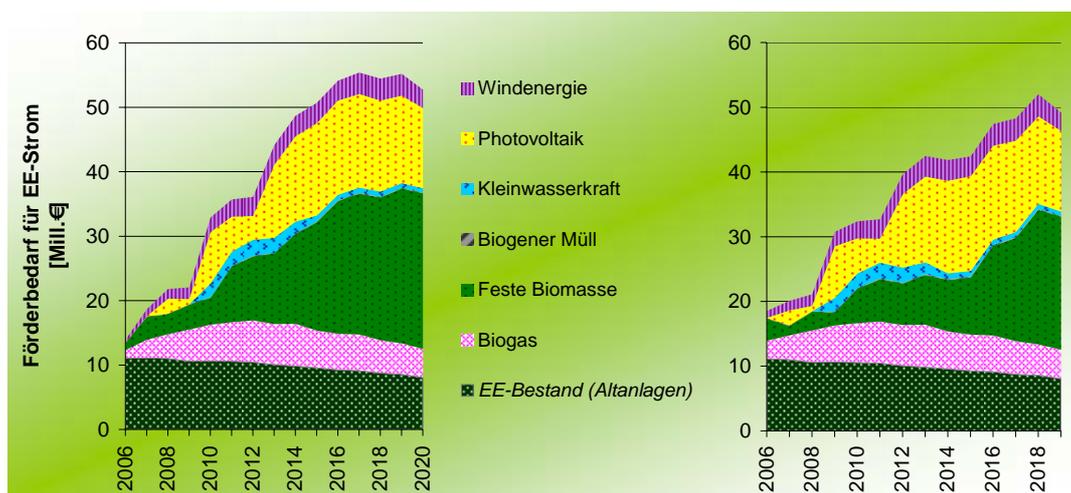


Abbildung 6-19: Entwicklung der direkten Förderkosten für EE im Stromsektor gemäß dem Szenario „verstärkte Anstrengungen“, aufgeschlüsselt nach Varianten: „(Erneuerbare)“ (links) und „(Kyoto)“ (rechts)

Abbildung 6-11 bietet eine detaillierte Aufschlüsselung der Fördervolumina für den Stromsektor. Die Anteile einzelner Technologien werden somit klar erkennbar. Im Vergleich zur Erzeugung Tabelle 6-4 werden die hohen Kosten der Photovoltaik offensichtlich: Der weitere Ausbau der Photovoltaik schlägt sich mit 157 Mill. €<sup>58</sup> zu

<sup>58</sup> Dieser Wert beinhaltet die diskontierten kumulierten Aufwendungen im betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020 sowie auch alle Folgekosten aufgrund vertraglicher Vergütungsverpflichtungen in den Jahren danach.

Buche, was in etwa 29% der gesamten im Strombereich anfallenden Kosten ausmacht. Im Vergleich dazu entspricht die hierdurch stimulierte PV-Stromerzeugung 2020 rund 7% der gesamten Stromproduktion neuer Anlagen.

Weiters veranschaulicht ein Vergleich der beiden Varianten in obiger Grafik die Mehrkosten des erhöhten Ausbaus der Biomasse-Verstromung gemäß Szenario „Erneuerbare“.

### 6.3.3.3 Vermiedene CO<sub>2</sub> Emissionen

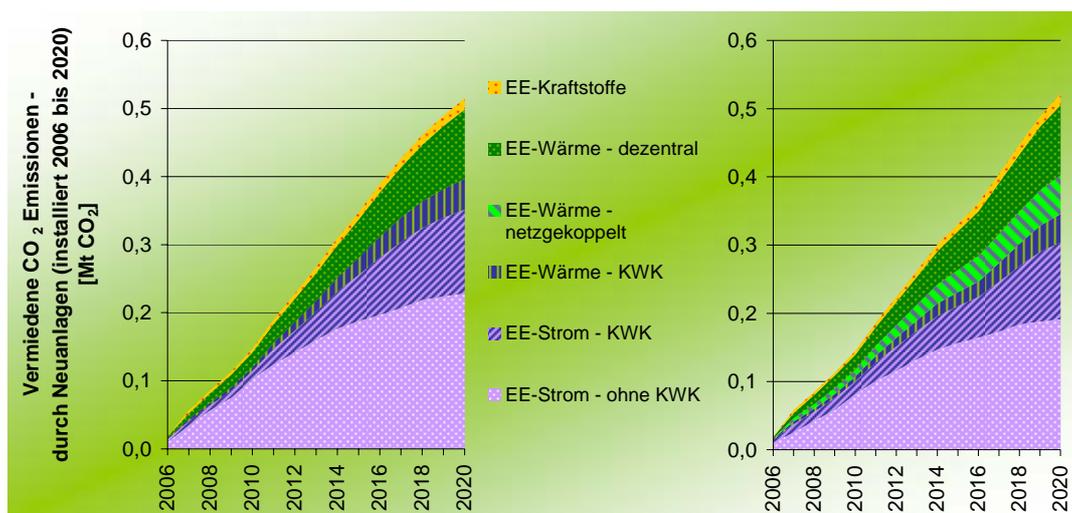


Abbildung 6-20: Entwicklung der vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden mit dem Ausbau EE gemäß dem Szenario „verstärkte Anstrengungen“, aufgeschlüsselt nach Varianten: „(Erneuerbare)“ (links) und „(Kyoto)“ (rechts)

Die zusätzlich vermiedenen CO<sub>2</sub> Emissionen verbunden mit dem Ausbau neuer EE-Anlagen im Zeitraum 2006 bis 2020 werden auf sektoraler Ebene in Abbildung 6-20 aufgeschlüsselt. Es zeigt sich insgesamt ein moderater, wenn auch im Vergleich zu BAU durchaus bedeutsamerer Beitrag EE zur Erreichung der Emissionsverpflichtungen Luxemburgs. Wie bereits im BAU-Fall erwähnt, erscheint es fraglich, wo die durch EE-Strom vermiedenen Emissionen tatsächlich anfallen. Die zu erwartende Verdrängung von Stromimporten würde bedingen, dass Luxemburg hiervon keinen Vorteil im Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele haben würde. Vergleicht man die beiden Varianten „verstärkter Anstrengungen“ so ist insgesamt eine nahezu idente CO<sub>2</sub>-Vermeidung zu beobachten – 516 kt im „Erneuerbare“ Fall und 522 kt gemäß Variante „Kyoto“. Der national gesicherte Anteil dieser vermiedenen Emissionen unterscheidet sich aber sehr wohl. Tragen im „Kyoto“ Fall rund 218 kt oder 42% der im gesamten seitens EE vermiedenen Emissionen

nen zur nationalen Zielerreichung bei, so sind dies im „Erneuerbare“ Szenario nur lediglich 164 kt oder 32%. Monetär betrachtet, bei Zugrundelegung des unterstellten CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreises in Höhe von 20 €/t, entspricht die gesamte Emissionsvermeidung einer Ersparnis in Höhe von rund 10,4 Mill. €. National schlagen sich hiervon 3,3 („Erneuerbare“) bis 4,4 Mill. € gesichert zu Buche.

#### **6.3.3.4 Vermiedener Einsatz fossiler Energien**

Emissionsvermeidung und Verminderung des Bedarfs an fossiler Energie gehen Hand in Hand. Die hier betrachteten Varianten des Szenarios „verstärkter Anstrengungen“ weisen hierbei beachtliche Beiträge zur Sicherung der zukünftigen Energieversorgung in Luxemburg auf. Durch die im betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020 neu installierten Anlagen werden im Jahr 2020 fossile Energieträger in einer Bandbreite von 2.091 bis 2.212 GWh eingespart. Eine detaillierte Aufschlüsselung gemäß den mittleren sektoralen Anteilen der fossilen Energieträger wird in Folge für die Variante „Kyoto“ beispielhaft vorgenommen: Der Gesamtwert von 2.212 GWh im Jahr 2020 entspricht etwa 146 Mill. m<sup>3</sup> Erdgas, 32 ktoe Erdöl sowie Kohle im Ausmaß von etwa 68 kt SKE. Monetär ausgedrückt, resultiert eine Summe von rund 55 Mill. € für selbiges Jahr. Wie bei der Emissionsvermeidung angemerkt, birgt eine rein nationale Betrachtung dieser Mengen bzw. Geldbeträge aber gewisse Tücken. Es ist fraglich wo im europäischen Strommarkt eine in Luxemburg eingespeiste Kilowattstunde EE-Strom eine ansonst thermisch erzeugte ersetzt. Wie im BAU-Fall festgestellt, bleibt der monetäre volkswirtschaftliche Nutzen hiervon nahezu unverändert, da Energieimporte so oder so verringert werden, sei dies nun fossile Primärenergie oder elektrische Energie. In beiden Fällen resultiert eine positive Auswirkung auf die Handelsbilanz Luxemburgs.

#### **6.3.3.5 Sensitivitätsanalyse**

Eine umfassende Sensitivitätsuntersuchung wurde auch zu dem oberhalb vorgestellten Szenario „verstärkter Anstrengungen“ vorgenommen, wobei jeweils die passender der beiden Ausgestaltungsvarianten als Referenz gewählt wurde:

**Niedrige fossile Energiepreise** bedingen eine Verringerung der über den Zeitraum 2006 bis 2020 kumulierten Förderkosten (inkl. Kosten für Altanlagen) um -7%. Die Kostenreduktion wird jedoch von einem massiv verminderten Ausbau EE begleitet – ein Minus von -13% ist im Jahr 2020 bei der gesamten Energieerzeugung auf Basis EE festzustellen. Die niedrigen Energiepreise bewirken insbesondere einen Rückgang bei Biokraftstoffen (Reduktion des EE-Anteils um -69% im Jahr 2020), aber auch der Wärmesektor (-19%) ist im allgemeinen stärker betroffen als vergleichsweise die Stromerzeugung auf Basis EE (-1%), was aber vor allem

auf die zugrunde gelegten Förderinstrumente zurückzuführen ist.<sup>59</sup>

**Beschleunigtes technologisches Lernen** ausgelöst durch erhöhtes Wachstum auf globaler Ebene bewirkt bei ambitionierten Förderpolitiken, wie im Fall „verstärkter Anstrengungen“ unterstellt, eine geringfügige Erhöhung der Förderkosten (+4%) im betrachteten Zeitraum 2006 bis 2020<sup>60</sup>, bedingt durch eine geringfügige Erhöhung des weiteren Ausbaus EE (+1%).

Eine **Steigerung der Energienachfrage**, die im Gegensatz zum hier unterstellten Referenzfall gesteigerter Energieeffizienz einer *Business-as-usual* Entwicklung der Nachfrage entspricht, zeigt keine Auswirkungen im Hinblick auf Förderkosten sowie Ausbau EE in absoluten Zahlen.<sup>61</sup> Sehr wohl zeigt die gestiegene Energienachfrage jedoch Auswirkungen auf die relativen Anteile EE an den korrespondierenden sektoralen bzw. primärenergetischen Gesamtnachfragen: Der Beitrag EE zur Deckung des Primärenergiebedarfs verringert sich um -15%, sodass im Jahr 2020 ein Anteil von 3,8% (im Vergleich zu 4,5% im Referenzfall) resultiert. Bereinigt man dies um jenen Primärenergieverbrauch, der dem Treibstoffexport zuzuordnen ist, so ergibt sich ein primärenergetischer Beitrag EE in Höhe von 6,8% für das Jahr 2020. Im Stromsektor ist ein Rückgang in Höhe von -10% zu beobachten und der Anteil EE an der Gesamtstromnachfrage 2020 beträgt folglich 8,8%. Im Wärmesektor sind die Auswirkungen verminderter Energieeffizienz gemäß der verwendeten Prognose geringer einzuschätzen: Eine marginale Reduktion von -3% bewirkt ein Absinken des Anteils EE auf rund 5,0%. Im Verkehrsbereich ist der Einfluss der unterlegten Verbrauchsentwicklung weitaus größer – der Anteil am gesamten Kraftstoffbedarf sinkt um -17%, sodass ein Beitrag EE in Höhe von 0,2% mit bzw. 0,9% ohne Berücksichtigung des Mehrverbrauchs durch Treibstoffexporte resultiert. Die nachfolgende Abbildung 6-21 veranschaulicht obige Ausführungen.<sup>62</sup>

---

<sup>59</sup> Die im Stromsektor unterstellten Einspeisetarife bieten eine fixe Vergütung der eingespeisten EE, unabhängig vom Referenzpreis konventioneller Energie.

<sup>60</sup> Schließt man aber auch die Folgekosten, also jene Förderkosten, die nach 2020 aufgrund des bis dahin erfolgten Ausbaus EE anfallen, in die Betrachtung ein, so reduzieren sich die Mehrkosten (+1% anstelle von +4%). Dies ist auf die aufgrund beschleunigten technologischen Lernens gesunkenen Kosten der EE-Technologien zurückzuführen.

<sup>61</sup> Dies deckt sich mit den Aussagen, die beim Pendant des BAU-Szenarios getroffen wurden. Zur Erinnerung, dabei wurde im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchungen der Einfluss gesteigerter Energieeffizienz untersucht.

<sup>62</sup> Ein Vergleich zu Abbildung 6-15, welche selbige Darstellung für die Referenznachfrageentwicklung (d.h. bei gesteigerter Energieeffizienz) zeigt, erscheint hierbei von Interesse.

Schließlich ist auch zu beobachten, dass die im Vergleich zum Referenzfall gestiegene Energienachfrage bei gleich bleibendem Fördervolumen in absoluten Zahlen niedrigere spezifische Transferzahlungen, also je konsumierter Energiemenge, resultieren. Diese Kostenreduktionen betragen etwa im Stromsektor im Mittel -6%, im Wärmebereich -2% und im Verkehrssektor rund -12%.

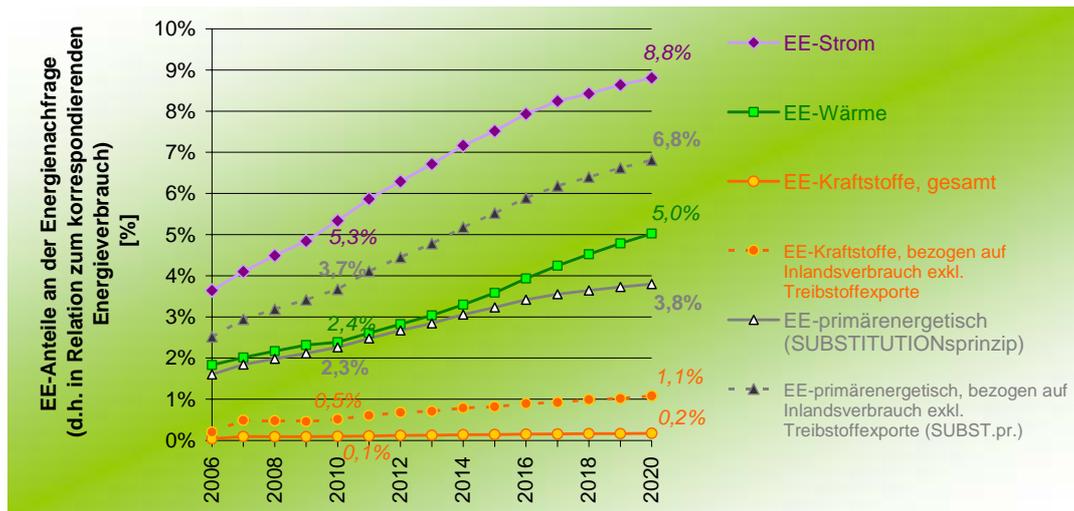


Abbildung 6-21: Prozentuale Anteile EE an der Gesamtnachfrage primärenergetisch sowie auf sektoraler Ebene gemäß des Szenarios „verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)“ im Falle einer *gestiegenen Energienachfrage*

**Eine erhöhte Risikobewertung**, gleichbedeutend mit einem höheren kalkulatorischen Zinssatz (8,6% anstelle von 6,5%) verschlechtert die Wettbewerbsfähigkeit kapitalintensiver Technologien – ein Faktum, das leider im Vergleich zu konventionellen Optionen für die meisten EE-Technologien zutrifft. Im konkreten Fall resultiert wie bereits im BAU-Fall beobachtet ein geringerer Ausbau EE (-9%) und in Folge geringere erforderliche Fördervolumina (-20% im Bezug auf Neuanlagen im Zeitraum 2006 bis 2020). Wie einleitend erwähnt sind hiervon insbesondere investitionsintensive Technologien wie beispielsweise die Windenergie (-21% an kumulierter Anlagenleistung im Jahr 2020) oder die Photovoltaik betroffen (-50%).

Ein **erhöhtes mittelfristig realisierbares Potenzial der solaren Energieoptionen** steht im Fokus der nachfolgenden Betrachtung: Im Einklang mit Tabelle 5.1 stellt bei dieser Sensitivitätsuntersuchung die obere Bandbreite der identifizierten realisierbaren Potenziale im Bereich der Photovoltaik und der Solarthermie die Ausbaubegrenzung dar. Bei unveränderten Förderanreizen resultiert bei der Photovoltaik eine nahezu vollständige Ausschöpfung (169 GWh bzw. 96%) des erhöht

angesetzten Potenzials, während bei der Solarthermie lediglich 71% (68 GWh) des Potenzials Nutzung finden.

In Folge wird erstmals die „10% Hürde“ im Strombereich überschritten – im Detail werden 11,2% der Gesamtstromnachfrage im Jahr 2020 durch erneuerbare Energien gedeckt, was einem Anstieg von 14% der Gesamtaufbringung von EE-Strom entspricht.<sup>63</sup> Im Wärmebereich entspricht der Zuwachs an solarthermischer Wärmeerzeugung von 184% (gemessen am Referenzfall) einem Anstieg der Gesamtproduktion von lediglich 5%.<sup>64</sup>

Der erhöhte Ausbau ist natürlich auch mit Kosten verbunden: Betrachtet man die Photovoltaik so bedingt der Mehrausbau kumulierte Förderaufwendungen (für neue PV-Anlagen) in Höhe von 599 Mill. €, die etwa 61% der Gesamtausgaben für EE im Strombereich entsprechen. Dies bedeutet einen Kostenanstieg der Ausgaben für die Photovoltaik in Höhe von +281%. Die resultierenden Transferzahlungen seitens der Stromkonsumenten würden als Folge astronomische Höhen erreichen: Der erforderliche Zuschlag im Mittel der betrachteten Jahr von 5,3 auf 8,3 €/MWh Gesamtnachfrage steigen, was einem Zuwachs von 55% entspricht.

Die Solarthermie schlägt kostenmäßig weniger stark zu Buche. Es resultieren kumulierte Förderkosten (inkl. Folgekosten) in Höhe von 52 Mill. €, was etwa 36% der im Wärmesektor anfallenden Kosten für Neuanlagen umfasst. Dies entspricht einem Kostenanstieg um +187% gemessen am Referenzfall.

Die **Möglichkeit der Biogasdirekteinspeisung** wird im Rahmen der nachfolgenden Sensitivität analysiert. Gemäß den diesbezüglichen Kostenangaben in Abschnitt 5.4.11 in Kopplung mit den Eckdaten der in Luxemburg errichteten GuD-Anlage *Centrale TGV* wird die Option der Biogasdirekteinspeisung in direkter Kopplung mit der nachgeschalteten Nutzung in der erwähnten KWK-Anlage einer modellhaften Betrachtung unterzogen. Trotz der auf den ersten Blick vergleichsweise hohen Kosten der Gaseinspeisung ergibt sich eine überraschend positive Bilanz: Die Stromerzeugung aus Biogas weist nach anfänglich verhaltener Entwicklung einen Anstieg im Jahr 2020 um 19% gegenüber dem Referenzfall auf. Rund 125 GWh beträgt die Stromproduktion auf Basis gasförmiger biogener Energieträ-

---

<sup>63</sup> Betrachtet man allein die PV so entspricht die gestiegene Erzeugung einem Zuwachs von 194% bezogen auf den Referenzfall.

<sup>64</sup> Es sei angemerkt, dass obige Angaben sich auf die Variante „Erneuerbare“ beziehen. Betrachtet man alternativ das Szenario „Kyoto“ so entspricht das Mehr an Solarthermie einem Zuwachs von 4% bei der gesamten EE-Wärmeerzeugung im Jahr 2020.

ger, wovon rund 70% der Biogasdirekteinspeisung zuzurechnen sind.<sup>65</sup> Die kumulierten Förderkosten steigen jedoch keineswegs aufgrund der Mehrerzeugung stark an, da beispielsweise Investitionszuschüsse für Biogas-KWK-Anlagen wegfallen. Insgesamt betragen die kumulierten diskontierten Förderaufwendungen 78 Mill. €, was einem Zuwachs von 5% gegenüber dem Referenzfall entspricht. Spezifisch betrachtet, also umgelegt auf die erzeugte Energiemenge, resultieren niedrigere spezifische Kosten.

Die Biogasdirekteinspeisung stellt somit eine attraktive Option dar, die auch im Hinblick auf die nationale Erfüllung der Klimaschutzziele ihren Beitrag leistet. Das im Gaskraftwerk verbrannte Biogas ersetzt alternativ eingesetztes Erdgas und vermeidet in Folge die hiermit verbundenen Emissionen. Weiters erfolgt eine effizientere Ressourcennutzung, da im Großkraftwerk eine weitaus höhere Umwandlungseffizienz erreicht wird als im Vergleich zur dezentralen Verstromung.

---

<sup>65</sup> Der Rest umfasst bereits errichtete in Betrieb befindliche landwirtschaftliche Biogasanlagen sowie Klär- und Deponiegas.

## 7 Kosten-Nutzen Analyse

Abschließend wird eine vergleichende Analyse der zuvor im Detail betrachteten Szenarien durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchung stehen hierbei einerseits der Nutzen des weiteren Ausbaus erneuerbarer Energien sowie die hiermit verbundenen Kosten. Auf der Nutzenseite sei beispielsweise der Beitrag zur Versorgungssicherheit erwähnt, aber auch die Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Die Kostenseite umfasst im Wesentlichen die resultierenden Förderkosten, wobei die direkten Förderkosten, also die Differenz zwischen gewährter Vergütung und alternativ zu bezahlender Marktpreise, im Fokus der Betrachtung stehen.

Nachfolgend wird ein Szenarienvergleich der Kernergebnisse auf sektoraler bzw. kumulierter Ebene vorgenommen, um abschließend auf Technologieebene eine vergleichende Betrachtung zu erwägen.

### 7.1 Szenarienvergleich

Die Kernergebnisse des vorigen Kapitels, welche hierin getrennt dargestellt wurden, werden in Folge einer vergleichenden Analyse unterzogen. Der Szenarienvergleich beschränkt sich hierbei auf die drei im Detail diskutierten Ausbauszenarien:

- das *Business-as-usual (BAU)* Szenario
- das Szenario „*verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)*“
- die Alternativvariante „*verstärkte Anstrengungen (Kyoto)*“

Die **resultierende Energieerzeugung** steht im Mittelpunkt der einführenden Betrachtung. Abbildung 7-1 bietet einen Vergleich der sich auf sektoraler Ebene ergebenden Energieerzeugung im finalen Betrachtungsjahr (2020) gemäß den drei Szenarien. Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf im Betrachtungszeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete Anlagen. Der massive Mehrausbau EE im Falle verstärkter Anstrengungen wird offensichtlich. Im Falle der Variante „*Kyoto*“ übersteigt die EE-Erzeugung den Referenzfall (BAU) um 186%, wobei der Wärmesektor den größten Anteil beisteuert. Die Variante „*Erneuerbare*“ weist eine etwas geringere Gesamterzeugung auf, da hier die Verstromung von Biomasse im Vordergrund steht, was aufgrund der geringeren Umwandlungseffizienz eine etwas geringere Endenergieausbeute zur Folge hat. Im Vergleich zu BAU wird aber rund 156% mehr EE-Erzeugung antizipiert.

Den Beitrag EE auf sektoraler Ebene veranschaulicht in deutlicher Weise Abbildung 7-2. Hier wird sowohl für die einzelnen Sektoren als auch primärenergetisch die jeweilig gesamte EE-Erzeugung in Relation zur korrespondierenden

Nachfrage gesetzt. Die Angaben beziehen sich auf die im Jahr 2020 erreichte Penetration. Es sei angemerkt, dass das BAU-Szenario auf eine im Vergleich zu den Alternativvarianten andere Nachfrageentwicklung Bezug nimmt. Im BAU-Fall wird ein stärkeres Nachfragewachstum vorausgesetzt, was in einem um etwa 13% höheren Primärbedarf resultiert.

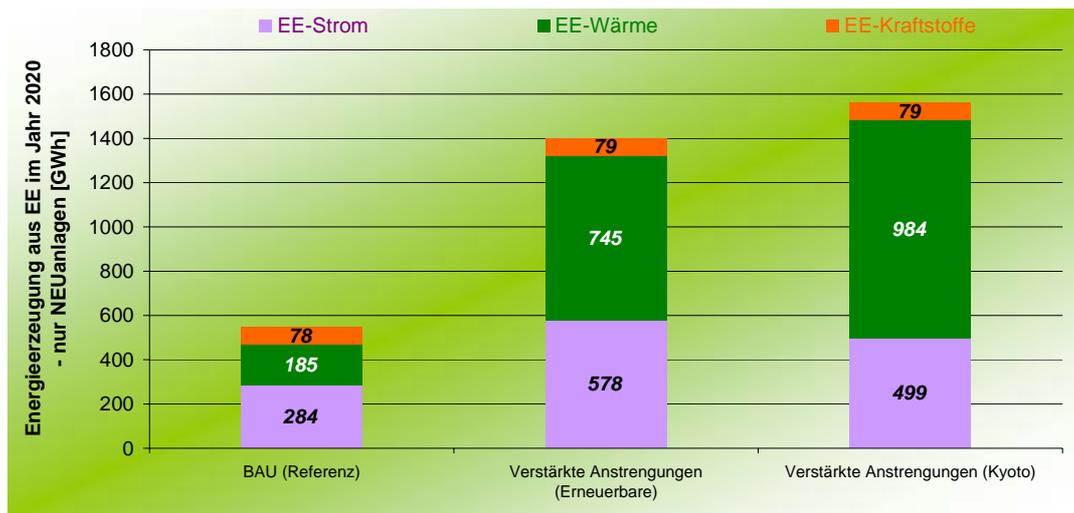


Abbildung 7-1: Szenarienvergleich: Resultierende Energieerzeugung im Jahr 2020 aus im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichteten EE-Anlagen

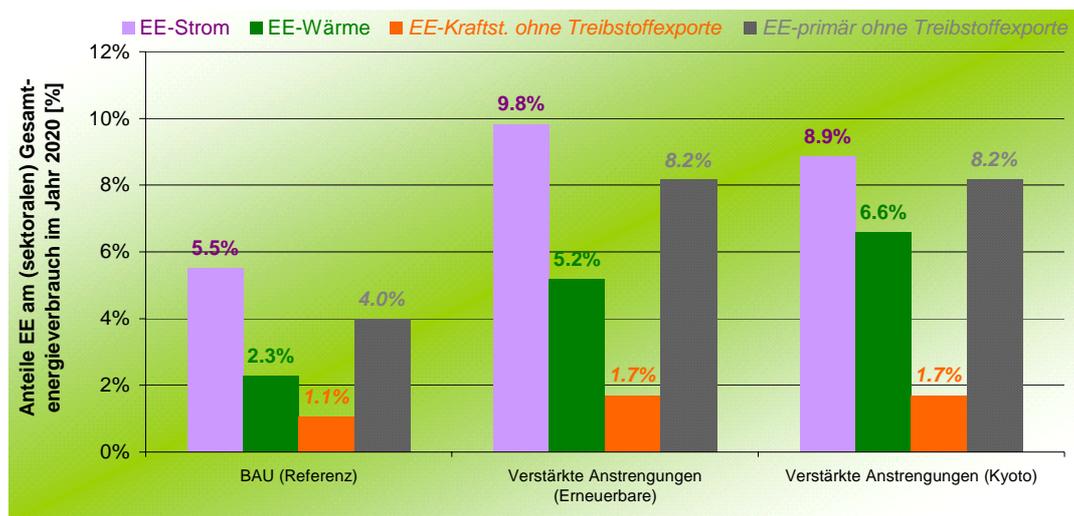


Abbildung 7-2: Szenarienvergleich: Prozentuale Anteile EE am sektoralen bzw. primärenergetischen Energieverbrauch im Jahr 2020

Der Szenarienvergleich zeigt, dass Unterschiede im Bereich der Biokraftstoffe insbesondere aus einer geänderten Nachfrage in den Szenarien *Verstärkte Anstrengungen* resultieren. Erzeugungsseitig wird hier in allen Fällen das verfügbare Potenzial nahezu vollständig ausgeschöpft. Der BAU-Fall weist im Vergleich zu den anderen Szenarien beinahe nur halb so große EE-Anteile im Strombereich auf. So resultiert im Jahr 2020 ein Ausbau der unter dem 2010er-Ziel der RES-E Richtlinie liegt. Auch der Wärmebereich bleibt vergleichsweise verhalten. Verstärkte Anstrengungen, also ambitionierte und effektive Förderpolitiken bedingen eine weit- aus höhere Ausschöpfung der Ressourcen erneuerbarer Energien. Unterschiede sind entsprechend der Szenariendefinition zwischen den beiden Alternativvarianten zu erkennen. So liegt bei „*verstärkte Anstrengungen (Erneuerbare)*“ ein Hauptaugenmerk auf der Biomasse-Verstromung, um somit etwa auch kurzfristig gesehen einen hohen Beitrag zur Erreichung des 2010er Ziels für EE-Strom in Höhe von 5,7% zu leisten. Im Jahr 2020 liegt der Anteil EE an der Stromnachfrage bei 9,8% („*Erneuerbare*“) bzw. 8,9% („*Kyoto*“). EE-Wärme erlebt in beiden Alternativszenarien einen massiven Ausbau, vor allem bedingt durch vermehrte Nutzung netzgekoppelter Wärme wie etwa auch mittels Kraft-Wärme-Kopplung oder vermehrten Nah- und Fernwärmeausbau.

Der Ausbau EE ist aber auch mit Kosten verbunden. Im Konkreten stehen nachfolgend die **direkten Förderkosten** im Mittelpunkt der vergleichenden Analyse. Die direkten Förderkosten untersucht umfassen hierbei jene finanziellen Aufwendungen, die im direkten Zusammenhang mit einer gewährten Förderung der Errichtung bzw. des Betriebs einer Anlage auf Basis erneuerbarer Energien anfallen. *Direkte Förderkosten* bedeutet, dass eventuell anfallende zusätzliche administrative Aufwendungen nicht in Betracht gezogen werden, ebenso wie auch externe Kosten der erneuerbaren Energien bzw. der vermiedenen fossilen Erzeugung keine Berücksichtigung finden.

Abbildung 7-3 zeigt die kumulierten Förderaufwendungen für im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete EE-Anlagen für alle drei betrachteten Fälle. Die Angaben beinhalten nicht nur Kosten, die Betrachtungszeitraum 2006 bis 2020 anfallen, sondern umfassen auch wie im Falle von Einspeisevergütungen die Folgekosten für den Zeitraum danach. Es zeigen sich deutliche Mehrkosten im Falle verstärkter Anstrengungen, welche aber vor allem der Photovoltaik sowie der nahezu vollständigen Biomasseausnutzung anzulasten sind. So entfallen beispielsweise von den für den Stromsektor ausgewiesenen 543 Mill. € kumulierter Fördervolumina gemäß Variante „*Erneuerbare*“ 154 Mill. € (29%) auf die PV, der aber nur 7% der zusätzlichen Erzeugung entsprechen. Die Biomasse-Verstromung zeichnet sich für 255 Mill. € (47%) verantwortlich, der Vergleich zu der resultierenden Erzeugung zeigt aber ein ausgewogenes Bild – es entfallen 43% der zusätzlichen EE-Erzeugung

auf die Biomasse.

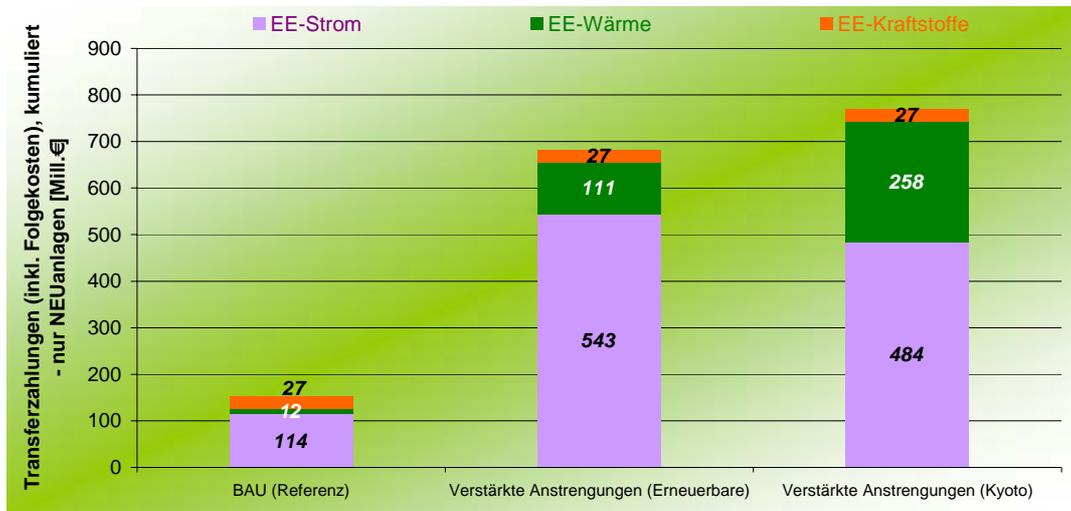


Abbildung 7-3: Szenarienvergleich: Kumulierte (diskontierte) Förderkosten für im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete EE-Anlagen

Als Beispiele für **positive Aspekte im Einklang mit dem Ausbau EE** wurden im vorigen Kapitel der Beitrag zum Klimaschutz sowie zur Versorgungssicherheit ausführlich diskutiert. Natürlich ist hier auch die Schaffung von Arbeitsplätzen zu benennen, was insbesondere für den Bereich der Biomasse verbunden mit der intensiven Wertschöpfung oftmals erwähnt wird.

Im Rahmen des hier durchgeführten Szenarienvergleichs wird einleitend auf den Aspekt der **Treibhausgasemissionsreduktion** eingegangen. Die zusätzlich vermiedenen CO<sub>2</sub> Emissionen durch den weiteren Ausbau EE im Zeitraum 2006 bis 2020 sind für die untersuchten Fälle in Abbildung 7-4 dargestellt. Abgesehen von den in Summe vermiedenen Emissionen, wird hierbei der gesonderten Situation Luxemburgs speziell Rechnung getragen: Die durch EE-Strom resultierende Emissionsvermeidung wird gesondert ausgewiesen, da es als wahrscheinlich zu erachten ist, dass hierdurch nicht heimische Erzeugung sondern vielmehr Stromimporte vermindert werden. Die damit verbundene CO<sub>2</sub> Vermeidung kann somit nicht gesichert in Luxemburg bilanziert werden und erscheint somit als nicht gesichert im Hinblick auf ihren Beitrag zur Erreichung Luxemburgs Klimaschutzverpflichtun-

gen.<sup>66</sup> Die in obiger Abbildung ausgewiesene gesicherte Emissionseinsparung umfasst folglich alle verbleibenden Sektoren – von Biokraftstoffen über dezentraler EE-Wärme bis hin zu dem wärmerlevanten Teil der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis biogener Energieträger.

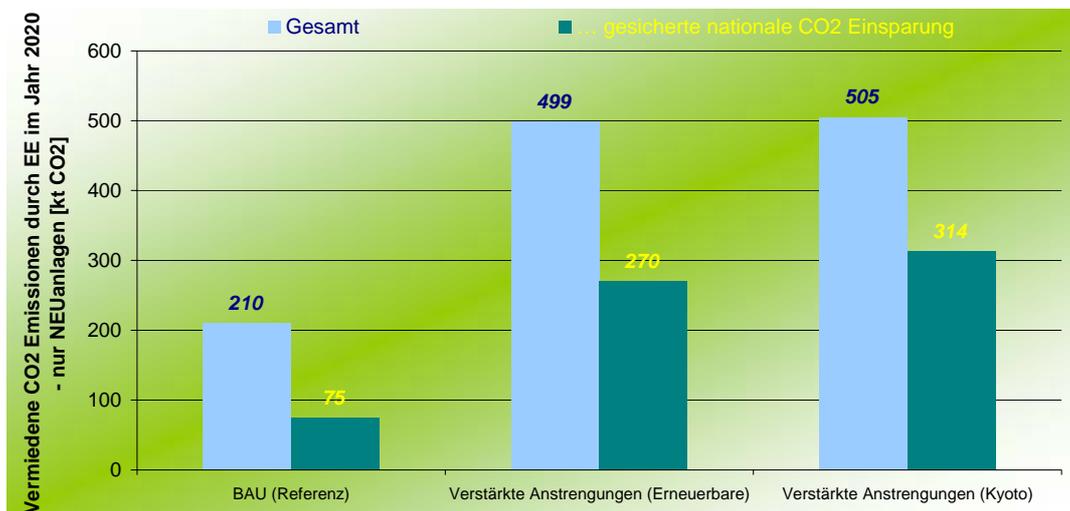


Abbildung 7-4: Szenarienvergleich: Vermiedene CO<sub>2</sub> Emissionen im Jahr 2020 – durch im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete EE-Anlagen

Der Szenarienvergleich zeigt wie zu erwarten den höchsten gesicherten Beitrag im Falle der Variante „*verstärkte Anstrengungen (Kyoto)*“, da hierbei gezielt die Nutzung der Biomasse im Wärmebereich favorisiert wurde. Aber selbst bei massiver Biomasse-Verstromung fällt die Bilanz nicht wesentlich schlechter aus. Lediglich im BAU-Fall ist der Beitrag neuer EE-Anlagen zur nationalen Klimazielerreichung als marginal zu erachten.

Emissionsvermeidung und ***Verminderung des Bedarfs an fossiler Energie*** gehen Hand in Hand. Der zusätzlich verminderte Bedarf an fossiler Energie durch den weiteren Ausbau EE im Zeitraum 2006 bis 2020 wird für die betrachteten Fälle in Abbildung 7-5 skizziert. Hierbei wird in energetischen Größen sowohl die Summe an vermiedener fossiler Energie dargestellt, als auch jener Anteil ausgewiesen,

<sup>66</sup> Im Falle von KWK-Anlagen erfolgt die Bilanzierung für Strom und Wärme getrennt. Für den Stromteil wird wie bei anderen EE-Stromerzeugungstechnologien die CO<sub>2</sub>-Intensität (im Mittel auf europäischer Ebene) zur Abschätzung der vermiedenen Emissionen herangezogen, während für die produzierte Wärme die CO<sub>2</sub>-Intensität gemäß der nationalen Wärmeerzeugung als Ausgangsbasis dient.

der hiervon gesichert in Luxemburg anfallen würde. Die Differenz ist dadurch zu erklären, dass durch den Ausbau von EE-Strom wahrscheinlich nicht die heimische Stromerzeugung, sondern vielmehr Stromimporte vermindert werden. Die damit verbundene Primärenergievermeidung kann somit nicht gesichert in Luxemburg bilanziert werden. Im Gegensatz zur Emissionsvermeidung ist aber anzumerken, dass der monetäre volkswirtschaftliche Nutzen hiervon nahezu unverändert bliebe, da Energieimporte so oder so verringert werden, sei dies nun fossile Primärenergie oder elektrische Energie. In beiden Fällen resultiert eine positive Auswirkung auf die Handelsbilanz Luxemburgs. Der Szenarienvergleich zeigt eine deutliche Steigerung der Primärenergieverminderung für beide Varianten „*verstärkter Anstrengungen*“ im Vergleich zum BAU-Szenario. Es wird offensichtlich, dass erneuerbare Energien einen wichtigen Beitrag zur Verminderung der Abhängigkeit Luxemburgs von Energieimporten und somit zur nationalen Versorgungssicherheit leisten können.

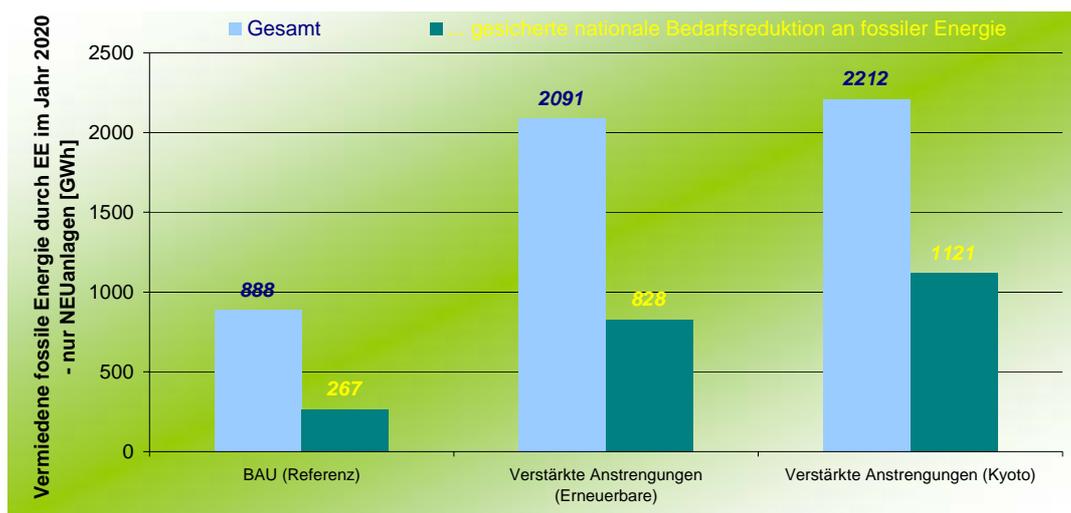


Abbildung 7-5: Szenarienvergleich: Vermiedene fossile Energie im Jahr 2020 – durch im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichtete EE-Anlagen

Abschließend zeigt Tabelle 7-1 einen simplifizierten Vergleich der anfallenden Kosten und des Nutzens verbunden mit dem weiteren Ausbau erneuerbarer Energien. Im Detail listet die nachfolgende Tabelle die für Neuinstallationen im Zeitraum 2006 bis 2020 anfallenden Förderkosten und die vermiedenen Ausgaben sowohl für fossile Energie als auch für Treibhausgasemissionen am Beispiel CO<sub>2</sub>. Für alle drei Indikatoren werden sowohl die im untersuchten Zeitraum 2006 bis 2020 anfallenden Kosten bzw. Ersparnisse als auch die Folgekosten bzw. Folgeersparnisse gesondert ausgewiesen. Ebenso wird auf der Nutzenseite der gesicherte auf nationa-

---

ler Ebene anfallende direkte Nutzen separat bilanziert.<sup>67</sup> Betrachtet man die kumulierten, diskontierten<sup>68</sup> Es zeigt sich bei allen drei Fällen eine positive Bilanz seitens des Ausbaus erneuerbarer Energien. Den in den Jahren bis 2020 vermehrt anfallenden Kosten steht stets ein monetär betrachtet hoher Nutzen gegenüber, welcher vor allem in den Folgejahren nach 2020 sich zu Buche schlägt.<sup>69</sup>

---

<sup>67</sup> Im Hinblick auf die Verminderung von Importen an fossiler Energie sei aber angemerkt, dass auch bei nicht gesicherter nationaler Bilanzierung – im Gegensatz zur Emissionsvermeidung – der monetäre volkswirtschaftliche Nutzen nahezu unverändert erhalten bliebe, da Energieimporte ohnehin vermindert werden, sei dies nun fossile Primärenergie oder elektrische Energie.

<sup>68</sup> Es wurde hierfür ein aus volkswirtschaftlicher Sicht üblicher realer Zinssatz in Höhe von 2,5% zugrunde gelegt.

<sup>69</sup> Mit dem Ausbau erneuerbarer Energien sind natürlich auch noch weitere hier nicht näher betrachtete positive Aspekte verbunden – wie etwa vermehrte Beschäftigung verbunden mit der Ausschöpfung biogener Ressourcen oder etwa eine Verminderung der alternativ vermehrt anfallenden externen Kosten der Energiebereitstellung.

Tabelle 7-1: Szenarienvergleich: Kosten versus Nutzen des Ausbaus erneuerbarer Energien (Neuinstallationen 2006 bis 2020) (vereinfachte monetäre Betrachtung)

<b>Kosten-Nutzen-Vergleich</b>  <i>EE-Gesamt (Neuanlagen (2006 bis 2020))</i>	<i>[Alle Angaben in Mill. €]</i>		
	<b>BAU</b>	<b>Verstärkte Anstren- gungen (Erneuer- bare)</b>	<b>Verstärkte Anstren- gungen (Kyoto)</b>
<b>Förderkosten</b>			
Kum. (disk.) Kosten (inkl. Folgekosten)	<b>153</b>	<b>681</b>	<b>743</b>
(Disk.) Kosten im Zeitraum 2006 bis 2020	131	474	516
(Disk.) Kosten nach 2020	22	207	227
<b>Vermiedene Ausgaben für fossile Energien, gesamt</b>			
Kum. (disk.) Ersparnis (inkl. Folgeersparnis)	<b>266</b>	<b>629</b>	<b>690</b>
(Disk.) Ersparnis im Zeitraum 2006 bis 2020	118	260	273
(Disk.) Ersparnis nach 2020	148	369	417
<b>Vermiedene Ausgaben für fossile Energien, gesichert national</b>			
Kum. (disk.) Ersparnis (inkl. Folgeersparnis)	<b>108</b>	<b>311</b>	<b>416</b>
(Disk.) Ersparnis im Zeitraum 2006 bis 2020	48	122	157
(Disk.) Ersparnis nach 2020	60	189	260
<b>CO<sub>2</sub>-Vermeidung, gesamt</b>			
Kum. (disk.) Ersparnis (inkl. Folgeersparnis)	<b>63</b>	<b>136</b>	<b>138</b>
(Disk.) Ersparnis im Zeitraum 2006 bis 2020	30	63	61
(Disk.) Ersparnis nach 2020	32	74	77
<b>CO<sub>2</sub>-Vermeidung, gesichert national</b>			
Kum. (disk.) Ersparnis (inkl. Folgeersparnis)	<b>15</b>	<b>38</b>	<b>54</b>
(Disk.) Ersparnis im Zeitraum 2006 bis 2020	7	16	22
(Disk.) Ersparnis nach 2020	8	22	32

## 7.2 Technologievergleich

Abschließend wird ein Vergleich der einzelnen EE-Technologien überblicksweise vorgenommen. Wie zuvor wird hierbei nur auf die drei Hauptszenarien eingegangen.

Nachfolgende Abbildung 7-6 veranschaulicht den Beitrag der einzelnen EE-Technologien hinsichtlich der im Jahr 2020 erreichten zusätzlichen Energieerzeugung auf Basis EE. Es umfasst somit lediglich jene Erzeugung, die im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichteten EE-Anlagen zuzurechnen ist.

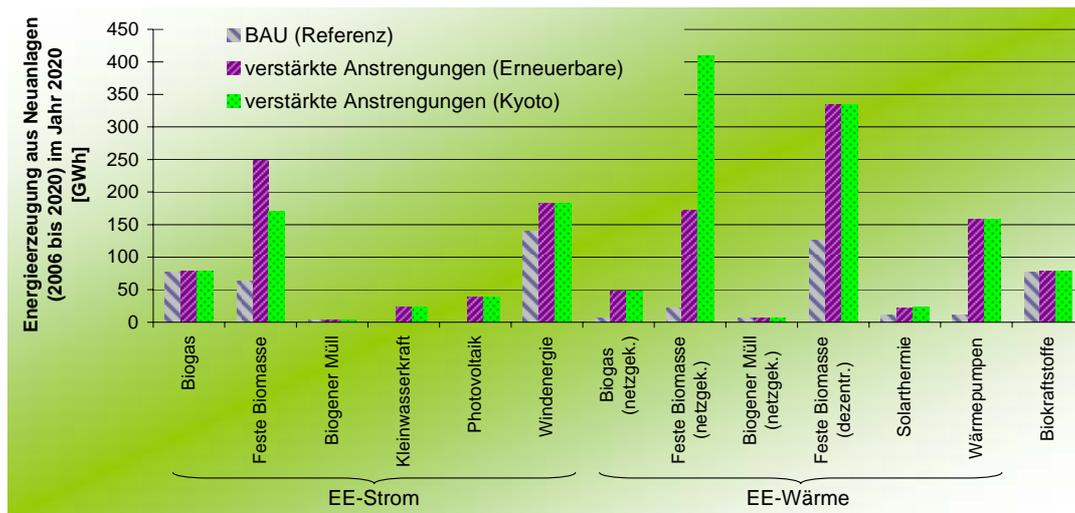


Abbildung 7-6: Szenarienvergleich: Resultierende Energieerzeugung im Jahr 2020 im Zeitraum 2006 bis 2020 neu errichteter EE-Anlagen, aufgeschlüsselt nach EE-Technologie

Der Szenarienvergleich zeigt, dass einige Schlüsseltechnologien wie etwa die Biogasnutzung<sup>70</sup>, die feste Biomasse (im BAU-Fall vor allem im Bereich der Wärme), aber auch die Windenergie oder die Biokraftstoffe in allen untersuchten Fällen einen wesentlichen Ausbau erfahren. Die Ausschöpfung der in Summe beachtlichen biogenen Ressourcen hängt aber stark von den unterstellten Förderanreizen ab. So ist im Falle *verstärkter Anstrengungen* ein massiv höherer Ausbau als im Vergleich zu den derzeitigen Rahmenbedingungen (BAU) zu erwarten. Selbiges trifft auch etwa auf den Bereich der Wärmepumpen oder der Kleinwasserkraft bzw. der Photovoltaik und Solarthermie zu.

Ein nicht unwesentliches Kriterium bei einer Kosten-Nutzen-Analyse sind schließlich die resultierenden Kosten. Folgende Aussagen lassen sich hierbei zu treffen den Technologien treffen:

- *Biogas* stellt zwar eine vergleichsweise teure Option dar, die aber unter den gegebenen (Förder)Rahmenbedingungen nahezu vollständig erschlossen werden würde. Es sei hier insbesondere auf die Ausführungen in Abschnitt 6.3.3.5 verwiesen, wo die Möglichkeit der Biogasdirekteinspeisung im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung als durchaus auch aus einem ökonomischen Gesichtspunkt interessante Alternative dargestellt wird.

<sup>70</sup> Im Hinblick auf Biogas sei angemerkt, dass bei entsprechender Ausgestaltung der (finanziellen) Anreize eine energetisch betrachtet wesentlich effizientere Nutzung erfolgen kann als dies unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu erwarten wäre. Man vergleiche hierzu die Wärmenutzung der Szenarien „verstärkter Anstrengungen“ mit dem BAU-Fall.

- Die *feste Biomasse* nimmt eine zentrale Rolle in Luxemburgs erneuerbaren Energiekorb ein. Sie stellt eine Schlüsseloption dar, strebt man etwa einen massiven Ausbau im Bereich der Strom- oder aber auch der Wärmeproduktion an. Sie umfasst sowohl mengenmäßig begrenzt verfügbare günstige Ressourcen als auch teure Fraktionen (wie etwa die Energiepflanzen), welche nur mittels hoher Förderanreize erschlossen werden können.
- Der *biogene Müll* stellt eine sehr kostengünstige Option dar, welche aber nur in sehr begrenztem Maß verfügbar ist.
- Die *Kleinwasserkraft* ist eine interessante Alternative im Bereich der Stromerzeugung mit vergleichsweise moderat bis hohen Kosten.
- Die *Photovoltaik* verfügt langfristig gesehen über ein nahezu unbegrenztes Potenzial, das aber aus heutiger Sicht nur zu vergleichsweise sehr hohen Kosten erschlossen werden kann.
- Die *Windenergie* kennzeichnet eine Schlüsseloption, die zu günstigen Kosten erschlossen werden kann und deren Beitrag im Vergleich zu anderen mittelfristig realisierbaren Potenzialen als hoch zu erachten ist.
- Die *Solarthermie* repräsentiert eine Alternative im Bereich der Wärmeerzeugung, die ebenso wie die Photovoltaik langfristig betrachtet eine Schlüsseltechnologie darstellt. Die derzeitigen Kosten liegen aber vergleichsweise auf einem hohen Niveau.
- *Wärmepumpen* zeichnen sich durch ein hohes mittelfristig erschließbares Potenzial aus, das zu moderaten Kosten Nutzung findet. Es ist aber zu beachten, dass ein massiver Ausbau auch den Strombedarf erhöht, da die Erschließung der bodennahen Erdwärme durch elektrische Energie ergänzend erreicht wird.
- *Biokraftstoffe* leisten ihren Beitrag zur Deckung des massiven Energiebedarfs im Verkehrssektor. Aufgrund der Begrenztheit landwirtschaftlicher Flächen ist ihr Beitrag aber vergleichsweise gering.

## **8 Strategien zur Umsetzung der Ausbauziele und Politikempfehlungen**

Auf Basis der Untersuchungen zum Status Quo der Nutzung der erneuerbaren Energien in Luxemburg, der Analyse der bestehenden Politiken, der Potenzialanalysen und der modellgestützten Szenarien zum Ausbau der erneuerbaren Energien wurden Empfehlungen für konkrete Förderpolitiken entwickelt. Diese können wie folgt zusammengefasst werden.

1. Aufgrund der in der Vergangenheit in Luxemburg wahrgenommenen vergleichsweise moderaten Resonanz auf Fördermaßnahmen erscheint es sinnvoll veränderte und zum Teil auch attraktivere Förderbedingungen zu schaffen, um ein dynamischeres Wachstum bei der Nutzung erneuerbarer Energieträger zu erreichen. Im Bereich der erneuerbaren Stromerzeugung ist es insbesondere ratsam die einheitlichen Fördersätze für verschiedene Technologien durch eine stärkere technologische Spezifizierung der Förderung zu ersetzen.
2. Zur Erhöhung der Investitionssicherheit und Vermeidung überhöhter Transferzahlungen wird die Einführung einer garantierten (klar festgelegten) Förderdauer und einer langfristigen Laufzeit (mit Revisionsmechanismen) empfohlen.
3. Eine Vereinfachung der derzeitigen Förderstruktur sollte angestrebt werden, um die Übersichtlichkeit und die Transparenz der Förderung zu erhöhen. Weiterhin sollte ein Nebeneinander unterschiedlicher Anlaufstellen für ähnliche Technologien und Förderzusammenhänge vermieden werden.
4. Eine weiterentwickelte Förderpolitik sollte so ausgestaltet werden, dass Regierung und Verwaltung schnell wirksame Stellglieder zur Verfügung haben, um eventuell doch auftretende Überförderungen und Marktüberhitzungen, wie in der jüngeren Vergangenheit bei der PV beobachtet, abstellen zu können.
5. Die Förderung der Stromerzeugung sollte so ausgestaltet werden, dass die Ziele der erneuerbare Stromrichtlinie erreicht werden können.
6. Die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sollte schwerpunktmäßig über reine Einspeisetarife ohne Bonuskomponente geschehen. Quotenmodelle auf der Ebene von Luxemburg sind auf Grund fehlender Marktgröße und damit fehlender Liquidität nicht als effizient einzuschätzen.
7. Die weiteren Anstrengungen sollten auf die Förderung effizienter erneuerbarer Wärmeerzeugung ausgerichtet werden, da dort der spezifisch höchste Beitrag zur Verbesserung der Versorgungssicherheit geleistet werden kann und die Nutzung erneuerbarer Wärme einen relativ großen Nutzen in Bezug auf die

- nationale CO<sub>2</sub> Bilanz bedingt.
8. Zur Optimierung der Förderung und Verknüpfung der beiden strategischen Elemente sollte die Nutzung von erneuerbaren KWK-Technologien ausdrücklich gefördert werden. Hierbei sollte unter anderem die optimierte energetische Nutzung von Biogas ein zentrales Ziel sein. Insbesondere die Direkteinspeisung von Biogas und anschließende Nutzung in effizienten KWK-Prozessen sollte gefördert werden.
  9. Anlagen zur dezentralen Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien sollten weiterhin mit einem Investitionszuschuss gefördert werden. Aufgrund tendenziell niedriger Energiesteuern sind in Luxemburg tendenziell hohe Investitionszuschüsse nötig. Darüber hinaus sollte nach Möglichkeit über die Einführung eines niedrigeren Mehrwertsteuer-Satzes für feste biogene Energieträger.
  10. Über die Förderung dezentraler Technologien hinaus sollte ein zusätzlicher Impuls im Bereich erneuerbare Nahwärme gegeben werden.
  11. Basierend auf den realisierten Fördermechanismen sollten Informationskampagnen für die Wärmetechnologien (Holzenergie, Wärmepumpen, Solarthermie) durchgeführt werden. Damit würde das Bewusstsein sowohl für das Vorhandensein der Technologien und deren vorteilhaften Eigenschaften als auch für die Fördermaßnahmen gestärkt werden. Darüber hinaus sollten die Beratungs- und Weiterbildungsangebote ausgebaut werden.
  12. Sollte mittelfristig kein zufrieden stellender Ausbau bei den Wärmetechnologien erreicht werden, könnte eine Einsatzpflicht für die Nutzung der erneuerbaren Energien in der Wärmeerzeugung oder ein Bonusmodell<sup>71</sup> eingeführt werden.
  13. Für Biotreibstoffe sollte durch eine Beimischungspflicht ein linearer Anstieg der Beimischungsmenge entsprechend der EU-Ziele vorgesehen werden. Die EU-Ziele sind für Luxemburg nur durch Importe erreichbar. Importierte Biokraftstoffe sollten ökologischen und sozialen Mindestkriterien entsprechen, sobald diese auf europäischer Ebene definiert sind (Zertifizierung).
  14. Die Planbarkeit von Vorhaben sollte verbessert werden. Bei Commodopflichtigen Anlagen sollten die Genehmigungsvoraussetzungen klar festgelegt werden (gegebenenfalls durch Anlehnung an Regelungen in anderen Län-

---

<sup>71</sup> Ein Bonusmodell für erneuerbare Wärme sieht einen technologiespezifischen Bonus für erneuerbare Wärmetechnologien vor, welcher entweder erzeugungsbasiert oder investitionsbasiert an Erzeuger erneuerbarer Wärme gezahlt wird.

dern). Weiterhin ist darauf zu achten Nachweisvorschriften bei Genehmigungsanforderungen möglichst praktikabel festzulegen ohne die materiellen Anforderungen zu verändern (z.B. Schallemissionsprüfung bei Windenergie oder Emissionsnachweise bei Holzheizungen im Gewerbe). Bezüglich der Genehmigungspraxis bei Biogasanlagen könnten Genehmigungen nach Stoffklassen anstatt für einzelne Stoffe größere Flexibilität bewirken.

## 9 Literatur

BAFA-Richtlinie vom 14.3.2006, Veröffentlicht im Bundesanzeiger der Bundesrepublik Deutschland am 22.3.2006, Nr. 57, S. 1850<sup>^</sup>

Agence de l'Énergie (2000), "Holzhackschnitzelfeuerungsanlage mit Nahwärmenetz in Enscheringen", Pilotprojekt in Luxemburg, Projektbeschreibung

Administration des Services Techniques de l'Agiculture (2005), "Sorten- und Artenversuche für die Verwendung in Biogasanlagen", Service de la Production Vegetale

Bericht LU DIR EC/2001/77, Rapport du Grand-Duché de Luxembourg publié conformément à l'article 3.3

Bomb Christian (2005), "Opportunities and barriers for biodiesel and bioethanol in Germany, the United Kingdom and Luxembourg – Country studies and recommendations for policy makers", Thesis for the fulfilment of the Masters of Science in Environmental Management and Policy, Lund, The International Institut for Industrial Environment Economics, Sweden, September 2005

BTM Consult (2005), "Ten Year Review of the International Wind Power Industry", ISBN 87-987788-7-0

Comission of the European Communities (2006), "Green Paper – A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy", COM(2006) 105 final, Brussels, 8.3.2006

Cralle H.T. und Vietor D.M. (1989), "Solar Energy and Biomass", in Kitani O. and Hall C. W. (Hrsg): Biomass Handbook; Gordon and Breach Saina Publishers, New York, USA, 1989

Dahm Martin, Schlessler Germain (1996), "Studie zur Benutzung von Biomasse zur Energiegewinnung in Luxemburg", Diplomarbeit an der Universität Luxemburg, Departement Electrotechnique, 8. Juli 1996

Domenig M. et al. (1998), "Nicht gefährliche Abfälle in Österreich – Materialien zum Bundes-Abfallwirtschaftsplan 1998", Umweltbundesamt Wien, 1998

- 
- Dürschmidt Wolfhart, Zimmermann Gisela (2004), "Umweltpolitik – ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland", Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Referat Z III 1, Stand April 2004 (1. Auflage)
- Edelmann W. et al. (1993), "Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern", Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1993
- Edelmann und Engeli (1996), "Biogas aus festen Abfällen und Industrieabwässern", Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1996
- EurObser'ER (2005), SYSTÈMES SOLAIRES n° 168 SOLAR THERMAL BAROMETER - AUGUST 2005
- Ewringmann D. (2005), "Ausgangsdaten und Entwicklungstendenzen der Luxemburger Energie- und Klimaschutzpolitik", Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln, 12. Oktober 2005
- Gangl Christian (2004), „Ethanolherzeugung aus stärkehaltigen Rohstoffen für Treibstoffzwecke“, Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Institut für Agrar- und Forstökonomie, September 2004
- Haas Reinhard, Biermayr Peter, Kranzl Lukas (2006), "Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energieträger – wirtschaftliche Bedeutung für Österreich", Studie der Technischen Universität Wien, Energy Economics Group, im Auftrag der Österreichischen Wirtschaftskammer, Jänner 2006
- Hantsch et al. (2003), "Wirtschaftsfaktor Windenergie in Österreich", Berichte aus Energie- u. Umweltforschung 11/2003, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
- Hulpke (2000), "Römpp-Lexikon Umwelt", Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2000, 2. Auflage
- IEA (2004), "Energy Policies of IEA Countries – Luxembourg", International Energy Agency, 2004 Review
- IGLux, OEKO-BUREAU (2003), "Energiepflanzen-Monovergärung, Potenzial- und Machbarkeitsstudie", im Auftrag des Umweltministeriums Luxemburg, Rume- lange, Juni 2003

- Jonas A., Görtler F. (1997), "Energie aus Holz", Niederösterreichische Landwirtschaftskammer, 7. Auflage, 1997
- Jonas et al. (2005), "Energie aus Holz", Niederösterreichische Landwirtschaftskammer, im Eigenverlag, 9. überarbeitete Auflage 2005
- Jungmeier G. und Padinger R. (1995), "Bewertung der Biogastechnik", Joanneum Research, Graz 1995
- Kaltschmitt Martin, Wiese Andreas (1997), "Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte", Springer Verlag, 2. Auflage, ISBN: 3-540-63219-0
- Kaltschmitt Martin, Hartmann H. (2001), "Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren", Springer Verlag, ISBN: 3-540-64853-4
- Kaltschmitt Martin et al. (2005), "Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse", Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW, Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen (Wuppertal Institut)
- Krieg A. (1998), "Verwertung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen", in Graf, W.: Biogas für Österreich, BM für Land- u. Forstwirtschaft, Landjugendreferat; BM für Umwelt, Jugend u. Familie, Wien, 1998, 3. Auflage
- Lerch G. (1991), "Pflanzenökologie", Akademie, Berlin, 1991
- Landwirtschaftsministerium (2005), "Die luxemburgische Landwirtschaft in Zahlen", Ministere de l'Agriculture, de la Viticulture et du Developpement rural
- MinEcon (2005): Ministere de l'Economie et du Commerce exterieur (2005), "Rapport d'activité 2004", Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, Mars 2005
- Ministerium für Landwirtschaft, Weinbau und Entwicklung des ländlichen Raumes (2005), "Steckbrief des Luxemburger Waldes", Forstverwaltung, Abteilung für Forsteinrichtung und forstliche Betriebswirtschaft 2005
- Ministère de l'Environnement (2004), "Nationaler Allokationsplan für Luxemburg", Luxemburg, den 6. April 2004

- 
- Neubarth J., Kaltschmitt M. (2000), "Erneuerbare Energien in Österreich", Springer Verlag
- Raab J. (2005), "Monitoring der Belieferung der CEGEDEL S.A. mit sauberem Strom durch die Greenpeace energy eG", Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Aachen, 21.4.2005
- Ragwitz Mario, Huber Claus, Resch Gustav, White Sara (2003), "Green-X – Dynamic cost-resource curves", Work Package 1 of the project Deriving Optimal Promotion Strategies for Increasing the Share of RES-E in a Dynamic European Electricity Market, August 2003
- Ragwitz et al. (2005), "FORRES 2020: Analysis of the renewable energy's evolution up to 2020", Final Report of the research project, EC, Energy and Transport DG, under tender no. TREN/D2/10-2002
- Rondeux Jaques et al. (2000), "La foret luxembourgeoise en chiffres", Ministere de l'Agriculture, de la Viticulture et du Developpement Rural, Administration des Eaux et Forets, Faculte Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux
- Scheuren J. J. (1998), "Modèle Luxembourgeois de l'Electricité", Bericht zum Luxemburger Strommodell basierend auf den Resultaten des Forschungsprojektes MEN/IST/97/001, l'Association Luxembourgeoise des Ingénieurs, Architectes et Industriels
- Schmitt Bianca, Jung Patrick (2003), "Ganzheitliche Betrachtung der energetischen Holznutzung in Luxemburg", Centre de Recherche Public Henri Tudor, Centre de Ressources des Technologies pour L Environment, Agence de l'Energie
- STATEC (2005), "Le recensement agricole 2004", Buletin du STATEC 2-2005, Aspects de l'agriculture en 2004
- Stiebel-Eltron (1991), "Warmes Wohnen mit Umweltenergie; Wärmepumpenanlagen, Planung und Installation" Eigenverlag, 1991
- Turmes Claude, Leprich Uwe (2005), "Energie fir d'Zukunft – Wirtschaftliche Entwicklung sichern, Umwelt- und Sozialstandards erhalten", Expertenbericht zur Öffnung des Strom- und Gasmarktes in Luxemburg, Luxemburg/Saarbrücken Juli 2005

Umwelt und Natur (2005), „Mit alten Frittierfetten fossile Treibstoffe einsparen“, Artikel vom 20. Oktober 2005

Voogt Monique, Coenraads Rogier (2004), “FORRES 2020: Analysis of the renewable energy’s evolution up to 2020“, Draft Country Report Luxembourg, ECOFYS, March 2004

## 10 Anhang I - Einheiten

### Vielfache und Teile von Einheiten

Tabelle 10-1: Vielfache und Teile von Einheiten; Quelle: DIN 1301

Vielfache			Teile		
da	Deka	$10^1$	d	dezi	$10^{-1}$
h	hekto	$10^2$	c	centi	$10^{-2}$
k	kilo	$10^3$	m	milli	$10^{-3}$
M	Mega	$10^6$	$\mu$	mikro	$10^{-6}$
G	Giga	$10^9$	n	nano	$10^{-9}$
T	Tera	$10^{12}$	p	piko	$10^{-12}$
P	Peta	$10^{15}$	f	femto	$10^{-15}$
E	Exa	$10^{18}$	a	atto	$10^{-18}$

### Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten

Mit der in Tabelle 10-2 dokumentierten Matrix von Umrechnungsfaktoren lassen sich alle im weiteren verwendeten energetischen Einheiten in die jeweils anderen Einheiten umrechnen. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete energetische Standardeinheit sind Vielfache der Wattstunde (Wh).

Tabelle 10-2: Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten

Einheit	MJ	kWh	kg SKE	kg ÖE	Mcal
MJ	1	0,278	0,034	0,024	0,239
kWh	3,6	1	0,123	0,0859	0,86
kg SKE	29,31	8,14	1	0,7	7,0
kg ÖE	41,91	11,63	1,43	1	10,1
Mcal	4,187	1,163	0,143	0,1	1

## 11 Anhang II - Biogas Direkteinspeisung

Biogas stellt als Erneuerbarer Energieträger eine Komponente zur Errichtung nachhaltiger Energiesysteme dar. Die Einspeisung von Biogas in das bestehende Erdgasnetz ist dabei ein möglicher Zugang zur Verteilung und Nutzung von Biogas. Aus der Biogas-Einspeisung ergibt sich ein zusätzlicher technischer und damit finanzieller Aufwand im Bereich der Gasaufbereitung auf Erdgasqualität und der Einspeisung selbst. Die Biogasproduktion zeigt allgemein eine deutliche Kostendegression bei höheren Anlagenleistungen wobei die größte Reduktion von Kosten beim Übergang von 50 m<sup>3</sup>/h auf 250 m<sup>3</sup>/h Anlagen auftritt. Die spezifisch billigste Art der Biogaseinspeisung ist durch die Güllevergärung, kombiniert mit dem DWW-Aufbereitungsverfahren gegeben, wobei sich die spezifischen Kosten des eingespeisten Produktgases bei 500 m<sup>3</sup>/h Anlagen auf 4,8 Cent/kWh belaufen. Bei kleinen Anlagenleistungen (50 m<sup>3</sup>/h) steigen die spezifischen Kosten des eingespeisten Produktgases je nach Substrat und Aufbereitungstechnologie bis auf 16,5 Cent/kWh.

### Einleitung

Biogas ist aus Gründen der großen Rohstoffpotentiale (vergasungsfähiger Biomasse) und der Speicherbarkeit dieser Ressourcen interessant. Der historische Ansatz der Vergasung von Rückständen wie Gülle oder Bioabfall kann in Hinkunft durch den Einsatz von Energiepflanzen oder der Vergasung von fester Biomasse wie Holz wesentlich erweitert werden. Der technologische Ansatz der Biogaseinspeisung eröffnet zusätzlich die Möglichkeit, räumlich weiter entfernte Verbraucher zu versorgen.

Das für die Biogasproduktion geeignete Biomassepotential setzt sich prinzipiell aus Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen (Rest- u. Abfallholz, Stroh u. organische Abfälle) und Energiepflanzen (Energiegras, Feldfrüchte,...) zusammen. Dabei müssen diese Stoffe in der Regel verschiedene Umwandlungsschritte durchlaufen, um für die Energieerzeugung eingesetzt werden zu können (Häckseln, Vergären, Vergasen,...), wobei Umwandlungsverluste auftreten. Zusätzlich kommt eine Stoffkonkurrenz innerhalb der energetischen Nutzungsmöglichkeiten (unterschiedliche Technologien) aber auch in Hinblick auf eine direkte stoffliche Nutzung zum Tragen (z.B. Papier- u. Bauindustrie, Landwirtschaft).

Beim Anbau von Energiepflanzen kann für mittlere Verhältnisse (in Deutschland) eine Sekundärenergieausbeute von 15000 bis 17500 kWh/(a\*ha) erwartet werden. Die Wachstumsperspektiven für das Biomassepotential sind von der Entwicklung der Anbaufläche für Energiepflanzen (variabel) und vom Aufkommen von Abfall- u. Reststoffen (stagnierend bis rückläufig) abhängig. Eine fortlaufende Produktivitäts-

steigerung der eingesetzten Energiepflanzen kann mit ca. 2 % pro Jahr angenommen werden (Fortschreibung der historischen Entwicklung).

### Technologische Umsetzung und typische Erträge

Typische Anlagen in Deutschland sind in Tabelle 11-1 zusammengefasst. Der Energiebedarf der Anlagen selbst (z.B. Beheizung des Fermenters) wird mittels Biogas abgedeckt und schlägt sich in der Differenz von Biogas-Produktion und Nutzbarem Biogas nieder. Die Anlagen mit 500 m<sup>3</sup>/h können aus heutiger Sicht als Kapazitätsobergrenze angesehen werden. Bei Gülleanlagen kommen diesbezüglich nur noch wenige Betriebe in Frage, bei Nawaro-Anlagen ist eine Grenze durch die Transportlogistik der Rohstoffe gegeben.

Tabelle 11-1: Modell-Biogasanlagen in Deutschland

Kürzel	Bezeichnung	Biogas-Produktion	Nutzbares Biogas	Rohstoffbedarf
		m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	t/d
BG 50 G	Gülleanlage 50 m <sup>3</sup> /h	58	50	Gülle: 31,5 Nawaro: 3,3
BG 250 G	Gülleanlage 250 m <sup>3</sup> /h	290	250	Gülle: 158 Nawaro: 17
BG 500 G	Gülleanlage 500 m <sup>3</sup> /h	580	500	Gülle: 315 Nawaro: 33
BG 50 N	Nawaro-Anlage 50 m <sup>3</sup> /h	56	50	Nawaro: 7,1 Gülle: 0,8
BG 250 N	Nawaro-Anlage 250 m <sup>3</sup> /h	280	250	Nawaro: 36 Gülle: 4
BG 500 N	Nawaro-Anlage 500 m <sup>3</sup> /h	560	500	Nawaro: 71 Gülle: 8
BG 500 B	Siedlungs-Abfälle-Anlage	582	500	Biotonne: 140

Quelle: Wuppertal Institut (2005)

Rohbiogas aus landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen besteht aus Methan (CH<sub>4</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und ist wasserdampfgesättigt. Je nach Art des Fermenters ist auch ein Anteil von Luft und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) enthalten. Insbesondere für die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz ist eine Aufbereitung von Rohbiogas zu Produktgas erforderlich. Dies geschieht mittels Entschwefelung, Trocknung und CO<sub>2</sub>-Abtrennung. Die Art der Biogasaufbereitung ist von der konkreten Gaszusammensetzung abhängig und muss an die konkreten Anforderungen angepasst werden.

### **Techniken für die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz**

Für die Einspeisung in das Erdgasnetz muss der Systemdruck der Aufbereitungsanlage (typisch 5-8 bar) höher als der Leitungsdruck sein, was bei lokalen Netzen oder Verteilnetzen in der Regel der Fall ist.

Eine Gasdruckregel- und Mengemessanlage ist für die Druckanpassung und für die Messung des Gas-Mengenstroms verantwortlich. Eine Gasbeschaffenheitsmessung misst (und dokumentiert) die wesentlichen Gaseigenschaften wie Brennwert, Heizwert, chemische Zusammensetzung und Taupunkt. Gase, die in die öffentliche Gasversorgung gelangen müssen darüber hinaus odorisiert werden (d.h. mit Geruchsstoffen versetzt) um eine Gefährdung von Anwendern zu vermeiden. Unter Umständen ist die Errichtung eines Tagesspeichers für das produzierte Biogas erforderlich, um ein gewünschtes Einspeiseprofil zu erreichen.

### **Erzeugung von Methan aus der Biomassevergasung**

Ein weiterer Ansatz zur Produktion von Biogas ist die Vergasung fester Biomasse zu Synthesegas. Es handelt sich dabei um eine thermo-chemische Stoffumwandlung der festen Biomasse bei Temperaturen zwischen 600 und 900 °C. Hierbei stellt das Wirbelschichtprinzip den Stand der Technik dar (Demonstrationsanlagen in Österreich und Schweden)

### **Kosten der Gaserzeugung**

Die spezifischen Kosten der Gaserzeugung und –Einspeisung sind in Tabelle 11-2 zusammengefasst. Deutlich ersichtlich ist die Kostendegression bei höheren Anlagenleistungen. Die spezifisch billigste Art der Biogaseinspeisung ist durch die Güllevergärung kombiniert mit dem DWW-Aufbereitungsverfahren gegeben, wobei sich die spezifischen Kosten des eingespeisten Produktgases bei 500 m<sup>3</sup>/h Anlagen auf 4,78 Cent/kWh belaufen.

Tabelle 11-2: Spezifische Kosten der Rohgaserzeugung nach Anlagentyp

Kürzel	Bezeichnung	Spezifische Kosten		
		Rohgas	Produktgas- einspeisung nach DWW <sup>72</sup> total	Produktgas- einspeisung nach PSA <sup>73</sup> total
		ct/kWh <sub>hi</sub>	ct/kWh <sub>hi</sub>	ct/kWh <sub>hi</sub>
BG 50 G	Gülleanlage 50 m <sup>3</sup> /h	5,20	13,22	12,24
BG 250 G	Gülleanlage 250 m <sup>3</sup> /h	3,65	5,95	6,05
BG 500 G	Gülleanlage 500 m <sup>3</sup> /h	3,32	4,87	5,00
BG 50 N	Nawaro-Anlage 50 m <sup>3</sup> /h	7,91	16,47	15,69
BG 250 N	Nawaro-Anlage 250 m <sup>3</sup> /h	5,84	8,31	8,44
BG 500 N	Nawaro-Anlage 500 m <sup>3</sup> /h	5,67	7,33	7,54
BG 500 B	Siedlungs-Abfälle- Anlage	4,83	6,26	6,43
Holz-Vg 6250 <sup>74</sup>	Holzvergaser 6250 m <sup>3</sup> /h	3,77	6,11	-

Quelle: Wuppertal Institut (2005)

72 (DWW) Druckwasserwäsche

73 (PSA) Druckwechseladsorption

74 Aufgrund der Leistungsgröße und Verfahrenstechnik nur bedingt mit Fermentationsanlagen vergleichbar.

# Energieperspektiven

Szenarien zum zukünftigen Energiebedarf des Wohngebäudeparks Luxemburgs

## Luxemburg 2010 - 2070



**Energieinstitut Vorarlberg**  
**Vallentin + Reichmann Architekten**

## **Impressum**

### **Energieperspektiven Luxemburg 2010 - 2070**

#### **Szenarien zum künftigen Energiebedarf des Wohngebäudeparks Luxemburgs**

im Auftrag des  
Ministeriums für Wirtschaft Luxemburg  
Generaldirektion Energie  
Luxemburg

Bearbeitung:  
Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn (A)  
Vallentin+Reichmann Architekten, München (D)

Verfasser:  
Martin Ploss, Energieinstitut Vorarlberg  
Tobias Hatt, Energieinstitut Vorarlberg  
Rainer Vallentin, Vallentin+Reichmann  
Michaela Kern, Vallentin+Reichmann

Umschlagsgestaltung:  
Michael Lang, Grafiker, Erding (D)

Grafiken und Fotos: Energieinstitut Vorarlberg und  
Vallentin+Reichmann Architekten  
(andere Fotografen sind direkt bei den Abbildungen genannt)

Das Urheberrecht liegt bei den Autoren.

Energieinstitut Vorarlberg und Vallentin + Reichmann Architekten

## Energieperspektiven Luxemburg 2010 - 2070

Szenarien zum zukünftigen Energiebedarf des Wohngebäudeparks Luxemburgs



## Vorbemerkungen

Die „Energieperspektiven Luxemburg“ verfolgen das Ziel, über einen Szenarienvergleich wichtige Aussagen zur künftigen Entwicklung des Energiebedarfs des Wohngebäudeparks von Luxemburg zu machen. Nachdem es sich um ein träges System handelt, wurde der Betrachtungszeitraum mit 2010-2070 so gewählt, dass er wenigstens einer Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsperiode entspricht.

Im einführenden Kapitel, das zugleich eine Kurzfassung der Studie darstellt, werden ausgehend vom energiepolitischen Rahmen die Ziele der Studie umrissen um anschließend die Prämissen und die Methodik in knapper Form zu erläutern. Im Rahmen dieser Kurzfassung werden bereits zentrale Ergebnisse und die Handlungsempfehlungen genannt.

Danach werden im Hauptteil der Studie die Eck- und Basisdaten erläutert, auf denen die szenariengestützte Untersuchung basiert. Nach der Beschreibung der Szenarien- und Modellbildung sowie der verwendeten Rechenverfahren werden die zentralen Ergebnisse zusammengefasst, die dann zu strategischen Fragen und Analysen überführen.

Abschließend werden in einem Sonderteil die Integration von Elektromobilität sowie deren Deckung durch den verstärkten Einsatz von PV-Anlagen in das vorhandene Modell überprüft.

Die Studie entstand in enger Kooperation zwischen dem Energieinstitut Vorarlberg in Dornbirn und Vallentin+Reichmann Architekten aus München.

Die Autoren bedanken sich bei myenergy G.I.E. für die Mitwirkung bei der Beschaffung von Daten zum Gebäudebestand sowie zu typischen und relevanten Gebäudetypen in Luxemburg.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung und zentrale Ergebnisse</b>	<b>S. 8</b>	<b>5</b>	<b>Entwicklung Heizwärmebedarf 2010 - 2070</b>	<b>S. 80</b>
1.1	Zielsetzung und Eingrenzung der Studie	S. 9	<b>6</b>	<b>Entwicklung Endenergiebedarf 2010 - 2070</b>	<b>S. 88</b>
1.2	Prämissen und methodischer Rahmen	S. 11	<b>7</b>	<b>Entwicklung Primärenergiebedarf 2010 - 2070</b>	<b>S. 94</b>
1.3	Szenariengestützte Untersuchung	S. 14	<b>8</b>	<b>Entwicklung Treibhausgasemissionen 2010 - 2070</b>	<b>S. 96</b>
1.4	Zentrale Ergebnisse	S. 19	<b>9</b>	<b>Strategische Fragen und Analysen</b>	<b>S. 100</b>
1.5	Handlungsempfehlungen	S. 27	<b>10</b>	<b>Ausbau Photovoltaikerzeugung und Elektromobilität</b>	<b>S. 102</b>
<b>2</b>	<b>Luxemburg – Energieperspektiven</b>	<b>S. 34</b>	10.1	Abschätzung des zusätzlichen Strombedarfs des Wohngebäudeparks durch das Beladen von Elektroautos	S. 102
2.1	Räumliche Struktur Luxemburgs	S. 34	10.2	Potenzialabschätzung und Ausbauszenarien für wohngebäudeintegrierte Photovoltaik	S. 106
2.2	Siedlungsentwicklung	S. 34	10.3	Abschätzung des eigengenutzten PV-Stroms – unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität	S. 112
2.3	Denkmalbestand	S. 34	<b>11</b>	<b>Literatur</b>	<b>S. 119</b>
2.4	Übersicht über die zentralen Eck- und Basisdaten	S. 36			
2.5	Klimaschutzziele in Übereinstimmung mit dem 2°C-Ziel der Pariser Klimakonferenz	S. 38			
2.6	Kostenoptimalitätsstudien zur Bestimmung der energetischen Qualitäten im Effizienz-Szenario	S. 41			
<b>3</b>	<b>Ausgangssituation und -zustand</b>	<b>S. 46</b>			
3.1	Strategische Gruppen im Hinblick auf die Bewertung der Eingriffsempfindlichkeit	S. 46			
3.2	Einteilung des Bestands in Baualterklassen	S. 47			
3.3	Bestimmung des energetischen Ausgangszustands der Gebäude	S. 47			
3.4	Wärme- und Stromversorgung	S. 50			
<b>4</b>	<b>Szenarien und Modellbildung</b>	<b>S. 52</b>			
4.1	Beschreibung der Szenarien	S. 54			
4.2	Bilanzierung in den Szenarien	S. 55			
4.3	Kohortenmodell	S. 57			
4.4	Szenarioabhängige Annahmen zu den energetischen Qualitäten der Baukomponenten im Kohortenmodell	S. 61			
4.5	Nutzungsdauern und Erneuerungszyklen	S. 64			
4.6	Definition der Bezugsfläche	S. 66			
4.7	Szenarioabhängige Modellierung der energetischen Qualitäten der Technikkomponenten im Kohortenmodell	S. 66			

## Vorwort

Der Energiebedarf des Gebäudeparks ist eine wesentliche Einflussgröße für den Ressourcenbedarf und die Treibhausgasemissionen einer Region.

Beim Wohngebäudepark handelt es sich aufgrund der langen Nutzungsdauern der baulichen und technischen Komponenten um ein sehr träges System. Erfolge lassen sich nur durch ein beharrliches und gleichzeitig konsequentes Handeln über lange Zeiträume erzielen. Das System verhält sich wie ein Dampfer, der sein Ziel nur über einen vorausschauenden und ruhigen Kurs erreicht.

Die nun vorliegende Studie soll genau dies aufzeigen: Ihr Gegenstand ist die Abbildung des zukünftigen Energiebedarfs und der klimarelevanten Emissionen der Luxemburger Wohngebäude in vier Hauptszenarien, die unterschiedliche Herangehensweisen repräsentieren. Im Mittelpunkt der Studie steht die Identifizierung einer Langfriststrategie, in der die dafür notwendigen Einzelmaßnahmen benannt und mit ihren Qualitätsanforderungen über mehrere Jahrzehnte hinweg in ihrem zeitlichen Ablauf definiert werden. So wird der Nachweis geführt, wie die energetischen Ziele Luxemburgs und die Klimaziele der Konferenz von Paris konkret erreicht werden können.

Die Untersuchung kann ferner dazu dienen, die Akteure in Luxemburg dabei zu unterstützen, Strategien und Maßnahmen zu entwickeln, die dazu geeignet sind, langfristige Klimaschutzziele im Verbrauchssektor der Wohngebäude auf möglichst wirtschaftliche Art und Weise zu erreichen. Die gewählte Vorgehensweise – der Vergleich von vier Grund- und einem Mischszenario – ermöglicht es, unterschiedliche Strategien im Hinblick auf Ihre Wirkung – die Veränderung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen – und auf ihre Wirt-

schaftlichkeit zu bewerten. Die Studie ergänzt die in den Jahren 2015/2016 in einer Workshopreihe zur Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie gewonnenen Erkenntnisse um quantitative Wirkungsabschätzungen für verschiedene Maßnahmen. Neben der Gebäuderenovierung für Gebäude mit und ohne Restriktionen aus dem Denkmalschutz wird auch der Neubau berücksichtigt.

Die Untersuchung beruht methodisch wesentlich auf der Dissertation eines der Autoren (Vallentin 2011). Alle Annahmen und Randbedingungen wurden für die Gegebenheiten in Luxemburg festgelegt. Insbesondere wurden die Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung sowie die Zusammensetzung des Gebäudeparks mit seinen typischen Bauformen, Konstruktionen und energetisch relevanten Eigenschaften der Gebäudehülle sowie das Versorgungssystemen im Modell berücksichtigt.



## 1 Einführung und zentrale Ergebnisse

Auf internationaler Ebene ist das im Dezember 2015 verabschiedete Pariser Klimaabkommen nach der Ratifizierung durch die erforderliche Zahl von UN-Mitgliedsstaaten in Kraft getreten. Statt der 55 notwendigen haben inzwischen 145 Staaten das Abkommen ratifiziert. Auch nach dem angekündigten Austritt der USA bleibt das Abkommen der zentrale Pfeiler der internationalen Klimapolitik. Das Abkommen sieht vor, Maßnahmen zu ergreifen, um den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf deutlich unter 2 Grad, möglichst auf 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Luxemburg ratifizierte das Abkommen ebenso wie die gesamte Europäische Union Ende 2016.

Auf europäischer Ebene wurden zur Konkretisierung des schon länger definierten Langfristziels einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bis 2050 um 80-95% gegenüber dem Niveau von 1990 neue Zwischenziele für 2030 festgelegt. Die EU verfolgt im Rahmen ihrer Klima- und Energiepolitik bis 2030 die folgenden Hauptziele:

- Senkung der Treibhausgasemissionen um mindestens 40% gegenüber dem Stand von 1990
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger auf mindestens 27%
- Steigerung der Energieeffizienz um mindestens 27%

Dieser Rahmen wurde im Oktober 2014 von den EU-Staats- und Regierungschefs angenommen und baut auf dem Klima- und Energiepaket 2020 auf. Die o.g. Reduktionsziele lassen sich nicht direkt auf einzelne Länder oder Sektoren beziehen. So wurde zunächst das EU-Treibhausgas-Einsparziel für die nicht unter den Emissionshandel fallenden Verbraucher auf 30% festgelegt. Aus diesem Wert wurden in Abhängigkeit von der Wirtschaftskraft staaten-spezifische Einsparziele fest-

gelegt. Für Luxemburg liegt der Zielwert bei einer Einsparung von 40% gegenüber 1990.

Als Folge der dargestellten Konkretisierung internationaler und europäischer Ziele hat die Diskussion um den richtigen Weg zur Verwirklichung der kombinierten Energiestrategien (Effizienzsteigerung und Dekarbonisierung) in vielen Mitgliedsstaaten an politischer Bedeutung gewonnen.

In Luxemburg wie in den übrigen Mitgliedsstaaten gilt es, aufbauend auf den EU-Zielen für 2020 für alle Sektoren Mittel- und Langfriststrategien mit Zielen und Maßnahmen für den Zeitraum bis 2030 und darüber hinaus zu definieren.

Für den Gebäudebereich legt die Energieeffizienz-Richtlinie EED in Artikel 4 fest, dass die nationalen Langfriststrategien die folgenden Elemente enthalten sollen:

- Überblick über den nationalen Gebäudepark auf der Basis statistischer Daten
- Identifikation wirtschaftlicher Ansätze zur energetischen Sanierung mit Differenzierung nach Gebäudetyp (und Klimazone)
- Strategien und Maßnahmen zur Stimulierung kostenwirksamer umfassender Sanierungen einschließlich schrittweise durchgeführter Sanierungen
- Zukunftsgerichtete Perspektive, um Investitionsentscheidungen von Privatpersonen, der Bauwirtschaft und Finanzinstituten in Richtung Sanierung zu lenken
- Abschätzung der erreichbaren Einsparungen und sonstiger Vorteile

Ein erster Überblick über den nationalen Gebäudepark und eine erste Grobabschätzung der bis 2020 erreichbaren Ein-

sparungen wurde im Dritten Nationalen Energieeffizienz-Aktionsplan Luxemburg NEEAP (MdE 2014) durchgeführt, in dessen Anhang eine Gebäuderenovierungsstrategie beschrieben wird. Diese Strategie wurde im Rahmen eines Beteiligungsprozesses mit mehreren Stakeholder-Workshops in den Jahren 2015 und 2016 konkretisiert.

Als Grundlage für die Festlegung sektoraler Ziele für den Gebäudebereich können die derzeitigen Zwischenstände, Maßnahmenbeschreibungen und Wirkungsabschätzungen gemäß NEEAP (vgl. MdE 2014 und MdE 2017) herangezogen werden.

### 1.1 Zielsetzung und Eingrenzung der Studie

Angesichts der dargestellten Entwicklung zur Konkretisierung langfristiger Reduktionsziele verfolgt diese Studie die folgenden Aufgabenstellungen:

- Quantifizierung der Energie- und Treibhausgas-Reduktionspotenziale des Wohngebäudeparks in Luxemburg bis 2050 durch Modellierung verschiedener Entwicklungsszenarien
- Ermittlung von Grundlagen zur Beschreibung eines sektoralen Reduktionsziels für die privaten Haushalte bzw. den Wohngebäudepark bis zum Jahr 2050
- Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte bei der Bewertung der verschiedenen Szenarien

Konkret sollen hierbei vor allem die folgenden Fragen beantwortet werden:

- 1 Welche Energieeinsparungen und Reduktionen der Treibhausgas-Emissionen können mit unterschiedlichen Strategien bis 2050 erreicht werden?
- 2 Welche Energieeinsparungen und Reduktionen der THG-Emissionen werden erreicht, wenn die derzeitigen energetischen Qualitäten von Neubauten und Sanierungen unverändert beibehalten werden?

- 3 Welche Einsparungen sind möglich, wenn die Maßgabe der Wirtschaftlichkeit der Effizienzmaßnahmen beachtet wird?
- 4 Welche Rolle spielen Neubau und Sanierung für das Erreichen der genannten Einsparziele?
- 5 Inwiefern bilden Baudenkmale und der sonstige bedingt sanierbare Bestand ein Hemmnis für die Verwirklichung einer hohen Gesamteffizienz des Wohngebäudeparks?
- 6 Welche Beiträge können die Verringerung des Nutzwärmebedarfs (Heizwärme-, Warmwasser- und Strombedarf), die Effizienzsteigerungen der Wärme- und Stromversorgung und der Umstieg auf emissionsärmere bzw. erneuerbare Energieträger sowie die aktive Nutzung von Solarenergie für die anvisierten Gesamteinsparungen leisten?
- 7 Welche kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen lassen sich aus den Szenarien ableiten?
- 8 Wie beeinflusst die zu erwartende Umstellung des Verkehrssektors auf Elektromobilität die Energiebilanz des Gebäudeparks – welche Rolle spielt die Beladung der Elektro-PKW in Wohngebäuden und inwieweit kann die Stromerzeugung aus gebäudeintegrierten PV-Anlagen im Gebäude selbst oder für die Beladung von Elektro-PKW genutzt werden?
- 9 Inwieweit kann die Studie eine belastbare Grundlage für das Monitoring und die Zielerfüllung der Effizienz- Klimaschutzziele Luxemburgs für die privaten Haushalte darstellen?

Die Studie soll dazu beitragen, Entscheidungsgrundlagen zur Festlegung von Langfristzielen und Umsetzungsmaßnahmen für den Sektor der Wohngebäude zur Verfügung zu stellen. Die Untersuchung kann aber nicht auf alle Fragen, die von allgemeinem Interesse wären, eine Antwort geben. So werden z.B. eigentumspezifische Hemmnisse, Finanzierungsfragen oder die Frage einer sozialgerechten Modernisierung des Bestandes sowie einer sozialgerechten Energiepreisbildung außen vor gelassen.



## 1.2 Prämissen und methodischer Rahmen

Anhand szenariobasierter Modellrechnungen wird untersucht, mit welchen energetischen Standards und Versorgungslösungen die nationalen Ziele und die Ziele der Klimakonferenz in Paris 2015 im Wohngebäudepark von Luxemburg erreicht werden können. Hierfür ist die a-priori-Erkenntnis entscheidend, dass ein derartiges Ziel nicht in der Kurzfristspektive umsetzbar ist (vgl. Vallentin 2011, S. IV-27 und IV-155). Aufgrund der großen Trägheit handelt es sich um einen langfristigen Transformationsprozess, der alle energetisch relevanten Systeme und damit die Gebäude (Gebäudehülle mit Lüftungskonzept) und die Versorgungssysteme (Wärme- und Stromerzeugung) umfasst. Daher sind die Szenarien in einem ausreichend großen Zeitrahmen zu modellieren. Gewählt wurden hierfür 40 - 60 Jahre. Diese Zeitspanne umfasst in etwa die typischen mittleren Nutzungsdauern aller Baukomponenten. Damit ist sichergestellt, dass alle Gebäude wenigstens einen Instandsetzungszyklus durchlaufen können.

### Typologische Methode

Der Untersuchung liegt eine typologische Methode zugrunde. Damit ist gemeint, dass die Komplexität des Gebäudebestands über eine noch überschaubare Anzahl von „Repräsentanten“ abgebildet wird. Diese Typen bestehen aus einem räumlichen Gebäudemodell mit zugeordneten energetischen Eigenschaften. Sie werden schließlich zu einem Modell zusammengeführt, das den gesamten Gebäudebestand des Landes Luxemburg abbildet. Dies ermöglicht einen gewissen Abstraktionsgrad, der für eine energetisch-städtebauliche Untersuchung notwendig ist. Die o.g. „Repräsentanten“ durchleben nach ihrer Errichtung abhängig von der Nutzungsdauer der Bau- und Technikkomponenten Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen, die jeweils Anlässe für daran gekoppelte energetische Maßnahmen bilden. Die Effizienz- und Klimaschutzstrategien werden somit als fein unterscheidbare Einzelmaßnahmen nachvollziehbar. Dabei wird deren zeitliche Abfolge als langfristiger Transforma-

tionsprozess deutlich. Die energetische Qualität kann bei jedem Einzelschritt frei gewählt werden. Dies erfolgt abhängig von den spezifischen Vorgaben in den jeweiligen Szenarien.

Eine derartige Typologie kann mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden aufgestellt werden. Betrachtet man sehr große räumliche Einheiten (z.B. Luxemburg, eine Region oder eine Stadt) sind gröbere Typologien angemessen. Dies kann z.B. eine systematisch erhobene Gebäudetypologie (IWU 2003) sein oder in Form von Siedlungsstrukturtypen erfolgen. Auf der Ebene von Dörfern oder Stadtquartieren ist es jedoch sinnvoll, die gestalterischen oder funktional prägenden bzw. energetisch relevanten Spezifika des Bestandes (z.B. speziell vorgefundene Gebäude- und Nutzungsformen, Bau- und Konstruktionsweisen) individuell zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Fall wurde der Weg einer abstrakten Gebäudetypologie gewählt, die jedoch differenziert nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Eingriffsempfindlichkeiten konzipiert wurde. Hintergrund hierfür war, dass nur für eine derartige Typologie die erforderlichen Daten des Statetc zur Verfügung standen.

### Eingriffsempfindlichkeit als zentrales Thema

Für jegliche Untersuchungen von Klimaschutzstrategien im Gebäudesektor ist es entscheidend, den Bestand nicht als homogene Einheit zu interpretieren, sondern in seinen baugeschichtlichen, morphologischen und bautechnischen Unterschieden zu erfassen. Nur auf einer derartigen Basis ist es möglich, die notwendigen Differenzierungen zu treffen, die für eine baukulturell verträgliche Umsetzung notwendig sind. Hierzu wurden folgende Prämissen aufgestellt, die als wesentliche Randbedingung in der Modellbildung und bei der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung fanden. Zudem trägt dies dazu bei, auch die regionaltypischen Eigenheiten zu erfassen.

### **Einteilung des Bestands in strategische Gruppen**

Der Bestand wird in sog. strategische Gruppen eingeteilt, die sich im Hinblick auf ihre baukulturelle und gestalterische Eingriffsempfindlichkeit unterscheiden (siehe Abb. 1.3):

- A** Baudenkmale
- B** Sonstiger bedingt sanierbarer Bestand
- C** Voll sanierbarer Bestand
- D** Neubau ab 2010

Die energetischen Anforderungen an die strategischen Gruppen erfolgen in abgestufter Form. Vollumfängliche Anforderungen werden nur an den Neubau gestellt. Im Bestand wird berücksichtigt, dass baukulturelle, baupraktische und wirtschaftliche Restriktionen existieren.

### **Sonderstellung der Baudenkmale**

An Baudenkmale werden vorab keine energetischen Anforderungen gestellt und es besteht auch keine Pflicht, einen Ausgleich für die im Vergleich zum voll sanierbaren Bestand geringere Energieeffizienz zu leisten. Bauliche Maßnahmen können hier nur in enger Abstimmung mit den Denkmalschutzbehörden ausgeführt werden. Um auf der sicheren Seite zu rechnen, wurden hier energetische Verbesserungen sehr zurückhaltend festgelegt. Im Zweifel erfolgen die Einordnungen eher auf der konservativen Seite:

- Bei Baudenkmalen und im bedingt sanierbaren Bestand kommt bei schützenswerten Fassaden ein Außenwärmeschutz generell nicht in Frage.
- Im Business-as-usual- und im Effizienz-Szenario werden für diese Fälle auch keine Innendämmungen vorgesehen.
- Als verträglich ausführbare Maßnahmen an der Gebäudehülle bei Baudenkmalen und im bedingt sanierbaren Bestand kommen nur die Maßnahmen Dach- und Kellerdeckendämmung und der Austausch von Verglasungen bei Erhalt der vorhandenen Fensterrahmen in Frage.
- Aufgrund der hierbei regelmäßig auftretenden Beschränkungen (z.B. Dämmstärken, zulässiges Glasgewicht)

werden die energetischen Qualitäten im bedingt sanierbaren Bestand generell geringer angenommen als im voll sanierbaren Bestand.

### **Einteilung des Gebäudebestandes in Baualtersgruppen**

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal des Wohngebäudeparks stellen die unterschiedlichen Baualter der Bestandsgebäude und der künftigen Neubauten dar. Je nach dem Zeitpunkt der Ersterstellung weisen die Gebäude unterschiedliche Konstruktionen und energetische Eigenschaften auf. Zudem ergeben sich die Instandsetzungs- und Sanierungszyklen direkt aus dem Baualter und den mittleren Nutzungsdauern der jeweiligen Komponenten. Gemäß den Vorgaben der luxemburgischen Gebäudestatistik werden im Modell acht Baualtersklassen unterschieden (bis 1918, 1919 - 1945, 1946 - 1960, 1961 - 1970, 1971 - 1980, 1981 - 1990, 1991 - 2000 und 2001 - 2010), die sich vor allem im Hinblick auf das Wärmeschutzniveau voneinander unterscheiden. Hierfür wurden auch die Daten von Energieausweisen und aus Expertenbefragungen für die Modellbildung herangezogen.

### **Unterscheidung grundlegender Gebäudetypen**

In der Wohnflächenstatistik gemäß den Differenzierungen der luxemburgischen Statistik werden fünf grundlegende Gebäudetypen abhängig von Wohnform und Größe ausgewiesen. Differenziert wird zwischen Einfamilien- (EFH), Doppel- (DH) und Reihenhäusern (RH) sowie im Geschosswohnungsbau zwischen kleinen Mehrfamilienhäusern mit 3-10 Wohneinheiten (MFH < 10) und großen Mehrfamilienhäusern ab 10 Wohneinheiten (MFH > 10).

Diese Gliederung ist auch für die energetische Betrachtung sinnvoll, weil sich diese Typen hinsichtlich des spezifischen Hüllflächenaufwands (z.B. ausgedrückt über das A/V-Verhältnis) und die typischen Dachformen, Orientierungen und Haustechniksysteme z.T. deutlich voneinander unterscheiden.



A Baudenkmal



B Bedingt sanierbarer Bestand



C Voll sanierbarer Bestand



D Neubau ab Baujahr 2010

Abbildung 1.3  
Einteilung des Wohngebäudeparks  
in vier strategische Gruppen:  
A Baudenkmale  
B Bedingt sanierbarer Bestand  
C Voll sanierbarer Bestand  
D Neubau

Diese Gruppen unterscheiden sich vor allem im Hinblick auf die Eingriffsempfindlichkeit bei energetischen Sanierungsmaßnahmen. In den Szenarien wurden für jede dieser Gruppen differenzierte Anforderungen für die energetischen Modernisierungen im Bereich Gebäudehülle modelliert.

### **Kopplungsprinzip als Umsetzungsstrategie**

Das sog. Kopplungsprinzip besagt, dass sich Gelegenheiten für energetische Effizienzverbesserungen immer dann ergeben, wenn ein Bauteil oder eine Technikkomponente ohnehin instand zu setzen oder zu erneuern ist. Sobald z.B. der Außenputz neu zu streichen oder auszubessern ist, kann zusätzlich eine Außendämmung aufgebracht werden. Es sind aber auch andere Anlässe denkbar, z.B. Erweiterungen und Umbauten sowie Nutzungsänderungen, die immer Eingriffe in die Bausubstanz oder die Haustechnik erfordern. **Betont werden soll an dieser Stelle, dass das Motiv der Energieeinsparung oder des Klimaschutzes für sich genommen - mit wenigen noch zu benennenden Ausnahmen - nicht der Auslöser für Effizienzverbesserungen sein kann und soll.**

Dafür sprechen vor allem ökonomische Gründe: In den meisten Fällen ist nur dann eine Wirtschaftlichkeit der energetischen Maßnahme gegeben. Es fallen keine zusätzlichen Rüstkosten (z.B. Baustelleneinrichtung, Gerüst) an und der Restwert der Konstruktion wird nicht vorzeitig zerstört. Es ist aufschlussreich, dass Hausbesitzer von sich aus bereits dieser ökonomischen Vernunft folgen (vgl. Frondel et al. 2006, S. 89). Anderslautende Vorschläge kommen eher von außen, z.B. die Forderung nach Erhöhung der Sanierungsrate über 2% hinaus oder die sog. „Abrissprämie“.

### **Mittlere Nutzungsdauern**

Gemäß dem Kopplungsprinzip werden im Kohortenmodell immer dann energetische Verbesserungen durchgeführt, wenn die Nutzungszeit eines Bauteils oder einer Technikkomponente abläuft. Sie entsprechen den technischen Standzeiten und nicht den wirtschaftlichen Abschreibungszeiträumen, die i.d.R. deutlich kürzer sind. Aus der mittleren Nutzungsdauer der Komponenten lassen sich schließlich mittlere Nutzungsdauern ableiten, die bei den Baukomponenten mit 50 - 60 Jahren deutlich höher liegen als bei den Technikkomponenten, bei denen die mittlere Nutzungsdauer zwischen 15 und 25 Jahren liegt.

## **1.3 Szenariengestützte Untersuchung**

Die Untersuchung erfolgt über ein Kohortenmodell, in dem unterschiedliche Handlungsoptionen in Form von Szenarien gegenübergestellt werden. In den Szenarien können immer nur bedingte Aussagen getroffen werden, d.h. diese sind von den gewählten Randbedingungen und Annahmen abhängig.

Szenarien erzählen eine Geschichte, indem sie denkbare künftige Entwicklungen beschreiben. Dies erfolgt zumeist in idealtypischer Form, um die Szenarien klar gegeneinander abzugrenzen. Besonderer Wert wird darauf gelegt, dass die in den Szenarien dargestellten Handlungspfade in sich konsistent und plausibel modelliert sind, um innere Widersprüche und Kombinationen von Entwicklungen, die sich ausschließen (z.B. hohe Anteile Biomasseheizungen in einem gleichzeitig wenig effizienten Gebäudepark jenseits der Verfügbarkeitsgrenze der Biomasse) zu vermeiden. Anhand der späteren Auswertung der Szenarien soll schließlich geklärt werden, mit welchen Maßnahmenkombinationen die langfristigen Ziele Luxemburgs und des internationalen Klimaschutzes erreicht werden können. Hierfür wurden vier Hauptszenarien modelliert (siehe auch Tab. 1.1).

### **Status-quo-Szenario**

Im Status-quo-Szenario werden die energetischen Qualitäten (Neubau und Sanierung) auf dem Stand des Jahres 2010 „eingefroren“ und unverändert in der Zukunft fortgeführt. Die Mengenkompenten (z.B. Bevölkerung, Wohnflächen) werden jedoch, wie in den anderen Szenarien auch, weiterentwickelt. Das Status-quo-Szenario dient aus methodischer Sicht als Referenz und Eichmaßstab für die erzielten Effizienzsteigerungen und die Dekarbonisierungserfolge in den anderen Szenarien.

### **Business-as-usual-Szenario**

In diesem Szenario werden nicht nur die heute zu beobachtenden Entwicklungen weitergeführt, sondern es werden mo-

Szenario	Heizwärme / Heizung	Warmwasser	Lüftung	Haushaltsgeräte
<b>Status quo</b>	Spezifischer Nutzenergiebedarf, Heiz- und Stromstruktur sowie energetische Qualität auf dem Stand von 2010, Mengenkomponenten (z.B. Wohnflächen, Haushalte) jedoch wie in allen anderen Szenarien			
<b>Business as usual</b>	Energetische Verbesserungen orientieren sich an der bisherigen Entwicklung (z.B. Einführung RGD 2016 im Neubau, leichte Verbesserungen bei Modernisierungen), Stromerzeugung gemäß Referenzprognose (ewi/gws/prognos 2014)			
	Moderate Effizienzverbesserungen		Wärmerückgewinnung (WRG): im Bestand nur moderater Ausbau	Moderate Effizienzverbesserungen
<b>Effizienz</b>	Energetische Qualitäten 2020: Orientierung am Kostenoptimum in Neubau (RGD 2016) und bei Sanierung (EnerPhit-Standard); Ausstieg Ölheizungen bis 2060; Stromerzeugung gemäß Szenario "2011 A" (Nitsch et al. 2012)			
	Ab 2020: Energetisch gleichwertig mit Passivhaus	Wassersparende Armaturen, WW- Anschlüsse	Ab 2020: vermehrt Lüftungsanlagen mit WRG auch im Bestand	Ausstattung mit effizienten Geräten und Leuchtmitteln
<b>Effizienz Plus</b>	Wie Effizienzscenario, Berücksichtigung von absehbaren technologischen Verbesserungen bei allen Bau-und Technikkomponenten; entspricht vermutlich dem Kostenoptimum ab 2030; Ausstieg Ölheizungen 2050; Stromerzeugung gemäß "Szenario 2013" (Nitsch 2013)			
	Hocheffiziente Heizsysteme mit stark reduzierten Verteil- und Speicherverlusten	Dusch-WW-WRG Dentrale Systeme im Geschosswohnungsbau	bis 2070: Anteil von 80 % der Lüftungen mit WRG und hocheffizienten Ventilatoren	Hocheffiziente Ausstattung bei allen Elektrogeräten und integriertes Lastmanagement

Tabelle 1.1:  
Kurzcharakterisierung der vier Hauptszenarien gemäß den Hauptanwendungsfeldern Heizung, Warmwasser, Lüftung und Haushaltsgeräte.

Der Ausstieg aus den Ölheizungen bedeutet konkret, dass ca. 25 - 30 Jahre zuvor keine neue Ölheizungen mehr im Neubau und bei Instandsetzungen bzw. Erneuerungen im Bestand eingebaut werden dürfen; im Effizienz-Szenario gilt dies demnach ab spätestens 2035 und im Effizienz-Plus-Szenario spätestens ab 2025.

derate Reaktionen der Wirtschaft, Gesellschaft und Politik auf künftige Problemstellungen miteinbezogen. Die gesetzlichen Regelungen werden nur moderat verschärft. Die Stromerzeugung orientiert sich an der Referenzprognose für Strom aus Deutschland (ewi/gws/prognos 2014), in dem die aktuell in Deutschland durchgeführten und verabschiedeten Maßnahmen abgebildet sind.

### Effizienz-Szenario

In diesem Zielszenario orientieren sich die modellierten energetischen Verbesserungen an dem Kostenoptimum der Lebenszykluskosten, das in entsprechenden Studien zum Wohnbau in Luxemburg detailliert ermittelt wurde. Dies betrifft sowohl die Gebäude selbst als auch die Wärmeversorgungssysteme. Die

energetische Güte ist gleichwertig zum Passivhauskonzept, ohne hierbei die Kriterien im Einzelnen strikt einhalten zu müssen. Die Stromerzeugung wurde gemäß dem deutschen Szenario „2011 A“ (Nitsch et al. 2012) modelliert, das bis 2050 eine Reduktion der Klimagase um 80 % gegenüber 1990 anstrebt.

### Effizienz-Plus-Szenario

Neben den Maßnahmen des Effizienz-Szenarios werden hier Technologieentwicklungen miteinbezogen, die derzeit nur in Form theoretischer Studien vorliegen oder als Prototypen bzw. Sonderlösungen realisiert sind. Die Beobachtungen der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass diese Entwicklungen i.d.R. viel schneller und durchgreifender erfolgen, als zunächst vermutet. Daher besteht Grund zu der Annahme, dass

die hier beschriebenen Qualitäten und Neukomponenten tatsächlich in einigen Jahren zur Verfügung stehen und nach und nach wirtschaftlich eingesetzt werden können. Im Hinblick auf die Stromerzeugung wurde das „Szenario 2013“ (Nitsch 2013) verwendet, in dem ab 2020 Maßnahmen getroffen werden, die dazu führen, das Ziel einer nahezu vollständig erneuerbaren Energieversorgung Deutschlands bis 2060 zu erreichen.

### **Modellierung der Gebäudetypologie**

Der Wohngebäudepark Luxemburgs wird über insgesamt 70 Gebäudetypen abgebildet. Diese stellen „Repräsentanten“ dar, die die individuelle Vielfalt der Einzelgebäude bestimmten Klassen und Gruppen zuordnet. Dabei werden die charakteristischen geometrischen und energetischen Eigenschaften in aussagekräftige Mittelwerte umgeformt, die dann den späteren Berechnungen zugrundeliegen:

- Der vorhandene Gebäudebestand wird nach Baualter, Eingriffsempfindlichkeit (strategische Gruppen) und Gebäudetyp (Einfamilien, Doppel- und Reihenhäuser sowie kleine und große Mehrfamilienhäuser) in Klassen eingeteilt.
- Für den Neubau werden in 10-Jahresschritten typische Ein- und Mehrfamilienhäuser modelliert.
- Die Gebäudegeometrie, Orientierung und Dachform werden variiert, um die vorhandene bauliche Vielfalt des Wohngebäudeparks angemessen darzustellen.

### **Kohortenmodell**

Die insgesamt 70 Gebäudetypen durchlaufen im Kohortenmodell einen typischen Lebenszyklus, in dem gemäß den vorgegebenen Nutzungsdauern für alle Bau- und Technikkomponenten Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen durchgeführt werden. Wie schon das Wort „Kohorte“ ausdrückt, wird der gesamte Wohngebäudepark innerhalb des Betrachtungszeitraums im Hinblick auf die dadurch ausgelösten Veränderungen des energetischen Zustands beobachtet bzw. modellhaft abgebildet. Ein derartiges Modell hat den Vorteil, dass die komplexe Gesamtentwicklung über einen großen Zeitraum als

Aufeinanderfolge vieler individueller Einzelschritte nachvollziehbar bleibt. Damit ist es möglich, gleichzeitig die Trägheit aber auch die Dynamik des Gesamtsystems zu beschreiben. Das Modell weist ein hohes Maß an Transparenz auf, weil jeder Einzelschritt in seinen Auswirkungen auf das Gesamtsystem abgebildet wird und an jeder Stelle konkret benannt werden kann.

### **Energetische Qualitäten (Gebäudehülle und Lüftung)**

Für die Gebäudehülle (Außenwand, Fenster, Dach, Kellerdecke) und die Lüftung werden szenarioabhängig Qualitäten definiert, die immer dann zum Zuge kommen, wenn ein Neubau oder eine entsprechende energetische Sanierungsmaßnahme bei einem der 70 Gebäudetypen ansteht. Die Anforderungen werden stufenweise vom Status-quo- über das Business-as-usual- und Effizienz- bis hin zum Effizienz-Plus-Szenario immer anspruchsvoller. Zusätzlich steigen die Qualitäten im Betrachtungszeitraum allmählich an. In Tab. 1.2 sind die entsprechenden Werte für den Ausgangszustand zusammengestellt, und in Tab. 1.3 für das Effizienz-Szenario auch die Werte für die weitere Entwicklung ab 2020. Im Effizienz-Szenario orientieren sich dabei die Werte im Altbau für das Jahr 2020 am Kostenoptimum, wie er in einer aktuellen Studie für Luxemburg (vgl. MdE 2014a) berechnet wurden (siehe hierzu genauere Erläuterung in Abschnitt 2.7).

### **Energetische Qualitäten (Wärme- und Stromerzeugung)**

Analog wird bei der Wärmeerzeugung (z.B. Heizung, Warmwassererzeuger) und bei der Stromerzeugung (z.B. Kraftwerkspark inkl. Heizkraftwerke und BHKW's) verfahren. Es wurden szenarioabhängige Annahmen zum Energieträgermix und zur energetischen Qualität der Systeme zusammengestellt. Letztere wird über einfache Kennwerte ausgedrückt (z.B. Jahresnutzungsgrad der Strom- und Wärmeversorgung inkl. Erzeugung, Speicherung und Verteilung) und zeitabhängig variiert.

Ausgangszustand		U-Werte Ausgangszustand 2010 in allen Szenarien [W/m²K]							
Strategische Gruppe		Dach		Außenwand		Kellerdecke		Fenster	
Baudenkmale	EFH	1,2		1,4		0,8		2,2	
	MFH	1,6		1,8		1,0		2,2	
		bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980	bis 1980	ab 1980
Bestand	EFH	0,5 - 1,2	0,5	0,6 - 1,4	0,6	0,6 - 0,8	0,6	1,6 - 2,2	1,6
	MFH	0,6 - 1,6	0,5	0,8 - 1,8	0,6	0,7 - 1,0	0,6	1,6 - 2,2	1,6
Neubau	EFH	0,17		0,22		0,28		1,08	
	MFH	0,17		0,22		0,28		1,08	

Tabelle 1.2  
Zusammenstellung der U-Werte der Hüllflächen im Ausgangszustand 2010, differenziert nach Baudenkmalen/bedingt sanierbarem Bestandsbauten, voll sanierbarem Bestand und Neubau. Zusätzlich wird zwischen Einfamilienhäusern (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) unterschieden.

Bauteil	U-Werte Neubau inklusive Wärmebrücken-Zuschlag im Effizienz-Szenario [W/m²K]			
	2020	2030	2040	2050
Wände	0,13	0,12	0,11	0,10
Dach	0,13	0,12	0,11	0,10
Kellerdecke	0,19	0,185	0,18	0,175
Fenster	0,90 (g=0,55)	0,85 (g = 0,55)	0,80 (g = 0,55)	0,75 (g = 0,50)

Tabelle 1.3  
Zusammenstellung der U-Werte der Hüllflächen im Effizienz-Szenario in 10-Jahres-Schritten 2020 - 2050. Dargestellt sind die Werte für den Neubau (oben) und für den voll sanierbaren Bestand (unten). Es wird erkennbar, wie sich die Anforderungen allmählich in Richtung geringerer U-Werte bewegen.

Bauteil	U-Werte Sanierung inklusive Wärmebrücken-Zuschlag im Effizienz-Szenario [W/m²K]			
	2020	2030	2040	2050
Wände	0,25	0,20	0,18	0,17
Dach	0,25	0,20	0,18	0,17
Kellerdecke	0,40	0,35	0,30	0,25
Fenster	1,30 (g = 0,65)	1,20 (g = 0,65)	1,10 (g = 0,60)	1,00 (g = 0,55)

BAU 2020	Dach	Außenwand	Kellerdecke	Fenster
Baudenkmale	0,55	0,98	0,65	1,90
Bestand	0,40	0,55	0,55	1,50
Neubau	0,14	0,16	0,20	0,93

Tabelle 1.4  
Zusammenstellung der U-Werte der Hüllflächen im Jahr 2020, wie sie im Neubau bzw. bei energetischen Modernisierungen im Bestand zum Einsatz kommen.  
Oben: Business-as-usual-Szenario  
Unten: Effizienz-Plus-Szenario

Effizienz-Plus 2020	Dach	Außenwand	Kellerdecke	Fenster
Baudenkmale	0,50	0,85	0,40	1,30
Bestand	0,18	0,18	0,35	1,05
Neubau	0,11	0,11	0,18	0,80

Hinweis: die U- Werte 2020 für das Effizienz-Szenario finden sich oben in Tab. 1.3

- Haushalte
- ▲ Wohnfläche
- ◇ Bevölkerung

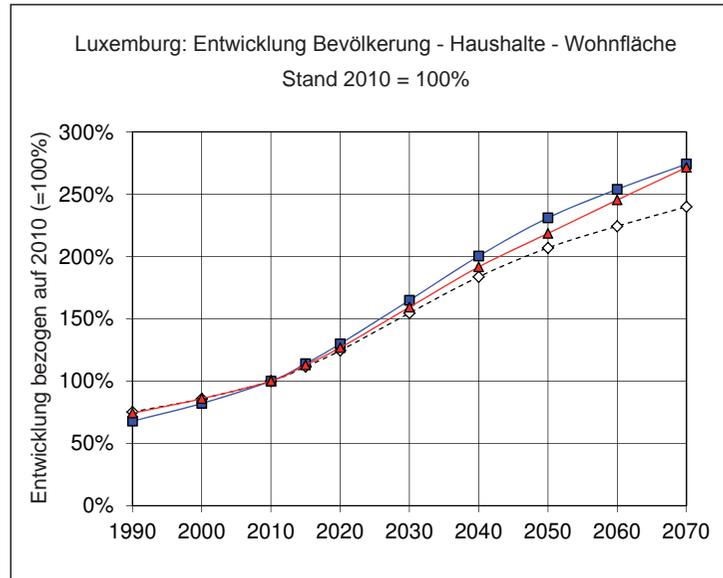


Abbildung 1.4  
Relative Entwicklung der Bevölkerung, der Haushalte und der Wohnflächen in Bezug zum Ausgangsjahr der Untersuchung 2010 (= 100%).  
Quelle: (STATEC 2016) und eigene Berechnungen.

- Neubau MFH ab 2010
- Neubau EFH ab 2010
- Bestand MFH
- Bestand EFH
- Bedingt sanierbarer Bestand

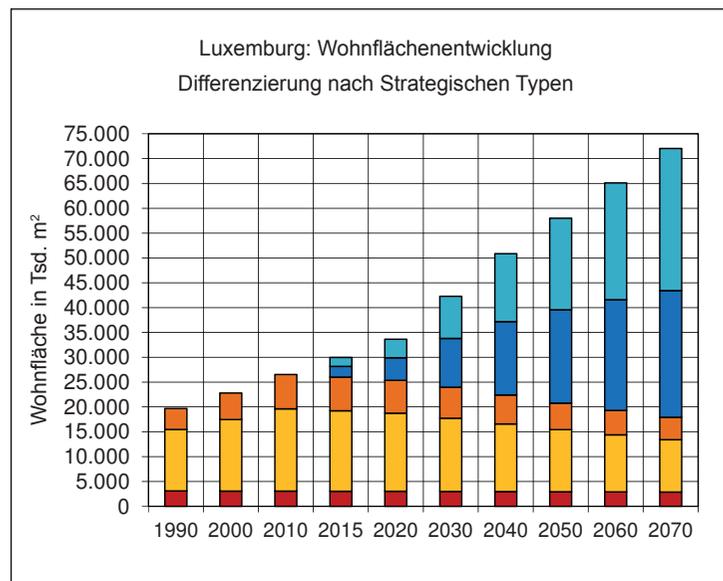


Abbildung 1.5  
Entwicklung der Wohnflächen nach strategischen Typen in Luxemburg 1990 - 2070. Der Abgang im Bestand ist an den kleiner werdenden Balken (rot, gelb, orange) erkennbar. Er wurde in allen Szenarien mit 0,10 % p.a. bei den Baudenkmalen und sonst mit 0,85 % p.a. angenommen (vgl. MdE 2014).

### Wichtige Eck- und Rahmendaten

Als MengenkompONENTEN in den Szenarien sind vor allem die Bevölkerung, die Zahl der Haushalte und die Wohnflächen wirksam:

- Die Bevölkerung Luxemburgs wird auch weiterhin sehr dynamisch wachsen. Den Szenarien liegt die Annahme eines Bevölkerungswachstums von 567.000 im Jahr 2015 auf 1.051.255 zugrunde, dies entspricht einer Zunahme um 85%. Wählt man das Jahr 2010 mit 508.000 Einwohnern als Referenz, so entspricht die Zunahme bis 2050 einem Wachstum auf 207% des Ausgangswertes.
- Die Wohnfläche wird sogar noch etwas stärker wachsen, als die Bevölkerung. In den Szenarien wird unterstellt, dass die pro-Kopf-Wohnfläche aufgrund des anhaltenden Trends zu geringeren Bewohnerzahlen pro Wohnung bis 2050 weiterhin leicht steigt. Gegenüber dem Jahr 2010 mit knapp 27 Mio m<sup>2</sup> erhöht sich die Wohnfläche im Jahr 2050 auf knapp 59 Mio m<sup>2</sup>. Dies entspricht einem Zuwachs auf 219% des Ausgangswertes.

Wie aus Abb. 1.4 ersichtlich, ergibt sich für alle drei Parameter ein stetiges Wachstum über den gesamten Betrachtungszeitraum. Gegenüber dem Stand 2010 verdoppelt sich die Bevölkerungszahl bis 2050, während die Haushalte und Wohnflächen in diesem Zeitraum sogar noch etwas mehr zunehmen. Diese Zuwächse sind bei der Auswertung der Ergebnisse jeweils mitzudenken. Sie stellen einen bedeutenden „Antrieb“ für den Energiebedarf und die resultierenden Emissionen dar.

Wegen des im europäischen Vergleich sehr starken Bevölkerungswachstums und der damit verbundenen Zunahme der Wohnflächen werden die Hauptergebnisse der Studie, z.B. der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen nicht nur als Absolutzahlen dargestellt, sondern auch als pro-Kopf-Werte. Diese Art der Darstellung ermöglicht es auch, die in den Szenarien ermittelten Ergebnisse mit den Anforderungen zu vergleichen, die sich aus den internationalen Klimaschutz-

zielen oder anderen Bewertungssystemen ergeben, die anstelle der Nutzfläche die Person als Bezugsgröße verwenden (z.B. Konzept der 2000-Watt-Gesellschaft).

Bei der Wohnflächenentwicklung ist ein zusätzlicher Aspekt zu beachten. Durch den Abriss und die Umnutzungen von Bestandgebäuden kommt es zu einem regelmäßigen Abgang, der wie auch der zusätzliche Wohnflächenbedarf durch Neubauten gedeckt werden muss. Dies wird in Abb. 1.5 an den sinkenden Wohnflächen aller Bestandsgebäude ab dem Jahr 2010 sichtbar.

Weitere Randbedingungen und Spezifika des derzeitigen Luxemburger Wohngebäudebestandes sind (Ploss 2015):

- Obwohl der derzeitige Gebäudebestand vergleichsweise jung ist, unterliegen viele Gebäude dem Denkmalschutz. In den nächsten Jahren wird sich der Umfang dieser Gruppe noch erheblich erweitern.
- Der Anteil der Wohneinheiten in Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern ist hoch, ebenso der Anteil eigengenutzter Wohneinheiten.
- Der Anteil von Mietwohnungen liegt vergleichsweise niedrig, insbesondere der soziale Wohnungsbau ist mit knapp 4% nur ein kleines Segment am Wohnungsmarkt.
- Der Anteil von Mehrfamilienhäusern im Besitz von Eigentümergemeinschaften ist hoch.
- Die durchschnittliche pro-Kopf-Wohnfläche ist mit etwa 53m<sup>2</sup> im internationalen Vergleich überdurchschnittlich hoch, dies vor allem deshalb, weil die durchschnittliche Bewohnerzahl pro Wohneinheit weiterhin sinkt.
- Der Anteil fossiler Energieträger beträgt im derzeitigen Wohngebäudepark etwa 89%. Der Anteil holzbeheizter Gebäude liegt bei 1,5%, der strombeheizter Gebäude bei 2,9%. Sowohl bei Holz-, als auch bei strombeheizten Gebäuden finden sich die höchsten Energieverbrauchswerte in der Altersklasse vor 1919. Daher ist zu vermuten, dass die betreffenden Heizanlagen nicht mehr modernen Standards

entsprechen. Sehr häufig ist dies mit weiteren baulichen bzw. technischen Mängeln dieser Wohnbauten verbunden, so dass hier typische Fälle für umfangreiche Modernisierungen vorliegen.

Eine wichtige Randbedingung ist auch, dass Luxemburg die Mindestanforderungen an Wohngebäude-Neubauten im Januar 2017 auf ein im europäischen Vergleich vorbildliches Niveau (in etwa Güte Passivhausstandard) verschärft hat (RGD 2016), nachdem Gebäude dieses Niveaus im Vorfeld zur Etablierung am Markt und zur Vorbereitung der Marktteilnehmer durch gezielte Förderprogramme unterstützt wurden.

Ebenfalls wichtig ist die Tatsache, dass die Abrissrate relativ hoch ist. Da detaillierte Angaben nicht vorliegen, wurde die Rate wie im NEEAP (MdE 2014) mit 0,85% p.a. und lediglich für die Gebäude mit Denkmalschutz mit 0,1% p.a. deutlich niedriger angenommen.

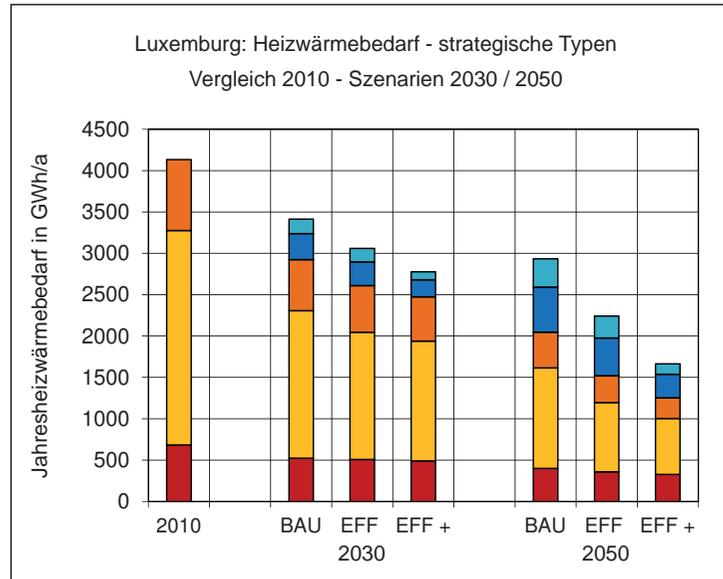
Die vergleichsweise hohe Abrissrate ist Zeichen eines hohen Siedlungsdrucks, die abgerissenen Gebäude werden meist durch höhere Gebäude ersetzt. Hohe Raten an Ersatz-Neubauten erleichtern es, Energiebedarf und Treibhausgasemissionen deutlich zu reduzieren – besonders, wenn die Anforderungen an den Neubau wie in Luxemburg ambitioniert festgelegt sind.

#### 1.4 Zentrale Ergebnisse

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der Studie aufgeführt, die als Grundlage für die in Kapitel 1.5 zusammengefassten Handlungsempfehlungen dienen. Der Fokus liegt auf dem Vergleich zwischen den Ergebnissen der Szenarien und den Effizienzzielen der EU bzw. Luxemburgs sowie den verbindlichen Klimaschutzzielen der Klimakonferenz in Paris 2015.

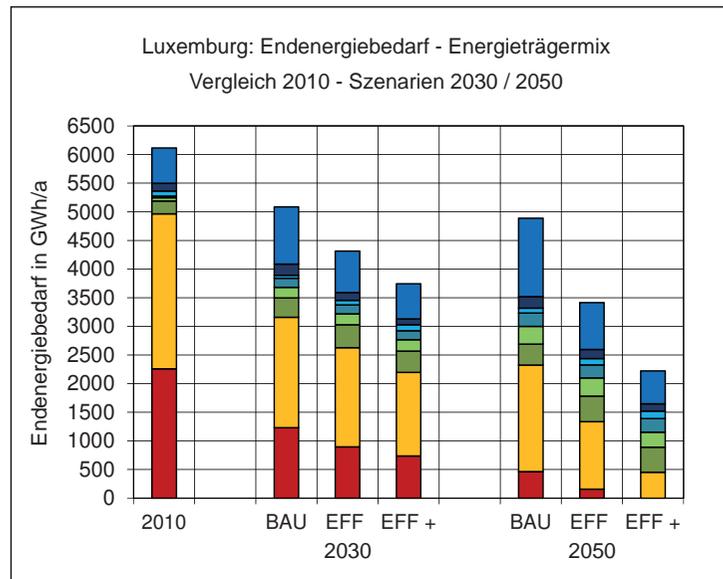
- Neubau MFH ab 2010
- Neubau EFH ab 2010
- Bestand MFH
- Bestand EFH
- Bedingt sanierbarer Bestand

Abbildung 1.6  
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs in GWh/a, differenziert nach den strategischen Typen. Vergleich der Werte von 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse
- Erdgas
- Heizöl

Abbildung 1.7  
Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Energieträgern in GWh/a. Vergleich der Werte von 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).



Dem Aufbau der Studie entsprechend werden zunächst die Berechnungsergebnisse ohne Berücksichtigung des Strombedarfs der an Wohngebäuden beladenen Elektro-PKW und ohne Berücksichtigung der Erträge wohngebäudeintegrierter PV-Anlagen dargestellt.

Zusätzlich werden in einem eigenen Kapitel die Ergebnisse mit ausgeweiteter Bilanzierung, d.h. inkl. Strombedarf für Mobilität und inkl. PV-Stromerzeugung zusammengefasst.

Bei den Berechnungen wurde berücksichtigt, dass sich die zukünftigen Randbedingungen unter dem Einfluss des Klimawandels ändern werden. Unterstellt wurden Klimadaten nach IPCC Szenario A2, in dem die mittlere Jahrestemperatur in Luxemburg im Jahr 2050 um etwa 1K über dem Mittelwert der Jahre 2011-2015 liegt.

### Entwicklung des Heizwärmebedarfs

Der Heizwärmebedarf ist der wichtigste Indikator für die thermische Qualität der Gebäudehülle und der eingesetzten Lüftungsstrategien. Da in zukünftigen, fast ausschließlich regenerativen Energieversorgungssystemen die Energiebereitstellung im Winter eine zentrale Herausforderung sein wird, wird die Bedeutung des Indikators Heizwärmebedarf steigen.

Hierbei überlagern sich zwei Effekte (siehe Abb. 1.5, 1.6): Einerseits steigen die Wohnflächen im Betrachtungszeitraum kontinuierlich an, andererseits sinkt in allen Szenarien der spezifische Jahresheizwärmebedarf des Gesamtbestandes stetig, wenn auch unterschiedlich stark. Nur mit den hohen energetischen Qualitäten, wie sie in den Effizienz-szenarien zugrunde gelegt sind, gelingt eine spürbare Reduktion des gesamten Heizwärmebedarfs 2010 - 2050 von 4100 GWh/a auf 2240 bzw. 1660 GWh/a. Werden hingegen nur mittlere energetische Qualitäten eingesetzt, wie dies im Business-as-usual-Szenario (BAU) der Fall ist, wird mit 2930 GWh/a nur eine vergleichsweise geringere Minderung erreicht.

Die wesentlichen Reduktionsbeiträge werden im voll sanierbaren Bestand erzielt, während aufgrund der hohen Eingriffsempfindlichkeit der bedingt sanierbare Bestand quasi einen „Sockel“ bildet. Die Bedarfswerte der künftigen Neubauten sind von sehr großer Bedeutung. Nur so stellt der erwartete zusätzliche Wohnflächenbedarf die Effizienzstrategie nicht in Frage.

Wie der Verlauf des Gesamt-Heizwärmebedarfs zeigt, ist der Wohngebäudepark ein sehr träges System. Aufgrund der langen Nutzungsdauern der Bauteile und Haustechnikkomponenten wirken sich selbst starke Verbesserungen der energetischen Qualität wie in den Effizienz-Szenarien nur relativ langsam auf den Gesamt-Gebäudebestand aus. Diese Tatsache verdeutlicht, dass für den Gebäudesektor langfristige Orientierungs- und Zielwerte unabdingbar sind.

#### **Entwicklung des Endenergiebedarfs**

An der Entwicklung des Endenergiebedarfs kann verdeutlicht werden, wie stark die Maßnahmen zur Senkung des Heizwärmebedarfs, die Effizienzverbesserungen an den Wärmeversorgungssystemen, die Nutzung von Solarthermie und Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, sowie die Veränderung der Heizstruktur und der Energieträgerwahl für die Wärmeversorgung wirksam werden

Ein weiteres zentrales Handlungsfeld stellen alle Stromanwendungen in den Haushalten dar, die sich aus den Teilsegmenten Haushaltsstrom (z.B. „weiße Ware, Kommunikationselektronik, Beleuchtung), Hilfsenergieeinsatz (z.B. Pumpen, Antriebe, Steuerungen), Allgemeinstrom (z.B. Aufzüge, Treppenhaus- und Tiefgaragenbeleuchtung) sowie den stromgestützten Wärmeanwendungen (Raumheizung, Warmwasserbereitung) zusammensetzen. In jedem dieser Segmente können substantielle Effizienzsteigerungen realisiert werden, die je nach Szenario unterschiedlich modelliert wurden. Zusätzlich ist hier auch die künftige Einbindung der Elektromobilität, u.U. auch in Verbindung mit PV-Anlagen auf den Gebäuden ein Thema.

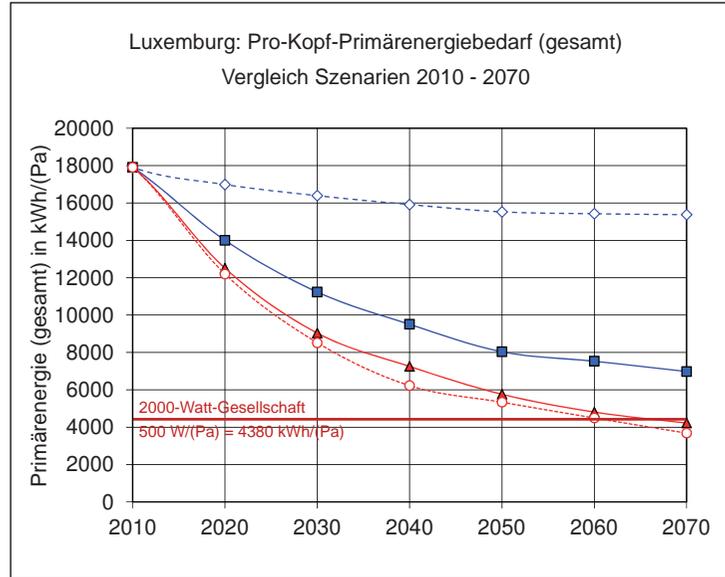
Von 1990 bis 2010 bleibt der Endenergiebedarf mit ca. 6100 GWh/a in etwa konstant. Im Status-quo-Szenario steigen die Werte anschließend stetig an. Im Business-as-usual-Szenario ergibt sich nur eine geringe Minderung der Bedarfswerte, die im Jahr 2030 bei 5090 GWh/a und im Jahr 2050 bei 4900 GWh/a zu liegen kommen. Nur in den Effizienz-szenarien kann eine deutliche Reduktion der gesamten Endenergie erreicht werden. Die entsprechenden Kennwerte betragen im Effizienz-Szenario 4310 GWh/a (2030) und 3410 GWh/a (2050) sowie im Effizienz-Plus-Szenario 3740 GWh/a (2030) und 2220 GWh/a (2050).

Durch die Effizienz- und Klimaschutzziele ergeben sich langfristig Änderungen in der Energieträgerstruktur, die abhängig von den Annahmen in den Szenarien deutliche Unterschiede im Hinblick auf den Ausbau der erneuerbaren Energien aufweisen. Während sich im Business-as-usual-Szenario dieser Wandel nur etwa im bisherigen Tempo fortsetzt, ist für das Effizienz-Plus-Szenario vor dem Hintergrund der notwendigen Dekarbonisierung ein deutlich forcierter Umstieg auf erneuerbare Energien unterstellt. Am besten erkennbar wird dies am Tempo des Ausstiegs aus dem Energieträger Öl. Während im Business-as-usual-Szenario die letzten Ölkessel erst im Jahr 2070 verschwunden sind, ist dies im Effizienz-Plus-Szenario schon 20 Jahre vorher der Fall. Unterstellt man eine durchschnittliche Kessel-Lebensdauer von 25 Jahren, so werden die letzten Ölkessel im Business-as-usual-Szenario im Jahr 2045 eingebaut, im Effizienz-Plus-Szenario endet diese Frist bereits im Jahr 2025.

Entsprechend liegen die Anteile erneuerbarer Energien 2050 im Business-as-usual-Szenario bei nur etwa 33,6 %, während im Effizienz-Szenario bereits etwa 52,7 % erreicht werden. Nur im Effizienz-Plus Szenario gelingt es mit einem Anteil von ca. 68,6 % bis 2050 weit in Richtung einer Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern vorzudringen. Dafür sind vor allem die dort erreichten Effizienzfortschritte ausschlaggebend.

- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 1.8  
Entwicklung des Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs in kWh/(Pa) in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070. Zum besseren Vergleich ist das Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft für die privaten Haushalte (500 W/(Pa) bzw. 4380 kWh/(Pa) als rote Linie eingetragen. Dieses Ziel wird in den Effizienz-szenarien nach 2060 erreicht.

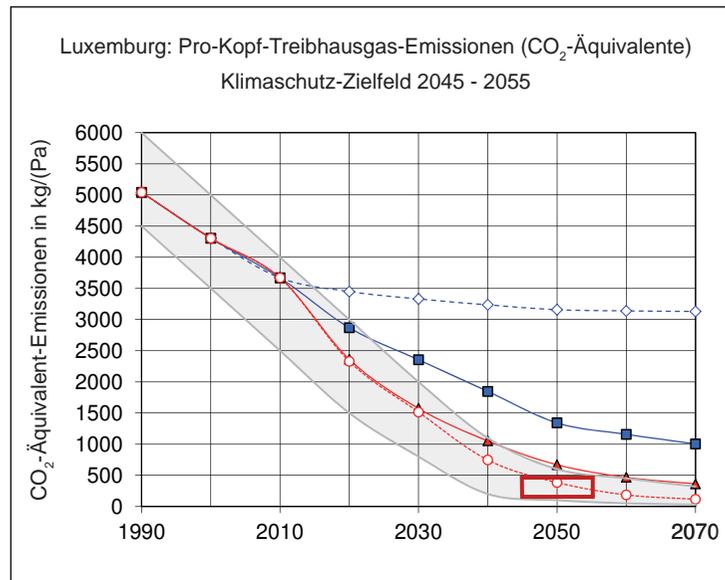


### Entwicklung des Primärenergiebedarfs

Am Primärenergiebedarf werden die gesamten Energieaufwendungen inklusive der vor- und nachgelagerten Energieketten (z.B. Exploration, Förderung, Transporte, Aufbereitung, Herstellung Kraftwerkpark bzw. Heizzentralen und Entsorgung) zusammgeführt. An den Pro-Kopf-Werten (Abb. 1.8) wird sichtbar, dass die Energieintensität des Wohngebäudeparks in allen Szenarien abnimmt, jedoch in unterschiedlichem Tempo. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Bezug zu den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft, einem gut etablierten Effizienzkonzept aus der Schweiz. Ordnet man aus Gründen der Vereinfachung den privaten Haushalten ein Viertel, d.h. 500 Watt als weltweit verträgliche Dauerleistung pro Person zu, ergibt sich ein Zielwert von 4380 kWh/(Pa). Er wird im Effizienz-Plus-Szenario ziemlich exakt 2060 erreicht. Im Effizienz-Szenario kann dieses Ziel erst 2065 eingehalten werden. Im Business-as-usual-Szenario liegt dieses Ziel jedoch zeitlich in weiter Ferne.

- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus
- Klimaschutz-Korridor
- ▭ Klimaschutz-Zielfeld

Abbildung 1.9  
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg/(Pa) CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070 und deren Bezug zum sog. Klimaschutz-Zielfeld 2045 - 2055, wie in (Kern 2016) entwickelt. Nur das Effizienz-Plus-Szenario steht in Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel der Pariser Klimakonferenz.



### Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Die klimawirksamen Emissionen des Wohngebäudeparks werden ebenfalls als Pro-Kopf-Werte dargestellt, weil diese einen belastbaren Maßstab für die globalen Klimaschutzziele bilden (Abb. 1.9). In dieser Untersuchung wird daher Bezug zu einer Studie genommen, die anhand eines Vergleichs verschiedener Gerechtigkeitsmodelle die zulässigen, mit dem 2-Grad-Ziel übereinstimmenden Pro-Kopf-Emissionen als Zielfeld definiert (vgl. Kern 2016). Für die privaten Haushalte ergeben sich personenbezogene CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen zwischen 100 und 500 kg/(P·a). Die Güte eines Klimaschutzkonzeptes zeigt sich darin, wie die Minderungspfade in das Zielfeld „eintauchen“: Das Business-as-usual-Szenario gelangt nicht einmal in die Nähe des Zielfeldes und scheidet somit als Klimaschutzpfad aus. Nur mit den Effizienz-szenarien kann der Nachweis einer mit dem 2-Grad-Ziel übereinstimmenden Entwicklung geführt werden. Ein überzeugendes Klimaschutzkonzept wird im Grunde nur im Effizienz-Plus-Szenario verwirklicht. Nur dieses taucht in das o.g. Zielfeld ein.

### Vergleich der Szenarienergebnisse mit den Zielen der EU

Abschließend sollen nun die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung mit den Zielen der EU gemäß dem aktuellen Klima- und Energiepaket abgeglichen werden (Abb. 1.10).

Dabei ist zu beachten, dass der Wohngebäudepark mit dem Sektor der privaten Haushalte auf der Endenergieebene exakt übereinstimmt. Bei der Betrachtung der Primärenergie und der Treibhausgasemissionen werden in den Szenarien die Werte für die Strom- und Fernwärmeerzeugung ebenfalls den Haushalten verursachergerecht zugeordnet, während dies in den nationalen Energiebilanzen nicht der Fall ist. Damit gelingt es, den Beitrag der privaten Haushalte zur Gesamtenergiestrategie Luxemburgs besser einordnen zu können.

Die EU-Ziele gliedern sich in drei Teilbereiche, denen jeweils unterschiedliche Zielsetzungen zugeordnet sind (in Abb. 1.10 jeweils mit Pfeilen und roten Balken visualisiert):

- Das EU-Primärenergie-Ziel wurde mit - 27 % gegenüber dem Stand von 2005 festgelegt. Es wird im Business-as-usual-Szenario deutlich verfehlt, während die Effizienz-szenarien es mit - 34% bzw. - 39% spürbar übererfüllen.
- Im Hinblick auf den Anteil erneuerbarer Energieträger wurde eine Marke von wenigstens 27 % beschlossen. Dieser Zielwert wird exakt vom Effizienz-Plus-Szenario erreicht. Im Effizienz-Szenario liegt dieser Wert mit 26 % nur knapp darunter, während das Business-as-usual-Szenario mit etwa 20 % schon einen deutlichen Abstand aufweist.
- Bezogen auf den Klimaschutz wurde als Zielsetzung eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen um 40 % gegenüber dem Stand 2005 festgelegt. Beide Effizienz-szenarien können diese Anforderung mit - 46% bzw. - 48% gut einhalten. Hingegen fällt im Business-as-usual-Szenario die Treibhausgasreduktion mit nur 15 % viel zu gering aus. Vergleicht man hierzu die vorausgegangene Bewertung gemäß der Methodik über das zulässige Globalbudget und

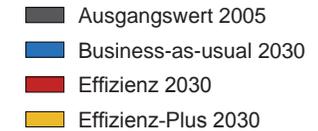
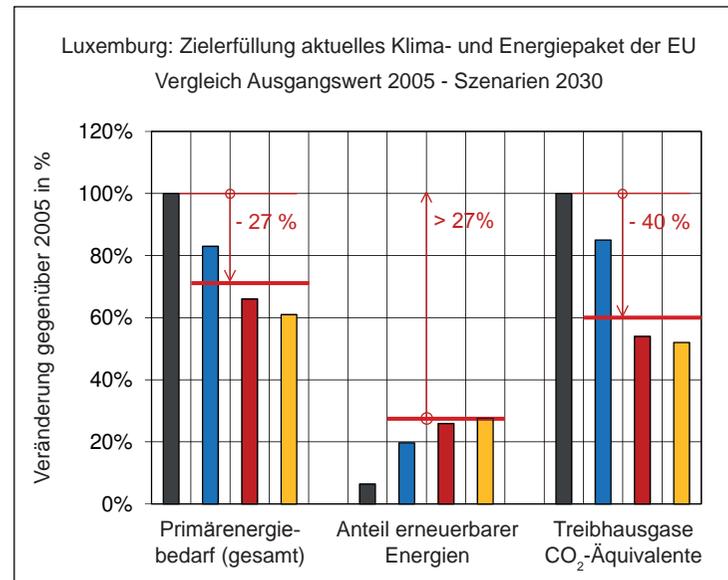


Abbildung 1.10  
Zielerfüllung der Szenarien in Bezug auf das aktuelle EU Klima- und Energiepaket für den Zeitraum 2005 - 2030. Die Ziele sind im Diagramm als rote Linien eingetragen.

die daraus abgeleiteten Zielfelder, die mit dem 2-Grad-Ziel in Übereinstimmung stehen, wird deutlich, dass die Zielsetzung der EU im Hinblick auf den Klimaschutz nicht streng genug gewählt wurde.

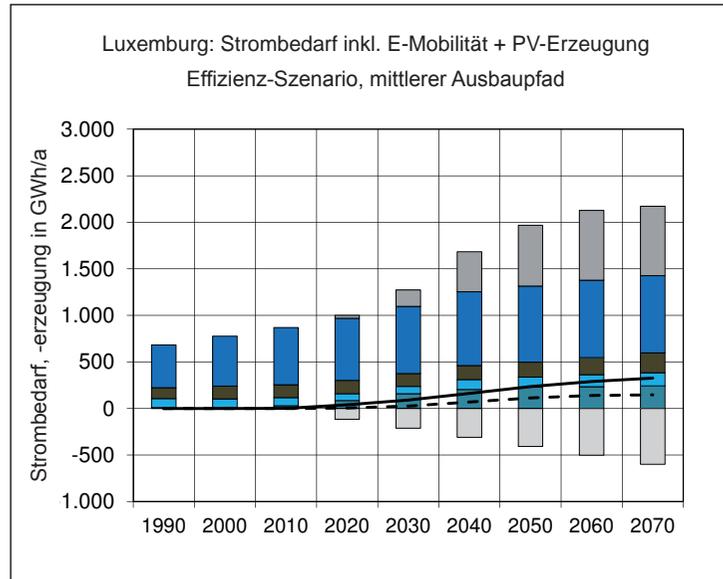
### Ergebnisse der separaten Teilstudie zu PV-Ausbau und Elektromobilität (Kapitel 10)

In den bisher dargestellten Berechnungsergebnissen wurden bedarfsseitig die Energieanwendungen Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom berücksichtigt. Die Erträge gebäudeintegrierter PV-Anlagen wurden nicht mitbilanziert, da sie vereinfachend als dezentraler Teil der allgemeinen Stromerzeugung angesehen werden – unterstellt wurde also eine Volleinspeisung ins Stromnetz.

Da absehbar ist, dass in Zukunft in immer mehr Fällen PV-Erträge im Gebäude direkt genutzt und somit der Netzbezug reduziert wird, wurde in einem zweiten Teil die Bilanzgrenze in zweierlei Hinsicht ausgeweitet: Bedarfsseitig wird zusätzlich zu

- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- PV Eigenverbrauch, Mobilität

Abbildung 1.11  
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV- Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Szenario.

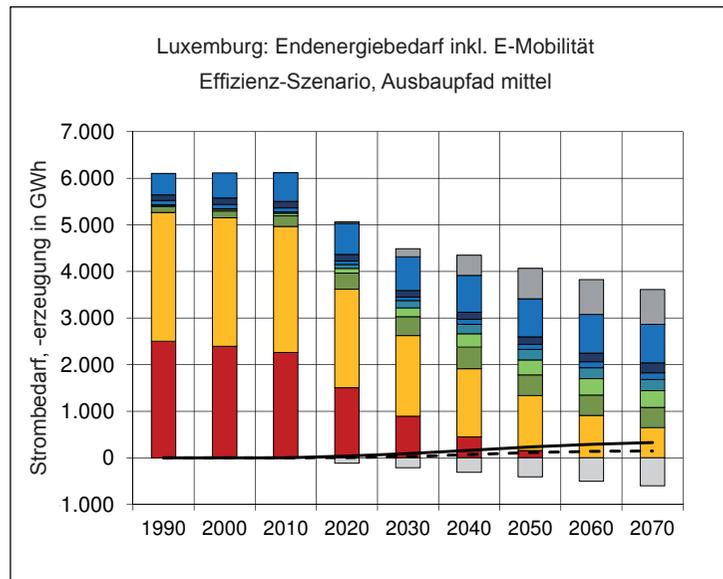


den o.g. Anwendungsarten der Strombedarf für Elektroautos mit bilanziert, die in oder an Wohngebäuden beladen werden. Erzeugungsseitig wird zusätzlich die Stromerzeugung gebäudeintegrierter PV-Anlagen berücksichtigt. Bei der Gesamt-Erzeugung der PV-Systeme wird zwischen einem eigengenutzten Anteil (für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom sowie für E-Mobilität) und einem ins Netz eingespeisten Anteil unterschieden. Die zusätzlichen Berechnungen wurden exemplarisch für das Effizienz-Szenario durchgeführt.

Da gerade zur Modellierung des Strombedarfs durch Beladung von Elektro-PKW in/an Wohngebäuden sehr viele Annahmen getroffen werden müssen, wurden die Berechnungen mit erweiterter Bilanzgrenze separat durchgeführt und werden nachfolgend auch separat dargestellt. Wegen der zum Teil großen Schwankungsbreiten in den Annahmen sind die nachfolgenden Ergebnisse zum Strombedarf durch Beladung von Elektro-PKW an Wohngebäuden und zur Eigennutzung von PV-Strom nur als grobe Abschätzungen zu verstehen.

- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse
- Erdgas
- Heizöl
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- PV Eigenverbrauch, Mobilität

Abbildung 1.12  
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität im Effizienz-Szenario 1990 - 2070



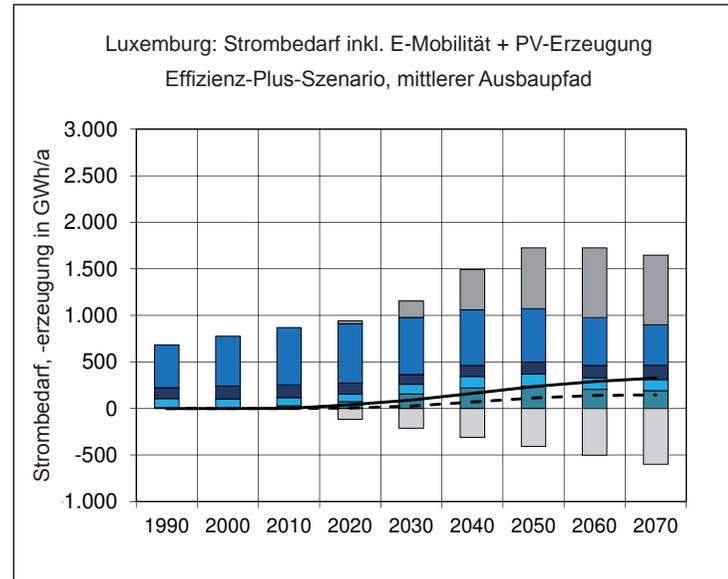
In Abbildung 1.11 ist der Strombedarf für alle Anwendungen inkl. dem Beladen von Elektro-PKW und der Erzeugung von PV-Strom im Effizienz-Szenario gegenübergestellt. Der Bedarf an anderen Energieträgern ist nicht berücksichtigt. Abgebildet ist als oberster Säulenabschnitt der Strombedarf für die Beladung von Elektro-PKW für den mittleren Elektromobilitäts-Ausbaupfad an Wohngebäuden. In diesem Pfad ist für 2020 ein Anteil von 4% Elektroautos im Jahr 2020, von 20% im Jahr 2030 und von 70% im Jahr 2050 unterstellt. Wie zu erkennen, liegt der zusätzliche Strombedarf auch im Jahr 2050 bei dem unterstellten Anteil von Ladungen am Wohngebäude (75% im Jahr 2020, sinkend auf 54% im Jahr 2050) deutlich unter dem Haushaltsstrombedarf.

Im negativen Bereich ist die Gesamt-Erzeugung der gebäudeintegrierten PV-Anlagen aufgeführt. Unterstellt ist ein stetiger Ausbau von 12 MWp pro Jahr, dies entspricht in etwa der

doppelten Ausbauleistung im Mittel der Jahre 2013 bis 2016. Es wird deutlich, dass die Gesamt-Erzeugung der PV-Anlagen auch im Jahr 2050 noch unter der notwendigen Strommenge zum Beladen der Elektro-PKW liegt, jedoch dann deutlich höher, als der Bedarf für Wärmepumpen.

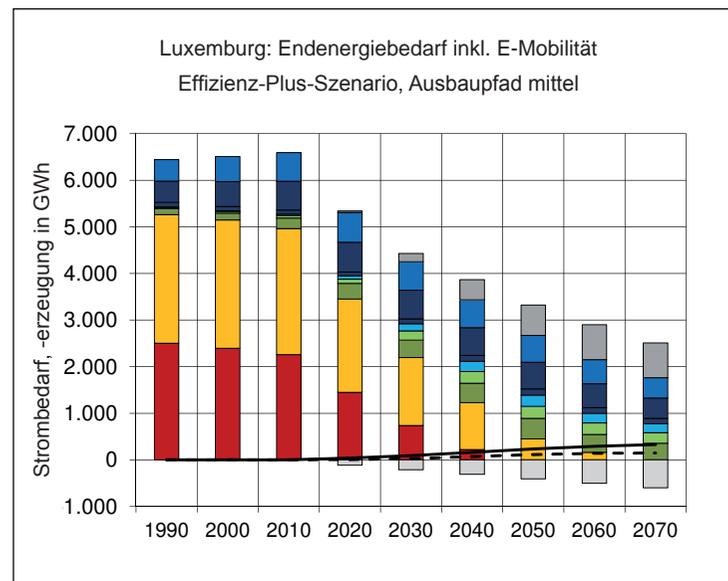
In Abbildung 1.11 wird zusätzlich dargestellt, wie hoch der Eigennutzungsanteil des PV-Stroms für die Anwendungen Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom ist und wie viel PV-Strom zusätzlich für die Beladung von Elektro-PKW genutzt werden kann. Die gestrichelte Linie beschreibt den Anteil des PV-Stroms, der für die Anwendungen Heizung, Warmwasser, - Hilfs- und Haushaltsstrom genutzt werden kann. Der Bereich zwischen der durchgezogenen und der gestrichelten Linie kennzeichnet den Teil des PV-Stroms, der zusätzlich für Beladung von Elektro-PKW genutzt werden kann. Es ist gut erkennen, dass durch die Nutzung von Elektro-PKW der Anteil des eigennutzbaren PV-Stroms deutlich ansteigt. Allerdings kann der eigengenutzte PV-Strom auch inkl. Beladung von Elektro-PKW nur einen relativ geringen Anteil des Gesamtstromverbrauchs decken. Noch geringer fällt der Anteil des eigengenutzten Stroms aus, wenn nicht nur die durch Strom gedeckten Anteile des Gesamt-Energieverbrauchs des Gebäudeparks dargestellt werden, sondern für alle Energieträger (Abb. 1.12).

Nachdem das Effizienz-Szenario aus Klimaschutzsicht nicht vollumfänglich mit den Anforderungen des 2-Grad-Ziels übereinstimmt, wurden die Kalkulationen zusätzlich für das Effizienz-Plus-Szenario durchgeführt, das gerade im Bereich der Stromnutzungen von einer viel höheren Stromeffizienz in den Wohngebäuden ausgeht (Abb. 1.13 und 1.14). Der durch PV-Erzeugung an Wohngebäuden erzielbare Anteil steigt dadurch sowohl aus Perspektive der Gesamtbilanz, als auch im Hinblick auf den eigengenutzten Anteil spürbar an. Daher ist es auch aus der Perspektive PV-Erzeugung und Elektromobilität empfehlenswert ab etwa 2030 die Gesamtanforderungen am Niveau des Effizienz-Plus-Szenarios auszurichten.



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- - - PV Eigenverbrauch, Mobilität

Abbildung 1.13  
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV- Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Plus-Szenario.



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse
- Erdgas
- Heizöl
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- - - PV Eigenverbrauch, Mobilität

Abbildung 1.14  
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität 1990 - 2070 im Effizienz-Plus-Szenario.

<b>Handlungsfeld</b>	Kurzbeschreibung der Effizienz-/Klimaschutzmaßnahmen (Nutzenergie)	Kurzbeschreibung der Effizienz-/Klimaschutzmaßnahmen (Versorgungssysteme)
<b>Raumwärme</b>	<p>Neubau ab 2020: gemäß Kostenoptimum</p> <p>Bestand ab 2020: energetische Sanierung mit Passivhauskomponenten (z.B. EnerPhit-Standard)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hochwärmegeädämmte Hüllkonstruktionen</li> <li>- Passivhausfenster</li> <li>- Luftdichte und wärmebrückenfreie Konstruktionen</li> <li>- Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zurückdrängen von Heizsystemen mit fossilen Energieträgern (Heizöl, Erdgas)</li> <li>- Ausbau von Heizsystemen mit erneuerbaren Energieträgern (z.B. Wärmepumpen, Biomasse)</li> <li>- Wirkungsgradsteigerungen bei allen Heizsystemen (Reduzierung der Energieverluste bei Wärmeerzeugung, -speicherung und -verteilung)</li> <li>- Ausbau Kraft-Wärme-Kopplung (ab 2030: EE-Methan)</li> <li>- Zurückdrängen direktelektrischer Heizungen</li> </ul>
<b>Warmwasser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einsatz wassersparender Armaturen und Geräte</li> <li>- Einsatz von Geräten mit Warmwasseranschluss</li> <li>- Duschwasser-Wärmerückgewinnung</li> </ul>	wie: Raumwärme
<b>Stromanwendungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausstattung mit stromeffizienten Haushaltsgeräten und sonstigen Elektrogeräten in den Haushalten</li> <li>- Stromsparende Kochherde (bzw. Kochen mit Gas)</li> <li>- Stromsparende Beleuchtung</li> <li>- Reduzierung von stand-by und Stillstandsverlusten</li> <li>- Lastmanagement (Geräte, Elektromobilität)</li> <li>- Reduzierung des Hilfsstromeinsatzes (Pumpen, Antriebe, Ventilatoren, Steuerungen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zurückfahren der Stromerzeugung mit fossilen Energieträgern (Kohle, Heizöl)</li> <li>- Kraft-Wärme-Kopplung (ab 2030: EE-Methan)</li> <li>- Ausbau der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energieträgern (z.B. Wind- und Wasserkraft, Biomasse, Solarstrom und Erzeugung von EE-Methan)</li> <li>- Wirkungsgradsteigerungen bei der Stromerzeugung im gesamten Kraftwerkspark und bei der Stromverteilung</li> </ul>

Tabelle 1.5: Kurzübersicht über die wesentlichen Effizienz- und Klimaschutzstrategien in den beiden Effizienzscenarien nach Handlungsfeldern.

## 1.5 Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse der Untersuchungen können nun im Hinblick auf die Ziele Luxemburgs, der EU und der Pariser Klimakonferenz als Handlungsempfehlungen dargelegt werden.

In einer Kurzübersicht (siehe Tab. 1.5) sind die wichtigsten Einzelstrategien der Effizienzscenarien für die Handlungsfelder Raumwärme/Lüftung, Warmwasser und Stromanwendungen zusammengestellt. Dabei wird zwischen der Nutzenebene und den Versorgungssystemen unterschieden. Für die Gesamtstrategie ist es entscheidend, die Einzelmaßnahmen sinnvoll miteinander zu verbinden und dabei die jeweils wirtschaftlich günstigen Kombinationen auszuwählen. Diese Art des Vorgehens wurde z.B. bei der Kostenoptimalitätsstudie (MdE 2014a) systematisch angewendet. In zwei zusammenfassenden Darstellungen wurden nun abschließend die Zielerfüllung der Szenarien im Hinblick auf die Pariser Klimaschutzziele (Abb. 1.9) und auf das aktuelle Klima- und Energiepaket der Europäischen Union (Abb. 1.10) aufgezeigt.

Die Effizienz- und Klimaschutzziele Luxemburgs können unter den Randbedingungen der Effizienzscenarien nahezu vollumfänglich nachgewiesen werden. In der ersten Phase 2020-2030 ist es durchaus vertretbar, zunächst dem Effizienz-Szenario zu folgen um erst nach 2030 auf die etwas strengeren Anforderungen im Effizienz-Plus-Szenario zu wechseln. Anhand der jüngsten Kostenentwicklungen kann geschlossen werden, dass bis dahin die energetischen Qualitäten des Effizienz-Plus-Szenarios das Kostenoptimum darstellen. Unter den Bedingungen des Business-as-usual-Szenarios werden hingegen diese Ziele deutlich verfehlt. Im Teilbereich der Stromeffizienz besteht noch ein großer Handlungsbedarf. Perspektivisch wird die Bedeutung dieses Handlungsfeldes eher zunehmen, weil der Strombedarf in den Effizienzscenarien durch das starke Absinken des Raumwärmebedarfs anteilig an Bedeutung gewinnt. Zu beachten ist hier auch die Kopplung mit an-

deren Sektoren, z.B. Mobilität und die künftigen Anforderungen an die Strombereitstellung (z.B. saisonale Speicher zur Überbrückung der Winterlücke, Lastmanagement).

### „UND“ - anstelle „ODER“-Strategien

Zentrales Ergebnis der Untersuchung ist, dass es darauf ankommt, die **Effizienz- und Klimaschutzstrategien nicht gegeneinander auszuspielen, sondern sinnvoll miteinander zu kombinieren**. Der entscheidende Aspekt ist die Qualität der energetischen Maßnahmen im Sinne des Mottos „Wenn schon – denn schon“: Immer dann, wenn sich eine Gelegenheit bietet, sollte anstelle von Reparaturen oder Erneuerungen ohne energetische Verbesserung („Pinselsanierung“) oder Energiemaßnahmen mit nur mittlerer Qualität (z.B. Niedrigenergiekomponenten), eine hohe Qualität (z.B. Einsatz Passivhauskomponenten) ausgeführt werden. Neben einem zukunftsweisenden Wärmeschutz sind hier der Einsatz von hochwertigen Fenstern mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung und der Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung bzw. thermischen Solar- oder Photovoltaikanlagen sowie die Ausstattung der Gebäude mit stromeffizienten Geräten und Beleuchtung notwendig. Das hängt u.a. auch damit zusammen, dass die Gelegenheiten für die jeweils wirtschaftlichen Maßnahmen ein eher knappes Gut darstellen. Werden sie nicht genutzt, werden die Maßnahmen auf eine spätere Generation mit doppelter Problemlage verschoben: Einerseits würden die Verbrauchswerte und Emissionen dann auf einem zu hohen Niveau liegen, mit entsprechend hohen Energiekosten je Wohnung, andererseits werden spätere Generationen zu unwirtschaftlichen Maßnahmen gezwungen, wenn sie 40 oder 50 Jahre später doch noch auf eine hohe Qualität im Sinne der Effizienzscenarien wechseln wollen.

### Das Dilemma der mittleren Qualität

Werden im Bestand, wie dies im Business-as-usual-Szenario der Fall ist, nur mittlere Qualitäten (d.h. in etwa auf dem Niveau heutiger Niedrigenergiehäuser) eingesetzt, so produziert man ein „Dilemma der mittleren Qualität“. Die damit im Neubau und bei energetischen Modernisierungen erzielbare Senkung des Heizwärmebedarfs reicht nicht aus, um die Effizienz- und Klimaschutzziele Luxemburgs bzw. die des internationalen Klimaschutzes zu erreichen. Aufgrund der großen Trägheit des Wohngebäudeparks als energetisches System wird dieses Problem jedoch zu spät, d.h. erst ab 2030/40 erkennbar, um dann ggf. noch vernünftig gegensteuern zu können.

Wegen der langen Nutzungsdauern von 30 - 80 Jahren stellen die mittleren Qualitäten in erster Linie verpasste Gelegenheiten dar, die so schnell nicht wiederkehren. In zweiter Linie stellt sich darüber hinaus ein sog. „Lock-in-Effekt“ ein. Denn auch nach 20, 40 oder 60 Jahren kann keine Wirtschaftlichkeit für energetische Verbesserungen von mittlerer auf hohe Qualität (z.B. Erhöhung Wärmeschutz einer Außenwand von einem U-Wert von 0,25 W/m<sup>2</sup>K auf 0,15 W/m<sup>2</sup>K) erwartet werden. Das liegt an dem abnehmenden Grenznutzen der Maßnahmen (z.B. Dämmstärken – Wärmedurchgang) und daran, dass die Energiepreise nicht beliebig ansteigen werden (z.B. Deckelung künftiger Energiepreise auf dem heutigen Niveau erneuerbarer Energiesysteme).

Nicht zuletzt bleiben die mittleren Qualitäten oftmals hinter dem wirtschaftlichen Optimum zurück, d.h. bei einer Ausführung mit hohen Qualität wären weitere Gewinne im Hinblick auf die Lebenszykluskosten möglich gewesen. Keinesfalls zielführend ist hingegen das zeitliche Vorziehen von Maßnahmen, der vorzeitige Abriss von Bestandgebäuden und deren Ersatz mit einem Neubau („Abrissprämie“) oder eine Erhöhung der Sanierungsrate über die übliche Erneuerungsrate von 1,5 - 2,0 % hinaus. Diese Vorschläge stehen im Widerspruch zum Kopplungsprinzip, verursachen hohe Rüstkosten und zerstören in letzter Konsequenz den Restwert der betreffenden Konstruktionen.

### Handlungsempfehlungen in Kurzform

Die konkreten Handlungsempfehlungen können in Kurzform folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Im Neubau und bei energetischen Sanierungen sollte künftig die Gebäudehülle in Passivhausqualität ausgeführt werden. Diese entspricht dem Kostenoptimum hinsichtlich der Lebenszykluskosten.
- Auch im Bestand sind künftig Lüftungsanlagen mit Wärmehückgewinnung und zunehmend auch thermische Solar- oder Photovoltaikanlagen vorzusehen.
- Stromeffizienzsteigerungen bei allen Elektroanwendungen.
- Langfristiger Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen.
- Weitgehend erneuerbare Stromerzeugung, auch unter den erschwerten künftigen Bedingungen (zusätzliche Anwendungen wie Elektromobilität, saisonale Speicherung).

### Spezialfall: Einsatz von Innendämmungen

Der Einsatz von Innendämmungen stellt im eingriffsempfindlichen Bestand aus Gründen der Effizienzverbesserung und des Klimaschutzes **keine** entscheidende Maßnahme dar. Innendämmungen sind jedoch u.U. aus anderen Gründen sinnvoll: Sie sind dann empfehlenswert, wenn denkmalverträglich ausführbar und keine Platzprobleme oder bauphysikalische Hemmnisse ihren Einsatz erschweren oder verhindern. Sie können dann einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Behaglichkeit und des Werterhalts sowie zur Energiekostensenkung leisten. Der Einsatz von Innendämmungen erfordert immer besondere Sorgfalt bei der Auswahl der Systeme und der Ausbildung der Anschlüsse. Weil das Feuchteverhalten der neuen Konstruktion ganz entscheidend von den verbleibenden Bauteilen abhängt, deren Beurteilung große Fachkunde erfordert, ist i.d.R. die Einschaltung eines Bauphysikers unverzichtbar.

## Fazit in Form von konkreten Handlungsempfehlungen

Wie die Ergebnisse der Studie zeigen, können Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen des Luxemburgischen Wohngebäudeparks trotz eines sehr starken Zuwachses an Bevölkerung und Wohnfläche bis 2050 so weit reduziert werden, dass der Energiebedarf des Wohngebäudeparks der Erreichung langfristiger internationaler, europäischer und nationaler Ziele (z.B. Klima- und Energieplan der EU bzw. 2-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens) nicht im Wege steht.

Es wird daher empfohlen, die Schritte zur weiteren Reduktion des Endenergiebedarfs und der THG-Emissionen bis etwa 2025/30 am Effizienz-Szenario und ab 2025/30 am Effizienz-Plus-Szenario auszurichten. Dies ist deshalb möglich, da diese Szenarien Maßnahmen beschreiben, die sich am heutigen Kostenoptimum orientieren (Effizienz-Szenario) bzw. an Maßnahmenkombinationen, für die Zeit nach 2025 bis 2030 angenommen werden kann, dass sie dem zukünftigen Kostenoptimum entsprechen.

Wie die detaillierte Analyse der Ergebnisse der Szenarienberechnungen zeigt, können die notwendigen Reduktionen nicht durch Anstrengungen in einzelnen Teilbereichen (z.B. nur durch Verbrauchsreduktion oder nur durch den Umstieg auf erneuerbare Energieträger) erreicht werden, sondern nur durch ein abgestimmtes Gesamtkonzept, in dem die im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario zu Grunde gelegten Maßnahmen Schritt für Schritt umgesetzt werden.

Auf der Grundlage der Szenarienberechnungen ergeben sich die folgenden Handlungsempfehlungen für die verschiedenen den Energiebedarf und die THG-Emissionen beeinflussenden Handlungsfelder:

## 1. Reduktion des Energiebedarfs im Neubau

Der Anteil der zukünftigen Neubauten an Endenergiebedarf und THG-Emissionen fällt im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario trotz des sehr starken Bevölkerungs- und Wohnflächenzuwachses relativ gering aus, weil für diese Szenarien die ambitionierten Anforderungen des aktuellen gesetzlichen Standards (RGD 2016) hinterlegt sind. Dies bedeutet, dass im Modell alle Neubauten ab 2020 stark reduzierte Heizwärmebedarfe aufweisen, weil sie neben einer sehr guten Dämmqualität über Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung verfügen. Ohne die Umsetzung dieses Anforderungsniveaus seit dem 1. Januar 2017 wäre die Reduktion des Gesamt-Endenergiebedarfs und der THG-Emissionen bei Verdopplung der Bevölkerung schlicht unmöglich. Mit der Umsetzung des (RGD 2016) ist für den Neubaubereich die entscheidende Weichenstellung bereits erfolgt. Dies, das sei hier angemerkt, ist bislang nur in sehr wenigen europäischen Staaten der Fall.

Daraus ergeben sich folgende konkrete Handlungsempfehlungen im Neubau:

- Die Grenzwerte des RGD 2016 beschreiben eine sehr gute Qualität der Gebäudehülle und sind nur in Gebäuden mit Wärmerückgewinnung erreichbar. Es wird empfohlen, die Anforderungen etwa 2025 zu überprüfen und ggf. minimal zu verschärfen, wenn die Kostenentwicklung bei wichtigen Komponenten (Fenster, Dämmsysteme, Komfortlüftungen mit Wärmerückgewinnung) das Wirtschaftlichkeitsoptimum weiter in Richtung höherer Qualitäten verschoben hat.
- Weitere Verbesserungen der Neubauten sind – ausgehend vom erreichten Stand bei Gebäudehülle und Lüftung– eher bei der Erhöhung der Effizienz einzelner Wärmeversorgungssysteme, bei der Auswahl emissionsarmer Energieträger (siehe Punkt 4), sowie bei der Einbindung von Thermie- und PV-Anlagen (siehe Punkte 6 und 8) zu erwarten. Dementsprechend können die Anforderungen an den Pri-

märenergiebedarf tendenziell früher verschärft werden, als die an die Qualität der Hülle.

- Da die Eigennutzung der Erträge gebäudeintegrierter PV-Systeme eine zunehmende Rolle spielen wird, sollte geprüft werden, die Bilanzgrenze um den Haushaltsstrombedarf zu erweitern und die Nutzung von PV-Strom für die Beladung von PKW ebenfalls zu berücksichtigen.
- Spätestens nach der Einführung von smart-metern sollten die Erfassung der realen Energieverbräuche und deren anonymisierte Auswertung eine stärkere Rolle spielen. Nur so können die Fortschritte bei der Reduktion des Gesamtenergiebedarfs des Gebäudebereichs verfolgt und ggf. beeinflusst werden.

## **2. Reduktion des Energiebedarfs bei der Modernisierung des Gebäudebestands**

Der Erfolg der Bemühungen zur Reduktion des Gesamt-Energiebedarfs und der THG-Emissionen wird sich – nachdem die notwendigen Qualitäten im Neubau bereits eingeführt wurden – in der Gebäudesanierung entscheiden. Der bei Weitem wichtigste strategische Typ ist aufgrund des hohen Anteils an der Gesamtfläche und der hohen spezifischen Bedarfswerte das Einfamilienhaus. Die am Kostenoptimum orientierten Annahmen zur mittleren energetischen Qualität der Sanierung im Effizienz- und im Effizienz-Plus-Szenario führen sowohl für die Einfamilienhäuser als auch für die übrigen strategischen Typen zu einer im Vergleich zum BAU-Szenario weit stärkeren Verringerung des Heizwärmebedarfs.

Folgende Handlungsempfehlungen sind für eine Reduzierung des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen entscheidend:

- Einführung strengerer Anforderungswerte für die energetische Sanierung von Wohngebäuden sowohl auf der Ebene von Einzelbauteilen, als auch bezüglich des Heizwärmebedarfs. Orientierung am zeitlichen Verlauf der im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario hinter-

legten U-Werte und Heizwärmebedarfs-Werte.

- Weiterführung der Förderung für die energetische Sanierung bei erhöhter Progression für höchste Qualitäten und erhöhten Zusatzanreizen für Gesamtsanierungen, in denen alle Bauteile energetisch auf höchstes Niveau saniert werden.

## **3. Erhöhung der Sanierungsrate und des Anteils der (energetischen) Gesamtsanierungen**

Die zentrale Herausforderung bei der Umsetzung der Klimaschutzziele im Wohngebäudebereich ist die Steigerung der Sanierungsrate und die Erhöhung des Anteils von (energetischen) Gesamtsanierungen. Für alle vier Szenarien wurde eine über alle Bauteile der Gebäudehülle gewichtete Sanierungsrate von 1,5 bis 2% angenommen. Diese orientiert sich an den technischen Lebensdauern der Bauteile: für die energetische Sanierung wird angenommen, dass sie stets in Kombination mit ohnehin notwendigen Maßnahmen am Ende der technischen Lebensdauer der Bauteile kombiniert wird.

Auch wenn exakte Zahlen zur derzeitigen Sanierungsrate nicht verfügbar sind, kann davon ausgegangen werden, dass bislang weit weniger Gebäude energetisch saniert werden, als für die o.g. gewichtete Sanierungsrate notwendig wäre. Die Ursachen für die bislang geringe Anzahl an Sanierungen wurden 2015/2016 in einem vom Wirtschaftsministerium initiierten Beteiligungsprozess in einer Workshop-Reihe und zusätzlichen Untersuchungen analysiert. Als Resultat des Beteiligungsprozesses wurde auch ein Maßnahmenplan erarbeitet.

Als Handlungsempfehlungen lassen sich benennen:

- Umsetzung der im Prozess zur Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie beschriebenen Maßnahmen zur Beseitigung von baukulturellen, rechtlichen und finanziellen Hemmnissen sowie zur Erhöhung der Akzeptanz bei Hausbesitzern und bei den Akteuren der Baubranche.

- Damit diese Aktivitäten tatsächlich eine bauliche Umsetzung mit den erforderlichen hohen Qualitäten münden ist eine Kombination von Informationsangeboten, Anreizen (Steuererleichterungen, Finanzierungshilfen, Förderungen) und gesetzlichen Anforderungen wahrscheinlich am zielführendsten.

#### **4. Beschleunigung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgungssysteme im Neubau**

Wie die Status-Quo-Analyse auf Grundlage der verfügbaren statistischen Daten zeigt, ist die Wärmeversorgungsstruktur des Luxemburgischen Wohngebäudebestandes von einem sehr hohen Anteil an fossil beheizten Gebäuden geprägt. Dies gilt vor allem für den Gebäudebestand, der zu etwa 90% mit Heizöl, Erdgas und Kohle beheizt wird, aber in abgeschwächtem Maße auch für den Neubau der vergangenen Jahre, in dem noch immer hohe Anteile an fossilen Energieträgern genutzt werden – zunehmend in Form von Erdgas anstelle von Heizöl.

Im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario wird eine Beschleunigung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung aller Gebäude unterstellt. Am deutlichsten wird dies beim Zeitpunkt des Ausstiegs aus dem Energieträger Öl: In den beiden Szenarien wird unterstellt, dass die letzten Ölkessel in etwa in den Jahren 2020 bis 2035 eingebaut werden. Wie die Beispiele Dänemarks und Niederösterreichs zeigen, ist dies für den Neubau ohne größere Probleme durch Verbote durchführbar. Hieraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- Orientierung am Effizienz-Szenario und dem Effizienz-Plus-Szenario, was die zeitliche Entwicklung der Energieträgerstruktur angeht.
- Verbot des Einbaus neuer Ölkessel zwischen dem Jahr 2020 und spätestens 2035. Im Neubau ist ein relativ kurzfristiges Verbot zwischen 2020 bis 2025 möglich.

- Frühzeitige Ankündigung und Begründung des Verbots.
- Schaffung von Anreizen zur Steigerung der Anteile der regenerativen Energieträger (Wärmepumpen- und Biomasseheizungen v.a. für Einfamilienhäuser) und erneuerbar gestützte Fernwärme zu Lasten des Energieträgers Erdgas.
- Die Anreize können entweder tariflicher Struktur sein (generelle CO<sub>2</sub>-Abgabe, Pauschal-Aufschlag für Gas) oder in Form von Förderungen für CO<sub>2</sub>-arme Wärmeversorgungssysteme gewährt werden.

#### **5. Beschleunigung der Dekarbonisierung der Wärmeversorgungssysteme im Gebäudebestand**

Während die Dekarbonisierung der Wärmeversorgungsstruktur im Neubau relativ problemlos und kurzfristig möglich ist, ist dies für den Gebäudebestand (und die Sanierung) schwieriger. Es wird daher vorgeschlagen, in der Sanierung mit etwas längeren Übergangsfristen für den Ausstieg aus dem Öl zu arbeiten.

Die Handlungsempfehlungen sind ähnlich wie im Neubau, unterscheiden sich jedoch im Detail:

- Orientierung an den Effizienzszenerarien bezüglich der zeitlichen Entwicklung des Energieträgerstruktur.
- Verbot des Einbaus neuer Ölkessel zwischen dem Jahr 2020 und spätestens 2035. Im Bestand bzw. in der Gebäudesanierung erscheint ein Einbauverbot für neue Ölkessel zwischen 2025 und 2035 möglich.
- Frühzeitige Ankündigung und Begründung des Verbots.
- Öffentlichkeitsarbeit zur Forcierung des freiwilligen Ausstiegs aus dem Ölheizungen schon vor dem Verbot und Darstellung der nicht-fossilen Alternativen nach Lage im Siedlungsraum des Gebäudes und verfügbaren Alternativen (Umstieg auf erneuerbare Fernwärme in Gebieten, in denen dies aufgrund einer auch zukünftig hohen Wärmedichte wirtschaftlich ist, Umstieg auf Biomasse vor allem in

Einfamilienhäusern im ländlichen Raum, Umstieg auf Sole-, Wasser- oder Luft-Wärmepumpen, wo genügend Entzugsleistung zur Verfügung steht und wo keine Lärm-Probleme entstehen, ggf. Umstieg auf Gas-BHKW, wo keine Möglichkeit außer der Versorgung über Gas besteht).

- Schaffung von Anreizen zur Steigerung der Anteile der regenerativen Energieträger (Wärmepumpen) Strom, Biomasse (v.A. für EFH) und erneuerbare Fernwärme zu Lasten des Energieträgers Erdgas. Für Erdgas ggf. Anreize für BHKW-Lösungen, wo keine anderen Energieträger verfügbar sind; die Anreize können entweder tariflicher Struktur sein (generelle CO<sub>2</sub>-Abgabe, Pauschal-Aufschlag für Gas) oder in Form von Förderungen für CO<sub>2</sub>-arme Wärmeversorgungssysteme gewährt werden.

## 6. Ausbau der Solarthermie

Durch die Kostendegression von PV-Anlagen sind thermische Solaranlagen unter Druck geraten. Da sie weiterhin eine wichtige Rolle zur Reduktion des Wärmebedarfs für Warmwasser und Heizung spielen, sollte der Ausbau weiter forciert werden.

Die zugehörige Handlungsempfehlung lautet:

- Förderung von thermischen Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung als Alternative und/oder Ergänzung von PV-Anlagen.

## 7. Senkung des Haushaltsstrombedarfs und allen anderen Elektroanwendungen in und an Wohngebäuden

Bei weiterhin sinkendem Energiebedarf für Heizung und Warmwasser steigt die relative Bedeutung des Haushaltsstrombedarfs. Soll der Endenergiebedarf des Wohngebäudeparks bzw. des Sektors der privaten Haushalte gesenkt werden, so spielt die Reduktion des Strombedarfs für Haushaltsgeräte, Beleuchtung, Kommunikationselektronik, Hilfsaggregate und Aufzüge usw. eine maßgebliche Rolle.

Dazu können folgende Handlungsempfehlungen formuliert werden:

- Erweiterung der Bilanzgrenze in den Energiepassberechnungen um den Haushaltsstrom zur Verdeutlichung der Einsparpotenziale (auch aus bilanztechnischen Gründen, z.B. zur Entwicklung belastbarer Kühlstrategien)
- Verknüpfung möglicher Förderungen für energieeffiziente Gebäude und PV-Anlagen mit Anforderungen zur Beschränkung des Haushaltsstrombedarfs.
- Förderung des Einsatzes stromeffizienter Haushaltsgeräte und Beleuchtung, auch aus sozialen Gründen (z.B. um die Betriebs- und Nebenkosten in Sozialwohnungen zu begrenzen), beispielsweise durch Umtauschaktionen für alte Elektrogeräte in Zusammenarbeit mit Stromversorgern, Elektrogeräte-Händlern etc. („Verschrottungsprämie“) unabhängig von Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden.
- Förderungen für besonders effiziente Technologien im Bereich Hilfsstromeinsatz (Pumpen, Steuerungen, Standby) und Allgemeinstrom (Beleuchtung Tiefgaragen und Treppenhäuser, Aufzüge).
- Forschung in Kooperation mit entsprechenden Firmen und Herstellern aus Luxemburg im Bereich Lastmanagement und Kopplung von Stromeffizienz mit Eigennutzung, Speicherung und anderen Sektoren (z.B. Elektromobilität).
- Ein besonderes Augenmerk ist auf die Hilfsstrom- und Kleinanwendungen (Pumpen, Steuerungen, Ventilatoren, Stand-by-Verluste, Kleingeräte, Kommunikationselektronik) zu richten, weil diese, als zumeist neue Anwendungen, den Strombedarf ansteigen lassen. Hier ist zu überlegen, welche Mischung von Anforderungen und Anreizen sinnvoll wäre, um diesen Anstieg deutlich zu begrenzen.
- Förderung von speziellen Beratungsangeboten im Zuge der Planung von Neubauten und umfassenden Sanierungen. Das Ziel hierbei ist, die Synergien zwischen Stromeffizienz, thermischer Behaglichkeit und erneuerbaren Energien sowie Elektromobilität aufzuzeigen und in ein projektbezogenes Stromeffizienzkonzept zu überführen.

## 8. PV am Gebäude und Sektorenkopplung mit Mobilität

Wie in Kapitel 10 dargestellt kann in energiesparenden Gebäuden mit hocheffizienten Haushaltsgeräten die PV-Erzeugung am Gebäude eine maßgebliche Rolle im Energiekonzept spielen, zumal, wenn die Eigenverbrauchsrate durch das Beladen von Elektro-PKW am Gebäude gesteigert wird.

Aus dieser Erkenntnis ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- Erweiterung der Bilanzgrenze in den Energieausweisberechnungen um die Erträge gebäudeintegrierter PV-Erträge, die dann jedoch realitätsnah zu bestimmen sind.
- Schaffung von Anreizen zur Nutzung der großen, zusammenhängenden auf Ein- und Mehrfamilienhäusern vorhandenen Dachflächen.
- Ermöglichung von Mieterstrom-Modellen in Mehrfamilienhäusern und Bewerbung dieser Modelle bei großen Immobilienentwicklern.
- Einführung von Vorgaben zur Berücksichtigung der notwendigen Leistung zum Beladen von Elektro-PKW in Mehrfamilienhäusern/Tiefgaragen und ggf. auch in Einfamilienhäusern/Garagen.
- Schnelle Umsetzung der in der nächsten Aktualisierung der EPBD geplanten Verpflichtung zur Leerverrohrung für das Laden von Elektro-PKW in den Tiefgaragen von Mehrfamilienhäusern. Ggf. darüber hinausgehend Vorgaben zu Art und Umfang der in Mehrfamilienhäusern zu realisierenden Ladeinfrastruktur und/oder Vorrüstung mit entsprechenden Anschlusswerten, Zählern und Messeinrichtungen.

## 9. Umbau des Stromversorgungssystems (außerhalb von Gebäuden)

Der Vollständigkeit halber sei daran erinnert, dass in beiden Effizienzscenarien eine weitreichende Dekarbonisierung der Stromproduktion bis 2050 unterstellt ist. Da Luxemburg vermutlich auch in Zukunft auf Stromimporte, z.B. aus Deutschland angewiesen sein wird, ist dieser Teil des Gesamtkonzepts zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Wohngebäude-sektors im Gegensatz zu allen bisher aufgezählten Teilen nur teilweise in Luxemburg beeinflussbar. Interessant ist hierbei vor allem das Effizienz-Plus-Szenario, in dem im Zuge der Transformation des Energiesystems in Richtung einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung ein starker Ausbau der stromgestützten Wärmeversorgung und Mobilität zugrundegelegt ist.

Als hier nur sehr allgemein formulierbare Handlungsempfehlungen können genannt werden:

- Ausschöpfung der in Luxemburg vorhandenen Potenziale zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung.
- Ergänzung und Ausbau der bereits vorhandenen Speicherstruktur (Pumpspeicher, Batterien, Gebäude als Wärmespeicher, Power-to-gas-Technologie).
- Ggf. Investitionen in regenerative Stromerzeugungsanlagen im benachbarten Ausland.

## 2 Luxemburg – Energieperspektiven

### 2.1 Räumliche Struktur

Das Großherzogtum Luxemburg liegt im Westen Mitteleuropas und grenzt an Belgien, Deutschland und Frankreich. Das Land erstreckt sich auf einer Fläche von 2.586 Quadratkilometern und ist damit vor Malta (316km<sup>2</sup>) das zweitkleinste Land der EU.

Trotz seiner geringen Fläche sind die Regionen Luxemburgs sehr vielfältig (siehe Abb. 2.1): Luxemburg Stadt und ihr Umland bilden als das Herz des Landes sowohl das kulturelle als auch das wirtschaftliche Zentrum (grau). Das Land der roten Erde (rot) im Süden bindet die ehemals wichtigste wirtschaftliche Kraft des Landes, nämlich die Stahl- und Kohleindustrie in modernes Wirtschafts- und Universitätsleben ein. Im Osten befinden sich das von Weinbergen geprägte Moselgebiet (blau), sowie die Region Mullerthal (gelb), welches aufgrund seiner Landschaft auch als kleine Schweiz bezeichnet wird. Die im Norden gelegenen Ardennen sind geprägt von Naturparks. Dieses Gebiet ist bisher am wenigsten dicht besiedelt.

Luxemburg ist es gelungen, sich zu einer der wachstumsstärksten Wirtschaften der EU zu entwickeln und das Bruttoinlandsprodukt pro Kopf auf das doppelte des EU-Durchschnittes anzuheben. Seine wirtschaftliche Kraft gewann das Land durch die Stahlindustrie, welche allerdings 1987 vom Bankensektor als Hauptbeschäftigungszweig abgelöst wurde. Seither hat sich Luxemburg zum siebtgrößten Finanzplatz der Welt entwickelt und wurde zusätzlich zu einem der wichtigsten europäischen Entscheidungszentren.

Luxemburg ist eines der reichsten Länder der Europäischen Union, mit der Folge, dass sowohl die Löhne als auch die Preise für Grundstücke und Mieten sehr hoch sind.

### 2.2 Siedlungsentwicklung

Sowohl das hohe Bruttoinlandsprodukt, als auch die geografische Lage, ziehen viele Menschen nach Luxemburg, um dort zu leben oder auch nur um dort zu arbeiten (Grenzgänger). Diese Entwicklungen spielen eine wichtige Rolle für die Zukunft des Landes. Durch einen hohen Bevölkerungszuwachs wird auch der Gebäudepark Luxemburgs deutlich an Umfang zunehmen. Neben der Neuschaffung von Wohnungen werden Arbeitsplätze, Ausbildungsstätten, öffentliche Einrichtungen etc. benötigt, womit sich auch das Erscheinungsbild Luxemburgs erheblich wandeln wird. Stetiges Bevölkerungswachstum erhöht den Druck gerade in den bisher sehr dicht besiedelten Bereichen. In Abb. 2.2 wird der Aufbau der Untersuchung zur Ausgangssituation und der künftigen Entwicklung des Wohngebäudepark Luxemburgs dargestellt. Ausgangspunkt ist die Bevölkerungsentwicklung. Über die Betrachtung der Haushaltsgrößen und der bisherigen Wohnflächenentwicklung wird abgeschätzt, wie sich die spezifische Wohnfläche pro Person künftig entwickeln wird. In einem weiteren Schritt erfolgt die Einschätzung der Neubau- und Ersatzbauentwicklung, wobei letztere von der Abgangsrate durch Abriss, Nutzungsänderungen usw. beeinflusst wird. Dann erst kann das Neubaudvolumen und die Bestandsentwicklung, jeweils getrennt für alle Baualterklassen, bestimmt werden.

### 2.3 Denkmalbestand

Aufgrund des sich dynamisch entwickelnden Wohnungsmarkts steigen die Grundstückspreise und Mieten überproportional an. Von diesen Verwertungsinteressen sind auch die denkmalgeschützten Gebäude betroffen. Zum Teil äußert sich dies als Veränderungswünsche am geschützten Bestand selbst,

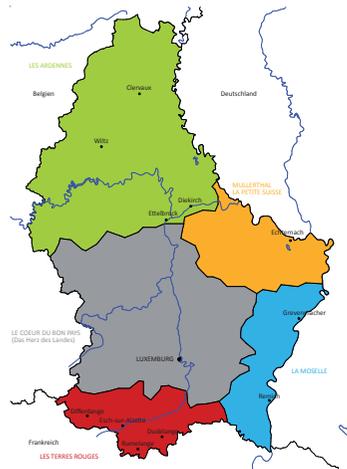


Abbildung 2.1  
Luxemburg und seine Regionen

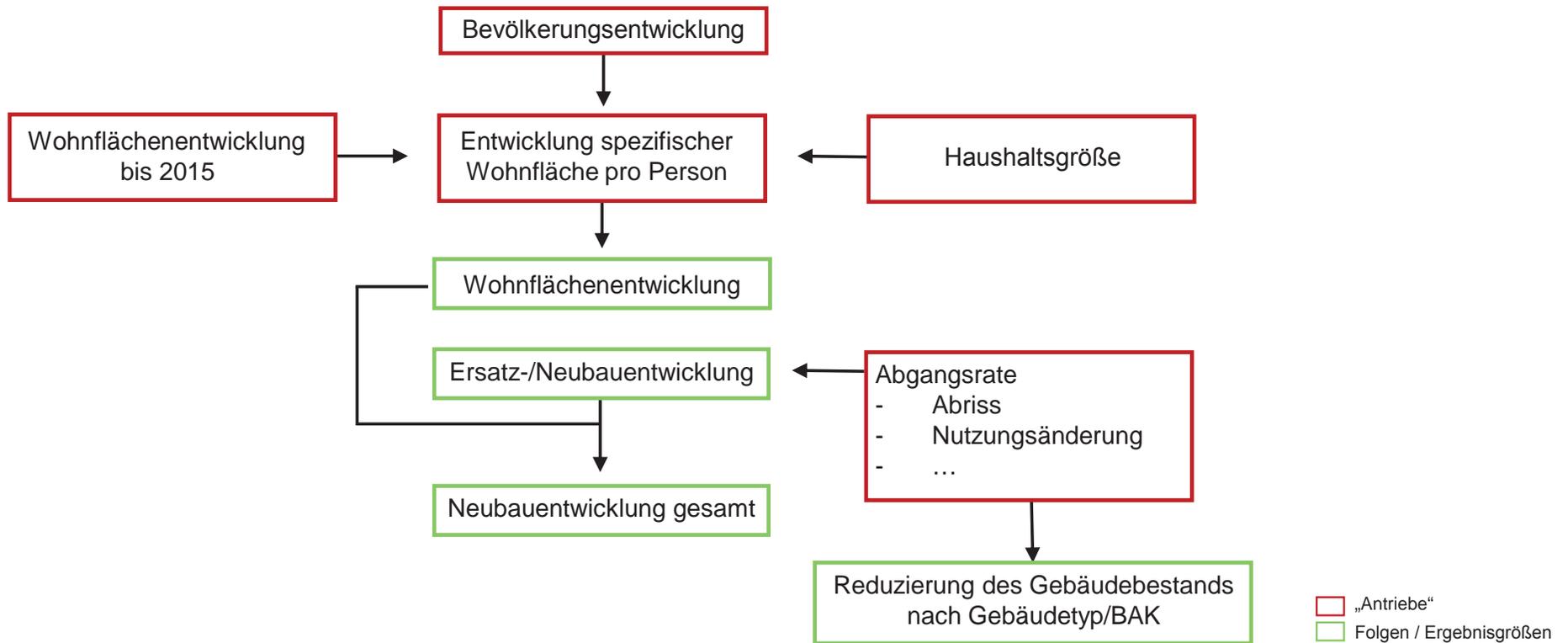
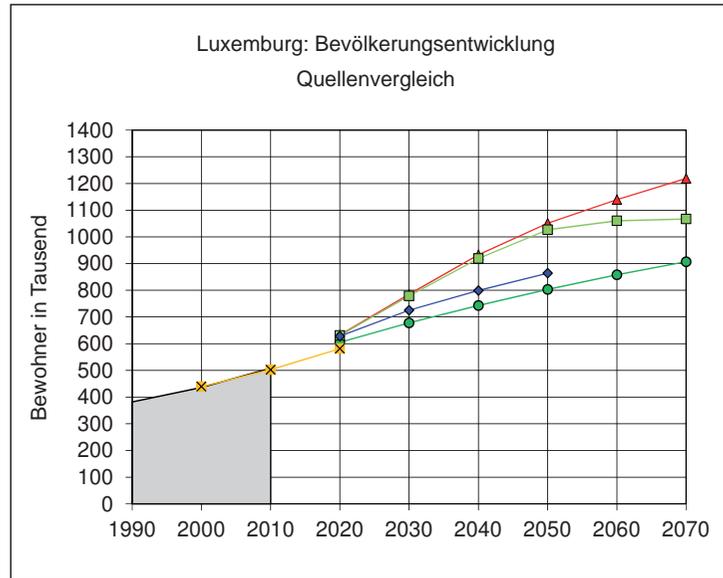


Abbildung 2.2  
 Schema zur Erläuterung des Vorgehens zur Ermittlung der Wohnflächenentwicklung.  
 Eigene Darstellung.

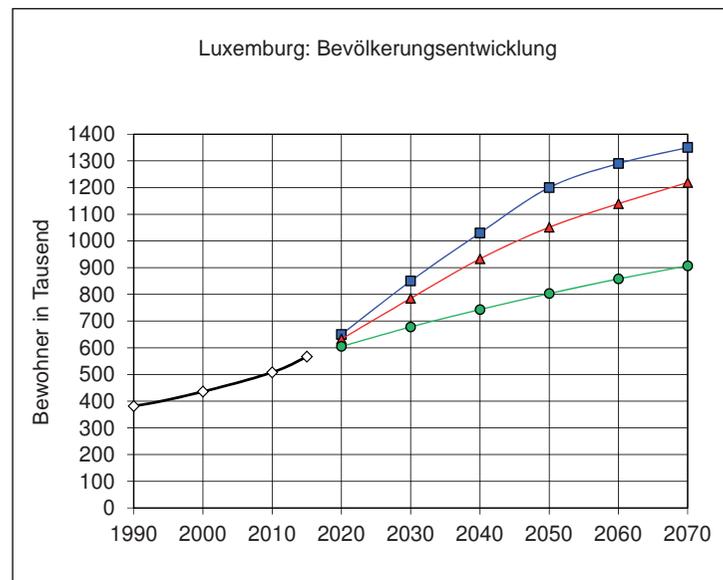
- UN 2015
- ▲ EUROSTAT 2014
- STATEC 2014
- ✕ MdE 2014a
- ◆ UN Census Bureau
- UN 2015 (IST-Entwicklung)

Abbildung 2.3  
Bevölkerungsentwicklung Luxemburgs im Zeitraum 1990 - 2070. Es werden verschiedene Prognosen bezüglich der Bevölkerungsentwicklung aufgetragen und mit der bisherigen Entwicklung in Verbindung gebracht. Quellen: siehe Legende.



- obere Prognose
- ▲ mittlere Prognose
- untere Prognose
- ◇ IST-Entwicklung

Abbildung 2.4  
Bevölkerungsentwicklung Luxemburgs im Zeitraum 1990 - 2070. Herausarbeiten von 3 wahrscheinlichen Verläufen für eine mögliche Sensitivitätsanalyse. Quellen: obere (eigene Prognose in Abstimmung mit STATEC), mittlere (EUROSTAT 2014) und untere Prognose (UN 2015).



noch häufiger aber am weiteren Umgriff (z.B. Ensembleschutz, Nachbargebäude).

Auf kommunaler Ebene sind augenblicklich rund 5.000 Gebäude geschützt. Diese umfassen ebenfalls fast alle 770 national geschützten Wohnbauten, welche jährlich um ca. 30 Gebäude erweitert werden. Bei den geschützten Gebäuden handelt es sich überwiegend um kleinere Gebäude, die nur eine oder zwei Wohneinheiten beinhalten.

Der schützenswerte Bestand wird folgendermaßen in die Baualtersklassen eingeordnet: 80% der Gebäude wurden bereits vor 1919 errichtet, 15% fallen in die Jahre zwischen den Weltkriegen (1919-1945), 5% wurden 1946-1960 erbaut und von den neueren Gebäuden, die nach 1960 entstanden sind, wurde bisher eine Villa national geschützt. (Denkmalschutzbehörde Luxemburg).

Anhand von Listen der schützenswerten Gebäude, die vom Denkmalamt und den Gemeinden erstellt wurden, sollen auf kommunal geschützter Ebene in den kommenden Jahren insgesamt 27.000 Gebäude unter Denkmalschutz gestellt werden.

## 2.4 Übersicht über die zentralen Eck- und Basisdaten

In das Kohortenmodell sind bestimmte Mengenkomponenten zu integrieren, die als „Antriebe“ für die Gesamtentwicklung eine wesentliche Rolle spielen. Daher sind diese möglichst sorgfältig zu bestimmen oder es ist alternativ über Sensitivitätsstudien zu prüfen, inwieweit die hier getroffenen Annahmen einen kritischen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben.

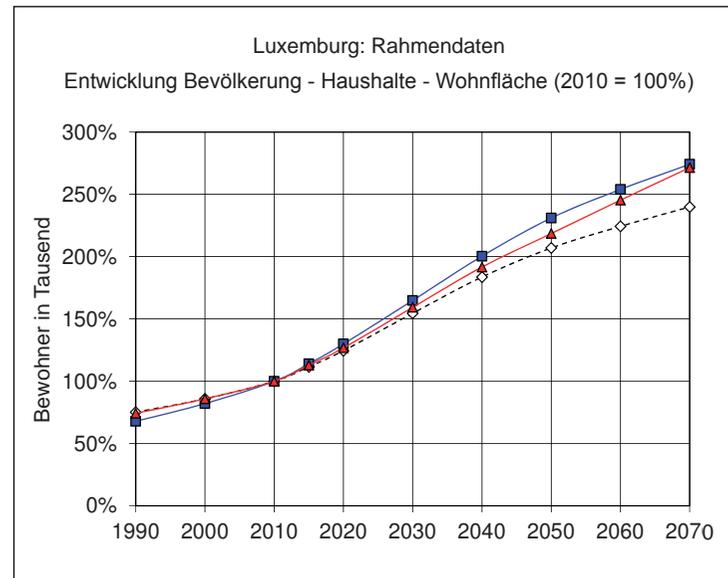
Bereits von 2000 bis 2013 ist die luxemburgische Bevölkerung um 23% gewachsen, wohingegen der durchschnittliche Anstieg in den EU-28 Ländern nur 5% betrug. Das ist vor allem auf Einwanderer aus anderen europäischen Ländern zurückzuführen. Seit 1970 ist der Anteil der ausländischen Bevölke-

rung auf das Vierfache angestiegen, so dass im Jahr 2016 ein Anteil von 46,7% ermittelt werden konnte.

Es wird erwartet, dass diese Entwicklung sich auch in den folgenden Jahren und Dekaden fortsetzen wird. In den Prognosen wird ausgehend von der aktuellen Bevölkerung (2015: 567.000) von einem starken Bevölkerungswachstum ausgegangen, das bis 2050 in etwa zu einer Verdopplung führen wird. Um die künftige Bevölkerungsentwicklung Luxemburgs grob abschätzen zu können, wurden zunächst einmal die Ergebnisse aus allen verfügbaren Quellen einander gegenübergestellt (siehe Abb. 2.3).

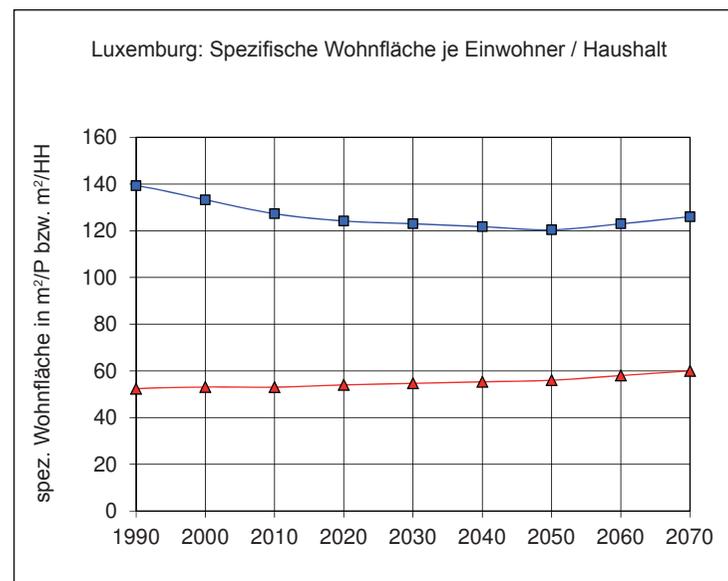
Die aktuellen Prognosen des statistischen Landesamtes (STATEC 2016) gehen davon aus, dass die obere Bevölkerungsentwicklung derzeit die wahrscheinlichere Variante ist. In einem nächsten Schritt wurden daher die Szenarien, die in den Quellen die obere und untere Grenze darstellen (EUROSTAT 2014; UN 2015) ausgewählt und durch eine weitere Entwicklung ergänzt, die einen noch höheren Bevölkerungszuwachs zugrunde legt (vgl. Abb. 2.4). Dies dient u.a. dem Zweck einer späteren Sensitivitätsanalyse. Dies weil die Bevölkerung eine kritische Größe für die folgenden Berechnungen zur Gesamtentwicklung des Wohngebäudeparks und seinem Energiebedarf darstellt.

Zusätzlich zur Bevölkerungsentwicklung sind die Wohnflächenentwicklungen zu betrachten, denn die bewohnten Nutzflächen sind eine entscheidende Größe für den Energiebedarf des Wohngebäudeparks. In Abbildung 2.5 sind die relativen Entwicklungen von Bevölkerung, Haushalten und Wohnflächen mit dem Bezugsjahr 2010 (=100%) zusammen geführt. Es zeigt sich, dass die jeweiligen Entwicklungen relativ ausgeglichen verlaufen. Dies beruht hauptsächlich auf der Annahme, dass der Zuzug überwiegend in städtischen Regionen und Verdichtungsräumen (z.B. Luxemburg Stadt, Süd-Luxemburg) stattfinden wird. Durch den zu erwartenden Druck



- Haushalte
- ▲ Wohnfläche
- ◇ Bevölkerung

Abbildung 2.5  
Relative Entwicklung der Bevölkerung, der Haushalte und der Wohnflächen in Bezug zum Ausgangsjahr der Untersuchung 2010 (= 100%).  
Quelle: (STATEC 2016)

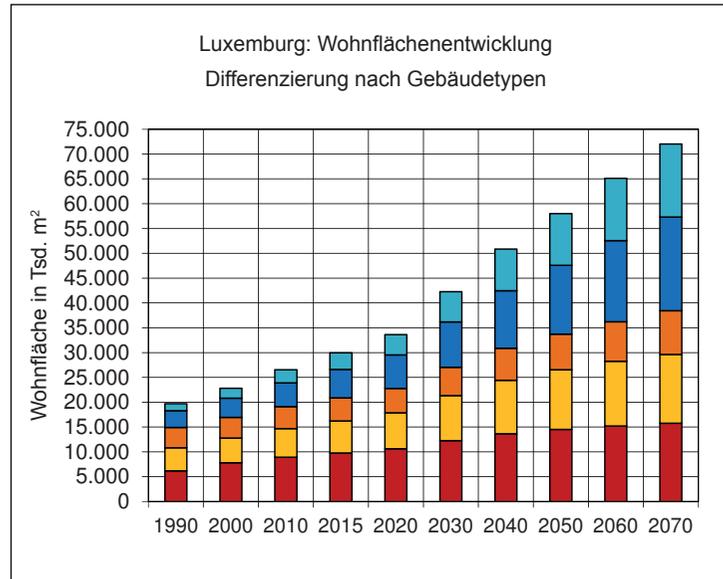


- Spez. Wohnfläche je Haushalt
- ▲ Spez. Wohnfläche je Person

Abbildung 2.6  
Entwicklung der spezifischen Wohnfläche pro Haushalt (blau) und pro Person (rot), als Grundlage für die Bestimmung der gesamten Wohnfläche im Betrachtungszeitraum. Quelle: Eigene Berechnungen und Abschätzungen auf der Grundlage von (STATEC 2016)

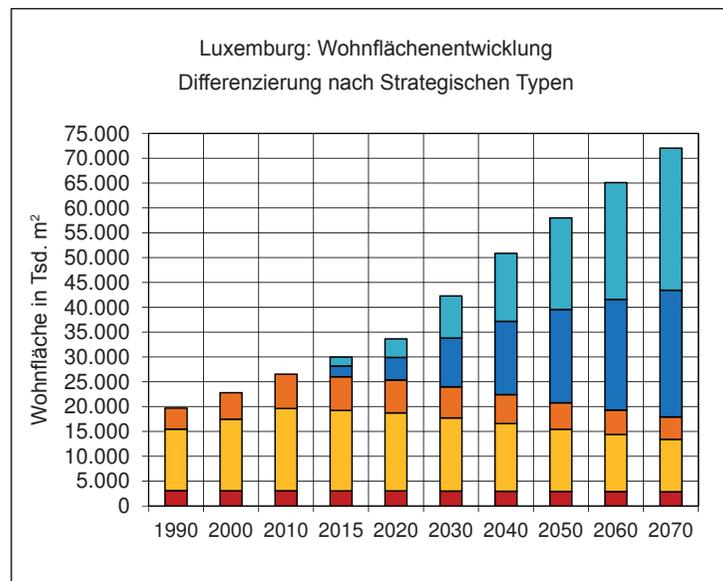
- MFH > 10
- MFH < 10
- RH
- DH
- EFH

Abbildung 2.7  
Entwicklung der Wohnflächen in Luxemburg 1990 - 2070, wie sie den Szenarien zugrundegelegt sind. Dargestellt ist die Differenzierung nach Gebäudetypen (Mehrfamilienhäuser MFH, Reihenhäuser RH, Doppelhäuser DH, Einfamilienhäuser EFH).



- Neubau MFH ab 2010
- Neubau EFH ab 2010
- Bestand MFH
- Bestand EFH
- Bedingt sanierbarer Bestand

Abbildung 2.8  
Entwicklung der Wohnflächen nach strategischen Typen in Luxemburg 1990 - 2070.



auf den Wohnungsmarkt wird geschlossen, dass der Anstieg der spezifischen Wohnfläche pro Person weniger stark steigen wird als in der Vergangenheit, auch deshalb weil diese Kenngröße sich im Vergleich zu Nachbarländern ohnehin auf einem hohen Niveau befindet. Die Wohnfläche pro Haushalt sinkt aufgrund sinkender Personenzahlen pro Haushalt ab. Während die durchschnittliche Haushaltsgröße im Jahr 1990 noch 2,66 Personen und im Jahr 2010 etwa 2,40 Personen betrug, wird diese bis 2050 nur noch bei 2,15 Personen liegen. (vgl. Abb. 2.6)

Bei einer Darstellung, in der die Gebäudetypen unterschieden sind (Abb. 2.7) erkennt man, dass im Betrachtungszeitraum alle Gebäudetypen Zuwächse erfahren. Besonders stark sind diese bei den Einfamilien- und den kleinen Mehrfamilienhäusern. In Zukunft wird auch ein stärkerer Anstieg in größeren Mehrfamilienhäusern erwartet.

In der differenzierten Darstellung der Wohnflächen nach strategischen Typen (Abb. 2.8) wird sichtbar, dass im gesamten Betrachtungszeitraum ein Abgang bei den heutigen Bestandsgebäuden stattfindet. Die Abgangsrate wurde in den Szenarien konstant mit 0,10% pro Jahr für die denkmalgeschützten und mit 0,85% pro Jahr (NEEAP) für die restlichen Bestandsgebäude angenommen. Der Neubau umfasst somit den steigenden Bedarf und die Ersatzbauten für Wohnungen, die abgerissen oder umgenutzt werden.

## 2.5 Klimaschutzziele in Übereinstimmung mit dem 2°C-Ziel der Pariser Klimakonferenz

In diesem Kapitel wird erläutert, dass es unterschiedliche Ansätze gibt, aus dem 2°C-Klimaschutzziel die maximal zulässigen globalen Treibhausgasemissionen zu berechnen und diese in nationale Budgets sowie in pro-Kopf-emissionen umzurechnen. Die Ausführungen werden am Beispiel Deutschlands dargestellt, die Prinzipien sind jedoch auf andere industrialisierte Staaten übertragbar.

- Sofern man die Wahrscheinlichkeit, das 2°C-Ziel zu überschreiten, auf 30% begrenzen möchte, müssen die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen 2050 gegenüber dem Stand von 1990 halbiert werden (vgl. Meinshausen et al. 2009). Folgt man dem Ansatz von Verringerung und Konvergenz mit Bezugsjahr 2050 (C&C 2050) bedeutet dies, dass die Pro-Kopf-Emissionen sich bis 2050 angleichen sollten und nicht höher als ca. 1,25 t/P\*a liegen sollten.
- Nochmals strengere Anforderungen stellt der sog. Budgetansatz des wissenschaftlichen Beitrats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 2009). Hier werden zunächst die aus Klimaschutzgründen maximal zulässigen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum 2010 - 2050 über eine Multi-Szenarien-Analyse eingegrenzt. Sofern die Wahrscheinlichkeit, das 2°C-Ziel zu überschreiten nicht höher als 25 % betragen soll, dürfen in diesem Zeitraum global maximal noch 1000 Gt Kohlendioxid emittiert werden.
- Die Verteilung auf Ländergruppen und Nationalstaaten können nach verschiedenen Prinzipien vorgenommen werden. Wählt man hierbei den für die Industriestaaten moderateren Ansatz der „Zukunftsverantwortung“ müssten in Deutschland die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum 2010 - 2050 auf höchstens 9 Mrd. t begrenzt werden. Wählt man hingegen die Option „Historische Verantwortung“ wäre das Budget für Deutschland bzw. Luxemburg bereits heute vollständig aufgebraucht (vgl. WBGU 2009, S. 2 ff).

In Tabelle 2.1 werden die Konsequenzen der unterschiedlichen Ansätze zur Begründung von Klimaschutzzielen exemplarisch für Deutschland und den Sektor der privaten Haushalte vergleichend gegenübergestellt. Auf dieser Basis ist es möglich, analog einen ähnlich belastbaren Vorschlag zu den Klimaschutzzielen Luxemburgs insgesamt und für den Sektor der privaten Haushalte im Speziellen zu formulieren, der auf der Basis der aktuellen wissenschaftlichen Diskussion basiert. Dabei sind unterschiedliche Betrachtungsweisen möglich:

Kriterium	Kurzbeschreibung	Klimaschutzziel Deutschland	Klimaschutzziel private Haushalte Deutschland
Nationales Klimaschutzziel 2050 (vgl. [Energiekonzept 2010])	Reduktion der nationalen CO <sub>2</sub> -Emissionen im Jahr 2050 auf 80% im Vergleich zum Stand 1990. Diese Zielsetzung wurde in [Vallentin 2011] zugrundegelegt.	CO <sub>2</sub> -Emissionen 2050: < 200 Mio t/a	CO <sub>2</sub> -Emissionen 2050: < 50 Mio t/a ( < 650 kg/P*a ) ( < 13 kg/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> *a )
2°C - Ziel: Bezug: Pro-Kopf-Emissionen 2050 (vgl. [Meinshausen et al. 2009])	Halbierung der globalen CO <sub>2</sub> -Emissionen 2050 gegenüber dem Stand 1990; Angleichung der Pro-Kopf-Emissionen im Jahr 2050 gemäß dem Modell von Verringerung und Konvergenz mit Bezugsjahr 2050 (C&C 2050).	Pro-Kopf-CO <sub>2</sub> -Emissionen 2050 < 1,25 t/P*a	CO <sub>2</sub> -Emissionen 2050: < 312 kg/P*a ( < 6,5 kg/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> *a )
2°C - Ziel: Budgetansatz mit Begrenzung der kumulierten CO <sub>2</sub> -Emissionen 2000 – 2050 (vgl. [WBGU 2009])	Begrenzung der globalen CO <sub>2</sub> -Emissionen im Zeitraum 2000 – 2050 auf ein Niveau, bei dem die Wahrscheinlichkeit des 2°C-Ziel zu überschreiten nicht höher als 25% zu liegen kommt auf < 1000 Gt; Verteilung des Budgets auf Nationalstaaten gemäß dem Ansatz „Zukunftsverantwortung“ (vgl. [WBGU 2009], S. 28).	Kumulierte CO <sub>2</sub> -Emissionen 2010 – 2050: < 9000 Mio t	Kumulierte CO <sub>2</sub> -Emissionen 2010 - 2050: < 2500 Mio t (durchschnittliche Jahresbudgets 2010 – 2050: 800 kg/P*a bzw. 16 kg kg/m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> *a )

- Das Klimaschutzziel sollte in Bezug auf die Pro-Kopf-Emissionen 2050 gewählt werden. Ein Wert um 1,25 t/P\*a kann nach derzeitigen Stand der Wissenschaft als kompatibel mit dem 2°C-Ziel angesehen werden (vgl. Meinshausen et al. 2009).
- Für den Sektor der privaten Haushalte ergibt sich – unter der Annahme eines Anteils von auch künftig 25 % der Gesamtemissionen – für das Jahr 2050 ein CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 312 kg/P\*a und ein nutzflächenbezogener Grenzwert von etwa 6,5 kg/m<sup>2</sup>a.
- Grundlage ist ein Globalbudget von kleiner gleich 1000 Gt, bei dem die Wahrscheinlichkeit, das 2-Grad-Ziel zu überschreiten, kleiner gleich 25 % beträgt.

Tabelle 2.1  
Begründung von Klimaschutzzielen für Deutschland und den Sektor der privaten Haushalte für das Jahr 2050 nach verschiedenen Ansätzen. Die Angaben in der letzten Spalte beruhen auf einer angenommenen Bevölkerung Deutschlands im Jahr 2050 von 75 Mio und einer spezifischen Wohnfläche pro Person von 50 m<sup>2</sup>. Berechnung unter Verwendung der Daten aus: (Energiekonzept 2010), S. 5; (Meinshausen et al. 2009) sowie (WBGU 2009), S. 2 ff. und 27 f.. Quelle und nähere Erläuterungen: (Vallentin 2012, S. 60 ff.).

<b>Klimaschutzstandards: zu unterschreitende Grenzwerte für die Zeitperiode 2010 - 2020</b>					
<b>Bezugsgröße: Energiebezugsfläche (m<sup>2</sup>)</b>		Neubau	Bestand		
			voll sanierbar	bedingt sanierbar	
				mit Innendämmung	ohne Innendämmung
Heizwärme-Kennwert	kWh/m <sup>2</sup> a	<b>15</b>	<b>35</b>	<b>70</b>	<b>100</b>
Primärenergie-Kennwert (nicht erneuerbar)	kWh/m <sup>2</sup> a	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>170</b>	<b>220</b>
Global-Warming-Potential (CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen)	kg/m <sup>2</sup> a	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>

<b>Bezugsgröße: Person (P)</b>					
Heizwärme-Kennwert	kWh/P*a	<b>750</b>	<b>1750</b>	<b>3500</b>	<b>5000</b>
Primärenergie-Kennwert (nicht erneuerbar)	kWh/P*a	<b>5000</b>	<b>6000</b>	<b>8500</b>	<b>11000</b>
Global-Warming-Potential (CO <sub>2</sub> -Äquivalent-Emissionen)	kg/P*a	<b>1250</b>	<b>1500</b>	<b>2000</b>	<b>2500</b>

Tabelle 2.2  
Zu unterschreitende Grenzwerte der Klimaschutzstandards in der Zeitperiode 2010 - 2020. Die Kennwerte zur nicht-erneuerbaren Primärenergie und zum Global-Warming-Potential beziehen alle Energiedienstleistungen der privaten Haushalte mit ein (Raumwärme, Lüften, Warmwasser, sämtliche Stromanwendungen).  
Oben: Grenzwerte pro Quadratmeter Energiebezugsfläche (= beheizte Wohnfläche);  
Unten: Grenzwerte pro Person.  
Quelle: (Vallentin, 2011, S. V-20).

### Klimaschutzpfade

Im Mittelpunkt der energetischen Betrachtung steht die Frage, wie die Effizienzziele Luxemburgs in Verbindung mit den Klimaschutzzielen gelingen kann. Welche Strategien führen zum Erfolg und welche Vorschläge sind trotz vordergründiger Plausibilität kontraproduktiv für den Klimaschutz? Obwohl hier in Luxemburg ein breiter Konsens über die generelle Zielsetzung existiert, ist weit weniger klar, wie hoch der Beitrag zum Klimaschutz in den einzelnen Sektoren oder Handlungsfeldern ausfallen kann und soll. Noch weniger wurde bislang betrachtet, wie die Klimaschutzziele in kleineren räumlichen Einheiten – mit ihren ort- und stadtspezifischen Besonderheiten – konkret gefasst werden können. Es interessiert nicht alleine die Frage, wie ein Klimaschutzziel formuliert werden könnte,

sondern auch, wie der Weg dorthin ausgestaltet werden kann. Nur dann kann man im engeren Sinne von Klimaschutzpfaden sprechen.

### Klimaschutzstandards

Als Klimaschutzstandards werden energetische Standards im Wohnungsbau definiert, die in Übereinstimmung mit den langfristigen Klimaschutzzielen stehen (vgl. Vallentin 2011, S. V-19 ff.). Es wird eine Unterscheidung in vier verschiedene strategische Gruppen vorgenommen (siehe Tab. 2.2):

- An neu erstellte Gebäude werden die strengsten Anforderungen gestellt, weil im Neubau keine prinzipiellen Einschränkungen hinsichtlich der Umsetzung des energetischen Konzepts geltend gemacht werden können. Sie entsprechen in etwa dem Passivhausstandard.
- Im voll sanierbaren Bestand können i.d.R. alle energetischen Maßnahmen vollumfänglich umgesetzt werden; einige Anschlüsse (z.B. Sockel, Balkone) lassen sich jedoch nur mit unverhältnismäßigem Aufwand auf Neubaulniveau verbessern. Daher sind hier die Anforderungen geringer als im Neubau. Die typischen Qualitäten entsprechen denen von Passivhauskomponenten (siehe Tabelle 2.3). Dies ist auch dadurch gerechtfertigt, dass in der Baub substanz Herstellungsenergie gebunden ist, die für eine weitere Nutzungsperiode zur Verfügung steht.
- Nochmals geringere Anforderungsniveaus werden im bedingt sanierbaren Bestand gesetzt. Abhängig von der Eingriffsempfindlichkeit können hier bestimmte Maßnahmen nicht oder nur in abgewandelter Form ausgeführt werden.
- Zusätzlich unterschieden wird hier zwischen Gebäuden, bei denen sich eine Innendämmung als baukulturell verträglich erweist, und Gebäuden, bei denen auch eine Innendämmung nicht in Frage kommt. In der überwiegenden Zahl der Fälle sind davon Fassaden betroffen. Dies kann aber auch weitere Bauteile, wie z.B. Fenster, Decken- und Dachkonstruktionen umfassen.

## 2.6 Kostenoptimalitätsstudien zur Bestimmung der energetischen Qualitäten im Effizienz-Szenario

Energetische Vorgaben werden sich nur dann dauerhaft am Markt durchsetzen, wenn sie – zumindest unter Inanspruchnahme von Fördergeldern – wirtschaftlich umsetzbar sind. Die Annahmen für die mittlere energetische Gebäudequalität im Effizienz-Szenario wurde daher in Anlehnung an die Luxemburgische Kostenoptimalitätsstudie (MdE 2014a) festgelegt.

In dieser Studie wurde nach den Maßgaben der Richtlinie 2010/31 EU (European Commission 2010), ergänzt durch Verordnung 244/2012 (European Commission 2012) untersucht, bei welchen Energieniveaus sich in einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren für Neubau und Sanierung die niedrigsten Globalkosten für Investition, Energie und Wartung ergeben.

### Kostenoptimum im Neubau

Für den Neubau zeigt die Kostenoptimalitätsstudie, dass die niedrigsten Globalkosten ohne Förderungen auftreten, wenn die Gebäudeeffizienz in etwa Klasse C entspricht. Da die Kostenoptima sehr flach ausfallen, liegen die Globalkosten von Gebäuden der Klasse A nur geringfügig über dem Optimum. Unter Berücksichtigung der Förderung (vor 2017) liegt das Kostenoptimum bei Klasse A.

Da im neuen RGD 2016 für den Neubau eine Gebäudequalität eingeführt wurde, die in etwa der Klasse A/A entspricht, wird auf eine weitere Analyse der Kostenoptimalität verzichtet.

Stattdessen werden in Tabelle 2.4, S. 45 die U-Wert-Ensembles der Neubauten, die im Kohortenmodell in den Effizienzszenerarien für das Jahr 2020 beschrieben sind mit den U-Werten verglichen, die in der Luxemburgischen Kostenoptimalitätsstudie für die Klasse A verwendet wurden.

Klimaschutzstandards: Anforderungen gemäß Bauteil-/Komponentenverfahren (Teilsanierungen)			
Bauteil / Technikkomponenten	Voll sanierbarer Bestand	Bedingt sanierbarer Bestand	
		mit Innendämmung	ohne Innendämmung
U- Wert Aussenwand	< 0,15 W/m <sup>2</sup> K	< 0,30 W/m <sup>2</sup> K*	k.A.
U-Wert Dach / oberste Geschoßdecke	< 0,15 W/m <sup>2</sup> K	< 0,15 W/m <sup>2</sup> K	< 0,15 W/m <sup>2</sup> K
U-Wert Kellerdecke	< 0,30 W/m <sup>2</sup> K**	< 0,30 W/m <sup>2</sup> K**	< 0,30 W/m <sup>2</sup> K**
U-Wert Fenster (eingebaut)	< 0,85 W/m <sup>2</sup> K	< 0,85 W/m <sup>2</sup> K	< 0,85 W/m <sup>2</sup> K
Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage	> 0,75	> 0,75	> 0,75
Heizsystem (Raumwärme / Warmwasserbereitung)	- Gesamtaufwandszahl < 1,15 - Einsatz erneuerbarer Energien - geringer Hilfsstromeinsatz	wie links	wie links
Strombedarf in den Haushalten Endenergiekennwert	< 15 kWh/m <sup>2</sup> a	< 15 kWh/m <sup>2</sup> a	< 15 kWh/m

Tabelle 2.3  
Anforderungen der Klimaschutzstandards bei schrittweiser energetischer Modernisierung im Bestand gemäß dem Bauteil-/Komponentenverfahren. Hier werden Anforderungen an die einzelnen Bauteile und Technikkomponenten gestellt, die jeweils energetisch verbessert werden sollen. An Baudenkmale werden prinzipiell keine Anforderungen gestellt. Die dort denkmalverträglichen Maßnahmen sollten jedoch ebenfalls in hoher Qualität ausgeführt werden. Dazu sind die in der Spalte "Bedingt sanierbarer Bestand" genannten Werte als Orientierungshilfe geeignet.  
Quelle: (Vallentin 2011, S. V-22).

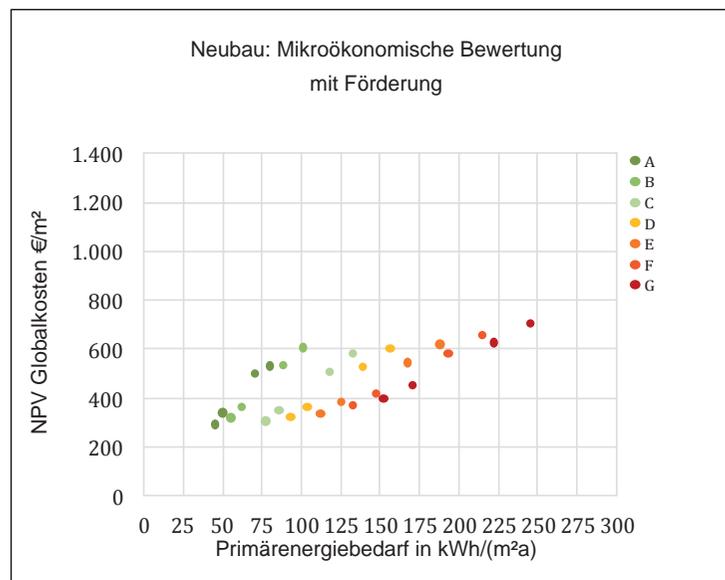
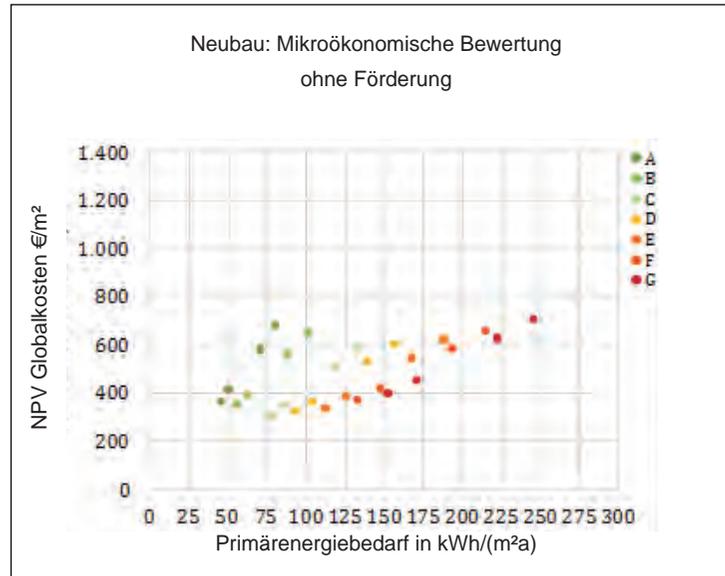


Abbildung 2.9 a, b  
 Kostenoptima für Wohngebäude  
 Neubau – ohne und mit Subventionen. Quelle: (MdE 2014 a).

Die U-Werte im Effizienz-Szenario für den Neubau 2020 sind insgesamt etwas höher gewählt als die in der Kostenoptimalitätsstudie Luxemburg verwendeten Werte. Das Anforderungsniveau des Effizienz-Szenarios liegt damit sehr nah am Kostenoptimum.

### Kostenoptimum bei der Bestandssanierung

Für die Sanierung zeigt die Luxemburgische Kostenoptimalitätsstudie ebenfalls sehr flach ausgeprägte Kostenoptima. Je nach eingesetztem Energieträger liegt das Optimum ohne Förderung bei den Klassen C oder B, bei Gas bei Klasse D. Unter Anrechnung der Subventionen liegt das Optimum je nach Gebäudetyp bei den Klassen A oder B.

Die Kostenoptimalitätsstudie zeigt, dass der politische Gestaltungsspielraum sehr groß ist: Da die Globalkosten der Effizienzklassen A bis D nur geringfügig voneinander abweichen, können die ambitionierten Klassen A und B schon mit maßvollen Förderanreizen zum wirtschaftlichsten Effizienzniveau werden.

Die U-Werte des Effizienz-Szenarios für die Bestandssanierung für 2020 liegen in etwa bei den Werten, die in der Kostenoptimalitätsstudie für die Klasse C verwendet wurden (siehe Tab. 2.5, S. 45). Das Szenario C liegt damit auf jedem Fall – auch für Gebäude die keine Subventionen erreichen – nahe am Kostenoptimum.

### Vergleich mit Kostenoptimalitätsstudien für Vorarlberg (Neubau) und Deutschland (Modernisierung im Bestand)

Für das Vorarlberger Modellvorhaben KliNaWo (EIV 2016) wurden für ein typisches Mehrfamilienhaus in Vorarlberg 60.000 Ausführungsvarianten geplant, ausgeschrieben und Angebotsspreise ermittelt. Dabei wurden neben der Bauweise (Massiv-, Misch- und Holzbauweise) unterschiedliche energetische Qualitäten der Hülle und des Lüftungskonzeptes sowie verschiedene Wärmeversorgungsvarianten miteinander kombiniert. Zu-

sätzlich wurden alle Varianten einmal mit und einmal ohne Förderung gerechnet. In Abb. 2.10 sind die Ergebnisse zusammengeführt, indem für jede Variante die Lebenszykluskosten über 50 Jahre dem Primärenergiekennwert (gemäß der österreichischen Norm OIB-RL-6 2011) gegenübergestellt sind. Die obere Punktwolke umfasst alle Fälle ohne Förderung. Die untere Punktwolke stellt die Varianten dar, die die Energiekriterien für gemeinnützigen Wohnungsbau erfüllen und damit die Anforderungen der Vorarlberger Wohnbauförderung (WFB) einhalten. Es ist gut zu erkennen, dass die Kostenoptima sehr flach ausfallen, d.h. das Energieniveau hat einen eher geringen Einfluss auf die Lebenszykluskosten. Das ist darin begründet, dass den kapitalisierten Mehrkosten für höhere Standards in etwa gleich hohe Einsparungen bei den Energiekosten gegenüberstehen. Gleichwohl liegen die optimalen Kombinationen (als rote Punktreihe dargestellt) im Bereich sehr niedriger Primärenergiekennwerte. Der kostenoptimale Primärenergiebedarf liegt bei etwa 58 bis 80 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>a und damit weniger als der Hälfte des im Nationalen Plan Österreichs für 2021 vorgesehenen Grenzwerts von 160 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>a. Bei den Varianten ohne Förderungen verschiebt sich der kostenoptimale Bereich etwas nach oben und das Optimum ist noch flacher ausgebildet.

Das kostenoptimale Energieniveau im Neubau kann nach den Auswertungen des Projekts KliNaWo wie folgt beschrieben werden:

- Das Kostenoptimum des Heizwärmebedarfs entspricht Gebäuden, die eine Hülle mit Passivhaus-Qualität aufweisen.
- Das Kostenoptimum des Primärenergiebedarfs liegt bei Werten, die ziemlich genau dem neuen Neubaustandard Luxemburgs gemäß RGD 2016 entsprechen.

Analog zur Vorgehensweise im Projekt KliNaWo wurde das Kostenoptimum auch für die Sanierung bestimmt (vgl. Ploss 2017).

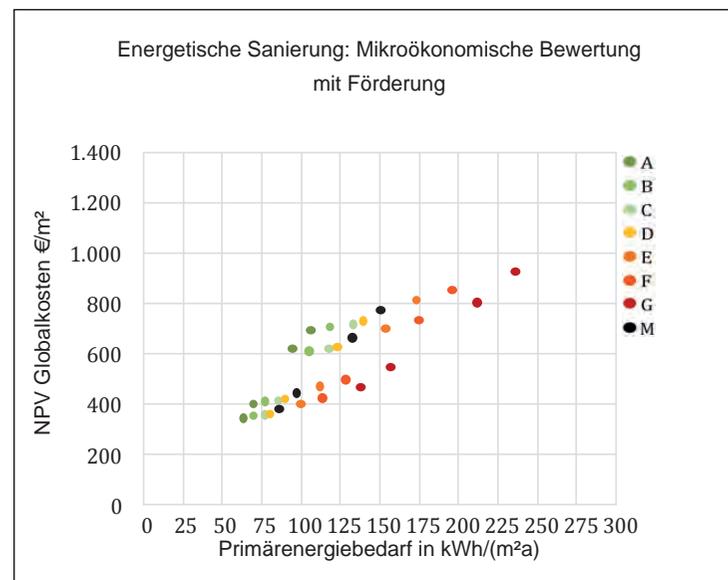
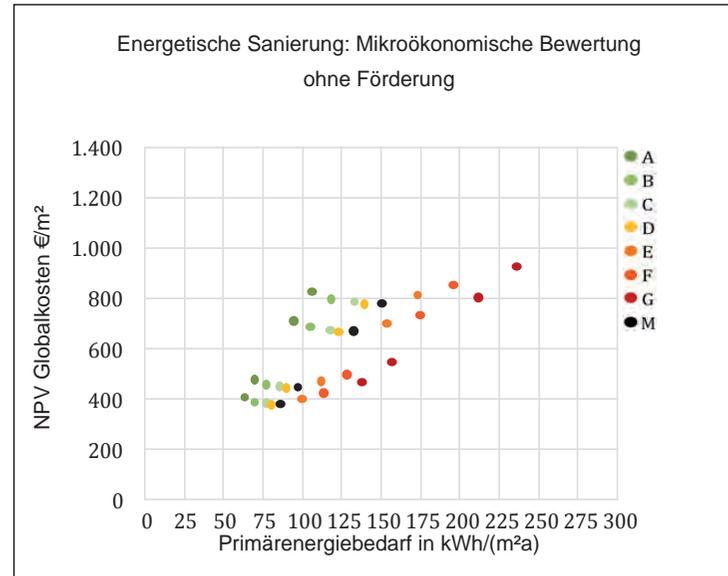
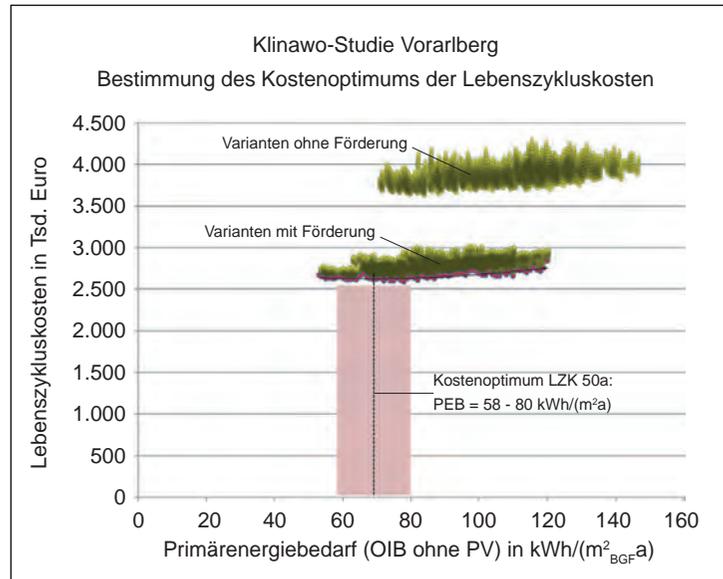


Abbildung 2.10 a, b  
Kostenoptima für Wohngebäude  
Neubau — ohne und mit Subventionen. Quelle: (MDe 2014a)

- Kostenoptimaler Bereich
- Berechnungsvariante
- Minimum der gesamten LZK (mit Förderung 50 Jahre)

Abbildung 2.11  
Bestimmung des Kostenoptimums der gesamten Lebenszykluskosten über 50 Jahre (LZK 50a) in Abhängigkeit vom Primärenergiebedarf gemäß OIB 2011 der Gebäudevarianten mit Förderung (untere Punktwolke) und ohne Förderung (obere Punktwolke). Die jeweils optimalen Fälle sind rot hervorgehoben. Quelle: (EIV 2016).



- Energiekosten
- Wartungskosten
- Erstellungskosten

Abbildung 2.12  
Bestimmung des Kostenoptimums für energetische Modernisierungen im Bestand am Beispiel eines Forschungsprojekts in Deutschland mit baugleichen Mehrfamilienhäusern. Für vier Varianten wurden die Kapitalwerte (30a) als Bruttokosten mit Berücksichtigung der Restwerte bestimmt. Die Variante „EnerPHit“ schneidet am günstigsten ab. Weitere Erläuterungen siehe Text. Quelle: (Ploss 2017).

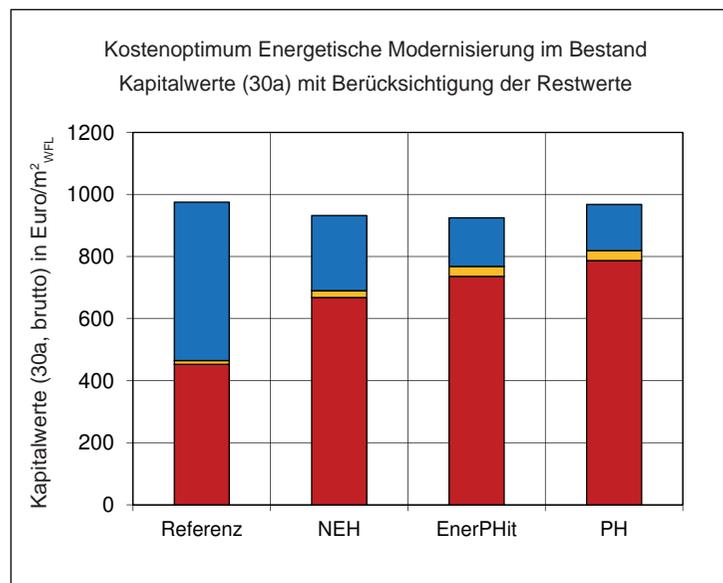


Abbildung 2.12 zeigt die Kapitalwerte für Finanzierung, Wartung und Energie für vier Varianten des untersuchten Mehrfamilienhauses:

- Variante „Referenz“ entspricht dem unsanierten Gebäude.
- Variante „NEH“ entspricht einer Sanierung auf das Niveau eines Niedrigenergiehauses.
- Variante „EnerPHit“ entspricht einer Sanierung mit passivhaustypischen U-Werten der Gebäudehülle, jedoch einigen sanierungstypisch verbleibenden Wärmebrücken und einer gegenüber einem Passivhaus etwas schlechteren Luftdichtigkeit.
- Variante „PH“ entspricht einem Gebäude, das trotz der Hemmnisse im Bestand das Passivhausniveau erreicht.

Auch im Fall der energetischen Modernisierung ist das Optimum sehr flach ausgeprägt. Die niedrigsten Lebenszykluskosten treten in der Variante „EnerPHit“ auf. Diese hat passivhaustypische U-Werte zwischen 0,13 W/m²K (Dach) und 0,22 W/m²K (Kellerdecke).

Es handelt sich bei dem Untersuchungsobjekt um ein kompaktes Gebäude mit sehr einfacher Geometrie, das nicht die typischen Luxemburger Fälle repräsentiert. Zudem gelten die Kostenkennwerte der Wirtschaftlichkeitsberechnungen für Deutschland und können somit nicht direkt auf Luxemburg übertragen werden.

Im Effizienz-Szenario wurden die U-Werte daher für 2020 bewusst etwas schlechter festgelegt, damit die mittleren Fälle mit ungünstiger Geometrie und den für Luxemburg bestandstypischen Hemmnissen erfasst werden. Sie liegen zwischen 0,25 W/m²K für das Dach und 0,40 W/m²K für die Kellerdecke (siehe Tabelle 2.5, 3. Zeile). Im Effizienz-Plus-Szenario wurden demgegenüber mit 0,18 W/m²K für das Dach und 0,15 W/m²K für die Kellerecken deutlich niedrigere Werte gewählt, die in etwa den Werten der deutschen Studie entsprechen (siehe Tabelle 2.5, 4. Zeile).

### Vergleich der U-Wert-Ensembles - Neubau

	U <sub>DA</sub>	U <sub>AW</sub>	U <sub>KD</sub>	U <sub>FE</sub> / g-Wert	WB-Zuschlag	n <sub>50</sub>
	[W/m <sup>2</sup> K]					[-]
Effizienz-Szenario, Neubau 2020	0,13	0,13	0,19	0,90/0,55	0,00	1,30
Effizienz-Plus-Szenario, Neubau 2020	0,11	0,11	0,18	0,80/0,55	0,00	0,55
KostOpti Lux, Klasse A	0,10	0,12	0,15	0,78	0,01	0,60

Tabelle 2.4  
Vergleich der U-Wert Ensembles der Effizienzszenerarien für 2020 mit den Werten der Kostenoptimalitätsstudie für Klasse A  
Quelle: (MdE 2014a).

### Vergleich der U-Wert-Ensembles - Bestandssanierung

	U <sub>DA</sub>	U <sub>AW</sub>	U <sub>KD</sub>	U <sub>FE</sub> / g-Wert	WB-Zuschlag	n <sub>50</sub>
	[W/m <sup>2</sup> K]					[-]
Effizienz-Szenario, Bestand 2020	0,25	0,25	0,40	1,30/0,65	0,00	1,30
Effizienz-Plus-Szenario, Bestand 2020	0,18	0,18	0,35	1,05/0,55	0,00	1,30
KostOpti Lux, Klasse A	0,10	0,12	0,15	0,78	0,01	0,60
Kost Opti Lux, Klasse B	0,13	0,17	0,22	0,92	0,03	1,00
Kost Opti Lux, Klasse C	0,17	0,23	0,28	1,12	0,05	2,00

Tabelle 2.5  
Vergleich der U-Wert Ensembles der Effizienzszenerarien für die Bestandssanierung 2020 mit den Werten der Kostenoptimalitätsstudie für die Klassen A, B, C.  
Quelle: (MdE 2014a).

### 3 Ausgangssituation und -zustand

Die Erfassung und Dokumentation von Ausgangssituation und -zustand des Luxemburger Wohngebäudebestandes ist einerseits wesentlicher Bestandteil der Studie und stellt zugleich eine unverzichtbare Vorarbeit für die späteren szenarienbasierten Modellrechnungen dar. Im Mittelpunkt stehen hierbei die städtebaulichen und siedlungsstrukturellen Merkmale sowie die Gebäudegeometrie und die baulich-energetischen Eigenschaften der Gebäude. Weiter ist die Versorgungsstruktur zu erheben. Auf dieser Basis können die Energiekennwerte der Gebäude anhand von Bedarfsberechnungen bestimmt werden. Eine weitere für die Aufgabenstellung zentrale Erhebung betrifft die Klassifizierung der Eingriffsempfindlichkeit der vorhandenen Bausubstanz.

#### 3.1 Strategische Gruppen im Hinblick auf die Bewertung der Eingriffsempfindlichkeit

Eine denkmal- und gestaltverträgliche Durchführung von energetischen Maßnahmen an Gebäuden muss die Empfindlichkeit der Bausubstanz gegenüber den jeweiligen Eingriffen mitberücksichtigen. Beispielsweise existieren ganz offensichtlich Fälle, bei denen ein Außenwärmeschutz nicht in Frage kommt. Aufgabe verantwortungsvoller Hausbesitzer, Architekten und Ausführender kann hier nur sein, sich schützend vor die entsprechenden Bauteile zu stellen und alternative Lösungsansätze zu suchen – bis hin zum Verzicht auf jegliche Energieeffizienzmaßnahmen.

Zur Bestimmung der verträglichen Ausführbarkeit von Energieeffizienzmaßnahmen im Bestand ist es notwendig, jedes Gebäude für sich in Augenschein zu nehmen und sinnvolle Bewertungs- und Abgrenzungskriterien zu entwickeln. Für die

Modellbildung des gesamten Wohngebäudeparks Luxemburgs werden auf einer ersten, stark vereinfachenden Stufe drei strategische Gruppen unterschieden:

#### **Denkmalgeschützter Bestand**

Energieeffizienzmaßnahmen können nur in Abstimmung mit den Denkmalschutzbehörden ausgeführt werden. Bestandserhalt und Sicherung des ursprünglichen Erscheinungsbildes haben Vorrang. Welche Effizienzmaßnahmen verträglich ausgeführt werden können, ist in jedem Einzelfall genau zu prüfen.

#### **Bedingt sanierbarer Bestand**

Diese Fälle umfassen alle Bestandsbauten, bei denen aus baukulturellen Gründen bestimmte Energieverbesserungsmaßnahmen (z.B. Außendämmungen, Fensteraustausch, Einzellüftungsgeräte an der Fassade) nicht ausgeführt werden können. Auch hier kann die Klärung der Verträglichkeit bzw. Ausführbarkeit nur im Einzelfall entschieden werden.

#### **Voll sanierbarer Bestand**

Hier lassen sich alle Energieeffizienzmaßnahmen aus baukultureller Sicht vollumfänglich ausführen. Dies erfordert jedoch bei jedem Einzelfall auch in gestalterischer Hinsicht besondere Sensibilität. Energieeffizienz ist keine Entschuldigung für entstellende Eingriffe. Weitere Hemmnisse können Platzmangel oder nachbarrechtliche Belange darstellen.

#### **Neubau ab 2010**

Im Neubau liegen im Regelfall keine Einschränkungen hinsichtlich der Durchführbarkeit von Effizienztechnologien oder bei der Integration von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder von erneuerbaren Heizsystemen vor.

### 3.2 Einteilung des Bestands in Baualtersklassen

Die Bildung einer Gebäudetypologie beruht ganz wesentlich auf der Einteilung des Gebäudebestands in Baualtersklassen (BAK). Aus drei Gründen ist das Baualter ein Schlüsselmerkmal für die energetischen Untersuchungen: Erstens lassen sich so in erster Näherung die energetischen Eigenschaften der Gebäudehülle (z.B. U-Werte von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken, Fenstern) bestimmen. Dahinter steht die Beobachtung, dass die Baukonstruktionen von bestimmten Bauepochen in dieser Hinsicht relativ einheitlich sind. Zweitens ist die Kenntnis des Baujahres wichtig, weil dieses den Ausgangspunkt für die Bestimmung der allfälligen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen darstellt. Dies ist für die energetische Untersuchung elementar, weil im Berechnungsmodell die Zeitpunkte für die energetischen Modernisierungsmaßnahmen aus ökonomischen Gründen immer mit ohnehin anstehenden Instandsetzungen und Erneuerungen zusammenfallen.

Dieses „Kopplungsprinzip“ wird im nächsten Unterabschnitt näher begründet und erläutert. Drittens enthalten zeitlich homogene Bestände mit Siedlungscharakter immer auch das Potenzial für weitergehende städtebauliche Maßnahmen in Kombination mit energetischen Modernisierungen, wie Nachverdichtungen – beispielsweise in Form von Dachgeschossausbau, Aufstockungen und Schallschutzbebauungen und sonstigen Ergänzungsbauten – oder eine Umgestaltung des Wohnumfelds. In Luxemburg, das haben unsere Begehungen gezeigt, sind derartige Potenziale an mehreren Stellen erkennbar vorhanden.

Die Einteilung in Baualtersklassen folgt der Klassifizierung in den verfügbaren Statistiken zu Anzahl, Art und Fläche der Gebäudetypen:

- BAK 1 (bis 1919)
- BAK 2 (1920 - 1944)
- BAK 3 (1945 - 1960)

- BAK 4 (1961- 1970)
- BAK 5 (1971 - 1980)
- BAK 6 (1981 - 1990)
- BAK 7 (1991 - 2000)
- BAK 8 (2001 - 2010)

Die ersten gesetzlichen Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle wurden in der WSV 1995 (Wärmeschutzverordnung) verankert. Die ersten gesetzlichen Anforderungen an Hülle und Wärmeversorgungssystem wurden im RGD von 2008 als Umsetzung der EPBD definiert (European Commission 2010). Eine Verschärfung des RGD trat Anfang 2017 in Kraft. Für die Dekaden, in denen diese gesetzlichen Änderungen in Kraft traten, also BAK 7, 8 und 9 wurden gemittelte Werte angenommen (z.B. mittlerer U-Wert vor Einführung WSV und mittlerer U-Wert nach Einführung WSV).

### 3.3 Bestimmung des energetischen Ausgangszustands der Gebäude

Die realitätsnahe Bestimmung der Ausgangssituation und des Ausgangszustandes ist eine wichtige Grundvoraussetzung für alle zukunftsorientierten energetischen Untersuchungen. Hierbei stellen sich eine Reihe von Fragen, die die aktuelle Diskussion, wie sich die Ziele der Pariser Klimakonferenz im Wohngebäudebestand umsetzen lassen, im Kern betreffen. Dazu zählen:

- Wie hoch ist der Energieverbrauch der Bestandsgebäude?
- Welche Rolle spielen hierbei die Besonderheiten des Einzelfalls?
- Lassen sich systematische Zusammenhänge identifizieren, die es ermöglichen, im Hinblick auf Baualter, Nutzungs- und Gebäudeart sowie Hauptkonstruktionen homogene Gebäude in einer Typologie zusammenzuführen?
- Welche Rechenansätze zur Bestimmung der Heizwärme-, Endenergie- und Primärenergiebilanz sowie zur Bestim-

mung der Treibhausgasemissionen ermöglichen es, die Verbrauchswerte realitätsnah abzubilden?

- Wie lassen sich verlässliche Nutzungsrandbedingungen bestimmen?

Die Beantwortung dieser Fragen ist wichtig, wenn es um die Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und die Verfolgung der langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudebestand geht. Benötigt wird eine verlässliche Basis, um die Wirksamkeit, die Kosten sowie die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen zuverlässig abzuschätzen.

Heute übliche Berechnungsverfahren führen in der Praxis häufig zu unrealistisch hohen Bedarfsabschätzungen und damit zu Überschätzungen der Einsparpotenziale (vgl. Schröder et al. 2011). Bildlich gesprochen wird der Gebäudebestand „systematisch schlechtgerechnet“. Auf der Basis von unrichtigen Rechenwerten für Ausgangs- und Sanierungszustand kann keine belastbare Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgen. Ebenso gilt, dass sofern bereits der Ausgangszustand unzutreffend bestimmt ist, auch die künftigen Sanierungsschritte nicht realitätsnah abgebildet werden. Derartig methodisch fragwürdige Rechenansätze sind für die hier vorgesehene Untersuchung nicht geeignet.

Andererseits existieren im deutschsprachigen Raum eine Reihe systematischer Untersuchungen und daraus entwickelter Rechenverfahren, die es ermöglichen die Verbrauchswerte von Neubauten und Bestandgebäuden hinreichend genau zu berechnen. Sie basieren auf Rechenansätze der internationalen Norm ISO 13790. Entscheidend ist ferner, dass die Nutzungs- und Klimarandbedingungen sorgfältig und realitätsnah bestimmt werden. Beispiele hierfür sind das Berechnungsverfahren des Instituts für Wohnen und Umwelt (LEG Energiepass Heizung-Warmwasser) und das Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP). Entscheidend für ihre Eignung ist, dass die Rechenansätze über Messungen und dynamischen Simu-

lationen validiert wurden. Für die Bestimmung der Bedarfswerte wird in dieser Studie ein einfaches stationäres Jahresbilanzverfahren verwendet, das sich eng an die beiden der o.g. Rechenverfahren anlehnt. Es wird im folgenden Abschnitt genauer vorgestellt.

### **Teil- und Vollbeheizung**

Als nutzungsspezifischer Aspekt spielt im un- und teilsanierten Bestand die räumliche und zeitliche Teilbeheizung der Wohnungen eine große Rolle. Häufig werden von den Bewohnern nur die Küchen, Ess- und Wohnzimmer vollständig beheizt, während bestimmte Zimmer bzw. Raumgruppen nur zeitweise oder gar nicht geheizt werden. Dadurch befindet sich die durchschnittliche Raumtemperatur der gesamten Wohnung deutlich unter der Normtemperatur von 20 °C, die bei Bedarfsberechnungen verwendet wird. Typischerweise liegen diese dann im Bereich zwischen 17 und 19 °C, fallweise sogar noch niedriger. Berücksichtigt man diesen Aspekt nicht bei den Berechnungen, sind die Heizenergie-Verbrauchswerte systematisch niedriger als die Heizenergie-Bedarfswerte.

Zusätzlich finden sich in umfangreicheren Beständen auch immer gewisse Anteile von Leerständen oder temporären Nutzungen (z.B. Ferienwohnungen), die ebenfalls zu geringeren Verbräuchen führen. Der gegenteilige Effekt zeigt sich, sobald diese Bestandbauten wenigstens auf Niedrigenergiestandardniveau modernisiert werden. Dann realisieren die Bewohner, wie auch in heutigen Neubauten, höhere Temperaturniveaus von 20 - 24 °C (typischer Mittelwert: 21°C) indem sie von Teil- auf Vollbeheizung übergehen.

### **Lüftungsverhalten und Außenluftwechsel**

Ein weiterer stark nutzungsabhängiger energetischer Parameter ist der Außenluftwechsel. Dieser setzt sich aus dem Fugen- und dem Fensterluftwechsel zusammen. Messungen in bewohnten Häusern zeigen neben den starken Unterschieden zwischen einzelnen Nutzern, die in „Viel-, Mittel- und Wenig-

Kennwerte der Gebäudetypen des Bestandes im Ausgangszustand 2010						U-Werte in W/m²K				g-Wert
Kürzel	BAK	strategischer Typ	Z	WE	EBF [m²]	Dach	Wand	Kellerdecke	Fenster	Fenster
10_EFH_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	1,0	168,0	1,80	1,60	1,10	2,60	0,75
11_EFH_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	156,0	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
12_EFH_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	156,0	1,20	1,00	1,00	2,30	0,75
13_EFH_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	160,0	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
14_EFH_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	168,0	0,60	0,60	0,80	2,00	0,65
15_EFH_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	180,0	0,50	0,60	0,60	2,00	0,65
16_EFH_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	187,0	0,40	0,45	0,50	1,80	0,65
17_EFH_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	200,0	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
24_DH_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	1,1	166,1	1,80	1,40	1,10	2,60	0,75
25_DH_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	157,3	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
26_DH_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	155,1	1,20	1,20	1,00	2,30	0,75
27_DH_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	158,4	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
28_DH_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,0	148,0	0,60	1,00	0,80	2,00	0,65
29_DH_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	170,5	0,50	0,90	0,60	2,00	0,65
30_DH_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	176,0	0,40	0,45	0,50	1,80	0,65
31_DH_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	190,3	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
38_RH_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	1,1	149,6	1,80	1,60	1,10	2,60	0,75
39_RH_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	146,3	1,40	1,40	0,80	2,30	0,75
40_RH_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	146,3	1,20	1,30	1,00	2,30	0,75
41_RH_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	147,4	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
42_RH_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	148,5	0,60	0,80	0,80	2,00	0,65
43_RH_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_EFH	3,0	1,1	155,1	0,50	0,60	0,60	2,00	0,65
44_RH_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_EFH	3,0	1,1	159,5	0,40	0,50	0,50	1,80	0,65
45_RH_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_EFH	2,0	1,1	169,4	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
52_MFH<10_A	bis 1919	Bed_sanierbar	2,0	3,1	235,6	1,80	1,40	1,10	2,60	0,75
53_MFH<10_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	3,1	238,7	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
54_MFH<10_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,0	316,0	0,80	1,00	1,00	2,30	0,75
55_MFH<10_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,8	398,4	0,80	1,10	1,00	2,00	0,65
56_MFH<10_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_MFH	3,0	4,8	403,2	0,60	0,90	0,80	2,00	0,65
57_MFH<10_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_MFH	3,0	4,8	403,2	0,50	0,60	0,60	2,00	0,65
58_MFH<10_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,8	398,4	0,40	0,50	0,50	1,80	0,65
59_MFH<10_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_MFH	2,0	4,9	436,1	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65
66_MFH>10_A	bis 1919	Bed_sanierbar	3,0	11,0	847,0	1,80	1,60	1,10	2,60	0,75
67_MFH>10_B	1920 - 1945	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	11,0	858,0	1,40	1,20	0,80	2,30	0,75
68_MFH>10_C	1946 - 1960	Bestand_bis_2010_MFH	3,0	11,0	880,0	1,20	1,20	1,00	2,30	0,75
69_MFH>10_D	1961 - 1970	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	12,0	996,0	0,80	1,00	1,00	2,00	0,65
70_MFH>10_E	1971 - 1980	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	12,0	1020,0	0,60	1,00	0,80	2,00	0,65
71_MFH>10_F	1981 - 1990	Bestand_bis_2010_MFH	5,0	12,0	1008,0	0,50	0,70	0,60	2,00	0,65
72_MFH>10_G	1991 - 2000	Bestand_bis_2010_MFH	5,0	13,0	1079,0	0,40	0,50	0,50	1,80	0,65
73_MFH>10_H	2001 -2010	Bestand_bis_2010_MFH	4,0	12,0	1068,0	0,30	0,35	0,40	1,50	0,65

Tabelle 3.1  
Auflistung aller Bestandstypen der Gebäudetypologie mit Angabe der Baualtersklasse, Geschosshöhe (Z), der Anzahl der Wohneinheiten (WE), der Energiebezugsfläche (EBF), und den U-Werten der Außenbauteile (Dach, Wand, Kellerdecke, Fenster) sowie dem g-Wert der Fenster. Die Werte beziehen sich auf den Ausgangszustand im Jahr 2010.

lüfter“ (vgl. Reiß/Erhorn/Ohl 2001) eingeteilt werden können, auch eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit des Außenluftwechsels. Während im Sommer und in den Übergangszeiten viel gelüftet wird, sinken die Luftwechselraten bei Fensterlüftung im Kernwinter stark ab. Dies führt einerseits häufig zu ungenügender Luftqualität in Wohnungen, Klassenzimmern und anderen Hauptnutzungsräumen. Andererseits liegen dadurch die Lüftungswärmeverluste in Bestandsgebäuden häufig deutlich unter den Bedarfswerten, die unter Zugrundelegung von Standardnutzungskennwerten berechnet wurden und die sich aus guten Gründen an einem hygienisch ausreichenden Luftwechsel orientieren. Diese Frage wird im folgenden Kapitel nochmals aufgegriffen, wenn es um die Bestimmung des Rechenwertes für den energetisch wirksamen Luftwechsel im Kohortenmodell geht.

#### **Letzte umfangreiche Sanierung**

In den meisten Fällen stimmen die Zustände der vorgefundenen Gebäude nicht mehr mit dem ursprünglichen Zustand überein. Selbst bei denkmalgeschützten Gebäuden sind in der Vergangenheit bestimmte Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen durchgeführt worden, allerdings nur in wenigen Fällen auch in Kombination mit energetischen Maßnahmen. Von den voll sanierbaren Gebäuden haben bereits einige umfangreichere energetische Sanierungen hinter sich, die jedoch nicht immer eine zukunftsweisende Qualität aufweisen. In den anderen Fällen sind die bislang ausgeführten energetischen Maßnahmen am Gebäude auf Teilschritte beschränkt, die oftmals wenig systematisch ausgeführt worden sind. Typisch hierfür sind beispielsweise:

- Teildämmung bestimmter Fassadenbereiche (z.B. Brandwände).
- Austausch von einzelnen Fenstern und Verglasungen mit unterschiedlichen energetischen Qualitäten.
- Speziell bei Flachdachsanierungen und Dachausbauten wurden regelmäßig Dachdämmungen ausgeführt.

Soweit möglich, wurden die bisher bereits durchgeführten Sanierungen bei der Bestimmung der Ausgangswerte, die in Tabelle 3.1 für jeden Gebäudetyp dokumentiert ist, berücksichtigt. Dies erfolgte über eine Auswertung von Energieausweisen, die Befragung von Experten und Vor-Ort-Begehungen. Jedoch wird hier darauf hingewiesen, dass die genannten Werte gewisse Unsicherheiten beinhalten. Im Laufe des Betrachtungszeitraums, d.h. nach einigen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen im Bestand, spielen diese Fehler eine immer geringere Rolle bei der Bestimmung der Heizwärme-Kennwerte. Sie geraten, bildlich gesprochen, immer mehr „in Vergessenheit“.

### **3.4 Wärme- und Stromversorgung**

Die Struktur der Wärmeversorgung des Wohngebäudeparks wurde anhand der verfügbaren statistischen Daten in Abhängigkeit vom strategischen Gebäudetyp modelliert (siehe Kapitel 4.7). Dabei wurde besonderer Wert auf eine sorgfältige Modellierung des Ausgangszustands gelegt. Das derzeitige System ist durch einen vergleichsweise hohen Anteil von ca. 90% an fossilen Energieträgern geprägt.

Das Stromversorgungssystem wurde in den Szenarien nicht für Luxemburg getrennt, sondern als gemeinsames System mit Deutschland modelliert. Aufgrund des hohen Anteils an Stromimporten (Deutschland, Belgien und Frankreich) erscheint diese Vorgehensweise als gerechtfertigt (nähere Begründung siehe Kapitel 4.7). Für Deutschland existieren darüberhinaus eine Vielzahl von Energie-Langfristszenarien, aus denen sich die künftige Entwicklung der Stromversorgung bestimmen lässt. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, dass sich gerade hier aus den sonstigen Vorgaben in jedem Szenario erhebliche Unterschiede zwischen den Szenarien ergeben, die ebenfalls in Kapitel 4.7 genauer beschrieben sind.



## 4 Szenarien und Modellbildung

Die zentrale Untersuchungsfrage der Studie lautet, wie die energetischen Zielsetzungen Luxemburgs in der kurz-, mittel- und langfristigen Perspektive erreicht werden können und welche Maßnahmen im Sektor der privaten Haushalte zu treffen sind. Hierbei wird nur die Betriebsenergie (Heizen, Lüften, Warmwasser und sämtliche Stromwendungen in den Wohngebäuden) betrachtet. Eine derartige Fragstellung lässt sich nicht direkt beantworten, sondern erfordert das Durchspielen verschiedener Handlungsstrategien, z.B. mit Hilfe von Modellen und Szenarien. In diesen werden die wesentlichen dynamischen Veränderungen, ausgehend von heute zu beobachtenden Entwicklungen, über verhältnismäßig lange Zeiträume von mehreren Jahrzehnten abgebildet.

Szenarien stellen komplexe „Wenn-Dann“-Aussagen dar. Dabei können unterschiedliche Motivationen oder Zielsetzungen zu Tragen kommen. Zunächst ist es wichtig, Szenarien

von Prophezeiungen oder Prognosen zu unterscheiden, die entweder unbedingte Aussagen enthalten oder Vorhersagen mit (behaupteter) hoher Eintrittswahrscheinlichkeit aufstellen. Szenarien hingegen können immer nur bedingte Aussagen treffen, d.h., sie sind an die getroffenen Randbedingungen und Annahmen gebunden und haben nicht den Anspruch, dass die beschriebenen Entwicklungen auch tatsächlich so eintreffen werden. Szenarien haben vielmehr das Ziel aufzuzeigen, welchen Einfluss bestimmte Entscheidungen oder Handlungsoptionen auf die künftige Entwicklung eines Systems oder einer Gesellschaft haben können. Aus methodischen Gründen werden häufig mehrere Szenarien entwickelt. Dabei werden prinzipielle Handlungspfade in Bezug auf gesellschaftliche und politische Entscheidungsoptionen und deren Konsequenzen gegenübergestellt. Je nach Aufgabenstellung, Motivation oder Zielsetzung lassen sich verschiedene Typen von Szenarien unterscheiden (siehe Abb. 4.1):

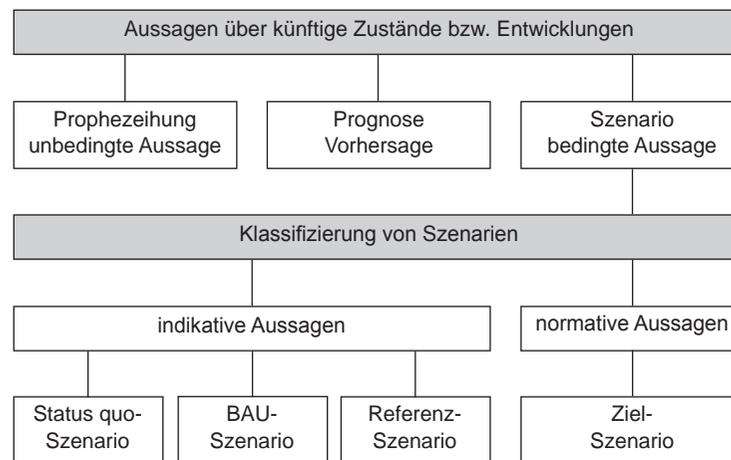


Abbildung 4.1  
Abgrenzung zwischen Prophezeiung, Prognose und Szenario. Klassifizierung von Szenarien nach Art und Weise der beabsichtigten Aussagen. Inhalt und Darstellung wurden in Anlehnung an (ewi/prognos 2005 S. 2) leicht abgewandelt.

- In Referenz- bzw. Business-as-usual-(BAU)-Szenarien werden langfristige Entwicklungstrends mit wahrscheinlichen Reaktionen von Wirtschaft, Gesellschaft und Politik auf heute bereits übersehbare künftige Problemstellungen und Herausforderungen verknüpft. Beispielsweise werden energiepolitische Weichenstellungen wie die Förderungen und der bisher erfolgte Ausbau der erneuerbaren Energieversorgungen oder die bisherige Klimaschutzpolitik miteinbezogen.
- Im Gegensatz dazu wird in Zielszenarien versucht das Augenmerk auf normative Aussagen zu richten, d.h., sie orientieren sich an übergeordneten Zielen, die als allgemein wünschenswert gelten und versuchen herauszuarbeiten, unter welchen Randbedingungen und mit welchen Mitteln diese Ziele erreicht werden können.

Kurzbezeichnung Szenario	Raumwärme - Heizung	Warmwasserbereitung	Lüftung	Haushaltsgeräte / Beleuchtung
„BUSINESS - AS - USUAL“	Effizienzverbesserungen (Nutzenergiebedarf, energetische Qualität der Komponenten) orientieren sich an heute absehbaren Tendenzen (Neubau: RGD 2016; Altbau: leichte Verbesserung bei Dämmqualitäten), Technologieentwicklungen bei Geräten und Haustechnik wie in der Vergangenheit zu beobachten; Stromversorgung gemäß Referenzszenario und Trendanalyse (ewi/gws/prognos 2014).			
	Moderate Effizienzsteigerungen bei Altbauanuerung; Umsetzung RGD 2016 im Neubau	Dezentrale Systeme werden nach und nach durch zentrale ersetzt	Ab 2017: Lüftung mit Wärmerückgewinnung wird Standard, im Bestand setzen sich diese nur allmählich durch.	Moderate Effizienzverbesserungen, wie in der Vergangenheit zu beobachten
„EFFIZIENZ“	Die energetischen Qualitäten der Bau- und Technikkomponenten orientieren sich am Kostenoptimum im Neubau (RGD 2016 im Neubau) bzw. dem Kostenoptimum bei energetischen Sanierungen im Bestand (EnerPhit-Standard). Bei Erneuerungen von Technikkomponenten (Haustechnik, Haushaltsgeräte, Beleuchtung) werden Altgeräte durch energieeffiziente Geräte ersetzt. Der Ausstieg aus Ölheizungen wird bis 2060 vollzogen. Die Stromerzeugung erfolgt gemäß dem „Langfristszenario 2011 A“ (Nitsch et al. 2012).			
	Ab 2020: Neubau gleichwertig wie Passivhaus-Standard; Energetische Modernisierungen mit Passivhauskomponenten	Einsatz wassersparender Armaturen; WW-Anschlüsse für Waschmaschinen und Geschirrspüler Hochwertige Dämmung Leitungen	Ab 2020: vermehrt Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung auch bei Modernisierungen im Bestand	Ausstattung und Erneuerung von Geräten/Beleuchtung mit stromeffizienten Geräten (Bestgeräte)
„EFFIZIENZ - PLUS“	Nochmals gesteigerte Energieeffizienz durch heute absehbare technologische Weiterentwicklungen, insbesondere bei Bauteilen (Hüllkonstruktionen Hochleistungsfenster, Vorgefertigte wärmebrückenfreie Anschlusskomponenten) und Technikkomponenten (Wärmepumpensysteme, Pumpen und sonstige Hilfsaggregate, Lüftungsanlagen, Haushaltsgeräte); Stromerzeugung gemäß dem „Szenario 2013“ (Nitsch 2013).			
	Gegenüber Effizienz-Szenario nochmals verbesserte Qualitäten: - Hüllkonstruktionen (Dämmqualitäten, Vakuumdämmung, u.ä.) - Wärmebrückenfreie Anschlüsse - Verbesserte Passivhausfenster - Effizientere Wärmepumpen	Besonders wassersparende Armaturen und Haushaltsgeräte Abwasser-Wärmerückgewinnung (z.B. Duschwasser)	Entwicklung von hochwertigen Lüftungsanlagen mit höherer Stromeffizienz, verbesserter Dichtigkeit und Gerätedämmung. Luftqualitätsgesteuerte Volumenregelung.	Technologische Weiterentwicklungen bei Hauptverbrauchern im Haushalt (Kühlgeräte, Waschmaschinen, Trockner, Geschirrspüler) durch den Einsatz von Steuerelektronik, Wärmepumpen und Vakuumdämmungen

Tabelle 4.1: Kurzübersicht zu den wesentlichen Randbedingungen und Annahmen in den Szenarien. Quelle: abgeändert nach (Vallentin 2011, S. IV-3).

## 4.1 Beschreibung der Szenarien

Szenarien erzählen eine Geschichte, indem sie versuchen, künftige Entwicklungen zu beschreiben. Das hier betrachtete System ist der Wohngebäudepark Luxemburgs und sein künftig zu erwartender Energiebedarf sowie die dadurch verursachten Treibhausgasemissionen. Geklärt werden soll, mit welchen Maßnahmen, Standards und Strategien die langfristigen Ziele bis 2050 erreicht werden können. Um diese Frage beantworten zu können, wurden vier Hauptszenarien gebildet (siehe Tab. 4.1):

### Status-quo-Szenario

Das Status-quo-Szenario hat eine methodische Funktion als Vergleichsmaßstab. Die energetischen Qualitäten des Jahres 2010 werden hier unverändert in die Zukunft fortgeführt, d.h. es wird angenommen, dass danach keine technologischen Veränderungen stattfinden. Im Gegensatz dazu werden die Mengenkomponenten (z.B. Bevölkerung, Wohnflächen) wie in den anderen Szenarien weiterentwickelt. Dadurch wird es möglich, die Effizienzsteigerungen und Dekarbonisierungserfolge der anderen Szenarien zu quantifizieren. Damit dient das Status-quo-Szenario quasi als Eichmaßstab und Referenz für die erreichten Energie- und Emissionsminderungen.

### Business-as-usual-Szenario

Das Business-as-usual-Szenario beschreibt eine Strategie des „Weiter wie bisher“. Im Neubau heißt dies die vollumfängliche Umsetzung der RGD 2016, die künftig sehr hohe Effizianz Anforderungen zum Standard erhebt. Bei energetischen Modernisierungen werden zunächst nur die in der Vergangenheit üblichen Baukomponenten eingesetzt. Nur zögerlich kommen bessere Qualitäten zum Zuge. Die energetischen Kennwerte der sanierten Bauteile und Lüftungskonzepte entsprechen damit erst auf längere Sicht in etwa Niedrigenergiequalität. Die Wärme- und Stromversorgung im Business-as-usual-Szenario bleibt auch nach 2020/30 wegen der weiterhin hohen Bedarfs-

werte noch länger auf fossile Energieträger gestützt. Im Hinblick auf die Struktur der Wärmeversorgung werden die beobachteten Trends der letzten Jahre unverändert fortgesetzt. Die Struktur der Stromerzeugung entspricht dem Referenz-Szenario und der Trendanalyse (ewi/gws/prognos 2014) für die Stromerzeugung in Deutschland. Darin sind die aktuell durchgeführten bzw. die bereits beschlossenen Maßnahmen sowie die sich daraus ableitbaren Trends der künftigen Entwicklung im deutschen Kraftwerkspark abgebildet.

### Effizienz-Szenario

Im Effizienz-Szenario wird eine andere Zukunft beschrieben, in der die energetischen Maßnahmen auf die langfristigen Effizienz- und Klimaschutzziele Luxemburgs ausgerichtet sind. Im Neubau sind aufgrund der Einführung des hochwertigen Standards der RGD 2016 durch regelmäßige Fortschreibungen nur noch geringere Verbesserungen erzielbar. Hingegen kommen bei Modernisierungen im Bestand und den zugehörigen Versorgungslösungen deutlich bessere Qualitäten als im Business-as-usual-Szenario zum Einsatz, die sich langfristig an denen des Neubaus orientieren. Hier weisen die gebäudebezogenen Komponenten (Außenwände, Fenster, Dächer, Kellerdecken, Lüftungskonzepte, Elektrogeräte) eine hohe Qualität auf, z.B. Passivhauskomponenten, ohne die Kriterien des Passivhausstandards im Einzelnen einhalten zu müssen. Im Altbau erfolgt der Einsatz von Effizienzmaßnahmen (z.B. Aussenwärmeschutz) nur dort, wo dies unter Denkmalschutzaspekten verträglich ist. Wegen des geringeren Wärme- und Strombedarfs der Gebäude kann der Anteil der erneuerbaren Energieträger im Vergleich zum Business-as-usual-Szenario deutlich gesteigert werden. Dies hat mittel- bis langfristig direkte Auswirkungen auf die Struktur der Wärmeversorgung, die einen Ausstieg aus den fossilen Brennstoffen im Zeitraum von 2050 - 2060 in greifbare Nähe rücken. Die Stromerzeugung wurde gemäß dem „Szenario 2011 A“ (Nitsch et al. 2012) modelliert. Dieses orientiert sich an dem Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 % gegenüber 1990. Dafür ist es

notwendig bis 2050 den Anteil erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung auf ca. 85 % ausgehend vom derzeitiger Anteil von ca. 32 % zu steigern.

### **Effizienz-Plus-Szenario**

Dieses explorative Szenario versucht abzuschätzen, wie die Auswirkungen von künftigen, bereits heute absehbaren, technologischen Weiterentwicklungen bei den bau- und haustechnischen Systemen auf die Effizienz- und Klimaschutzstrategien sein könnten. Im Effizienz-Plus-Szenario werden darüber hinaus bei Modernisierungen im Bestand dann Innendämmungen eingesetzt, wenn ein Außenwärmeschutz nicht in Frage kommt. Sie werden immer dann ausgeführt, wenn ohnehin eine Fenstererneuerung ansteht. Zusätzlich kommen ab 2020/30 im Neubau und bei allen energetischen Modernisierungen gegenüber dem Effizienz-Szenario nochmals deutlich verbesserte Technologien bei Fenstern, Dämmsystemen und Lüftungsanlagen zum Einsatz. Zusätzlich werden ab 2020/30 die Gebäude konsequent mit Elektrogeräten mit besonders hoher Stromeffizienz ausgestattet. Es wird erwartet, dass diese höheren Qualitäten bis dahin dem Kostenoptimum entsprechen und von daher auch wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar sind. Dahinter steht die Beobachtung, dass die technologischen Entwicklungen im Bereich der Effizienzmaßnahmen und bei den regenerativen Energiesystemen i.d.R. viel schneller und durchgreifender erfolgen, als zunächst vermutet. Dies hat auch Auswirkungen auf die Struktur der Wärmeversorgungen, weil durch den, gegenüber dem Effizienz-Szenario nochmals geringeren Wärmebedarf, auch die Anteile regenerativ gestützter Wärmeversorgungen steigen kann. Im Hinblick auf die Stromerzeugung folgt das Effizienz-Plus-Szenario den Vorgaben des „Szenario 2013“ (Nitsch 2013). Dieses orientiert sich an dem Ziel einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990. Dafür ist die Transformation des gegenwärtigen Energiesystems zu einer nahezu vollständig erneuerbaren Energieversorgung notwendig. Das beinhaltet dann auch eine Speicherstruktur in Form des Einstiegs in die Wasserstoffwirtschaft

bzw. die Erzeugung relevanter Mengen erneuerbaren Methans in die Gasnetze bzw. bereits vorhandene Gaskavernen.

Genauere Angaben zur Stromerzeugung und der KWK-Produktion in den Szenarien finden sich am Ende des Kapitels in Abschnitt 4.7.

## **4.2. Bilanzierung in den Szenarien**

In der Übersichtsdarstellung Abbildung 4.2 sind die wesentlichen Bilanzgrößen und deren gegenseitigen Abhängigkeiten zusammengestellt:

- Der Heizwärmebedarf  $Q_H$  wird anhand der Bilanz der Wärmeströme innerhalb der Bilanzgrenze der Gebäudehülle (in Abb. 4.2 gestrichelt dargestellt) bestimmt. Die Wärmeverluste bestehen aus der Summe der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Die Wärmegewinne setzen sich aus den passiv-solaren und den internen Wärmegewinnen zusammen. Genauere Angaben zu den einzelnen Berechnungsschritten der in dieser Arbeit verwendeten stationären Bilanzverfahren (LEG Energiepass Heizung und Warmwasser) und (PHPP 2007), die sich an der internationalen Norm ISO 13790 orientieren, finden sich in den entsprechenden Handbüchern und in (Vallentin 2011, S. IV- 6 ff.; VI-46 ff. und VI-60).
- Der Heizenergiebedarf  $Q_{E,H}$  setzt sich aus dem Heizwärmebedarf und den Verlusten des Heizungssystem zusammen. Letztere beinhalten die Speicher-, Verteil- und Übergabeverluste sowie die Verluste der Wärmeerzeugung.
- Analog wird der Energiebedarf für Warmwasser  $Q_{E,TW}$  aus dem Nutzwärmebedarf für Warmwasser, den Speicher-, und Verteilverlusten sowie den Verlusten der Wärmeerzeugung bestimmt.
- Anders als in den in Luxemburg üblichen Bilanzverfahren (z.B. RGD 2016) werden alle Stromnutzungen in den Gebäuden berücksichtigt. Für die Szenarien ist dies zwin-

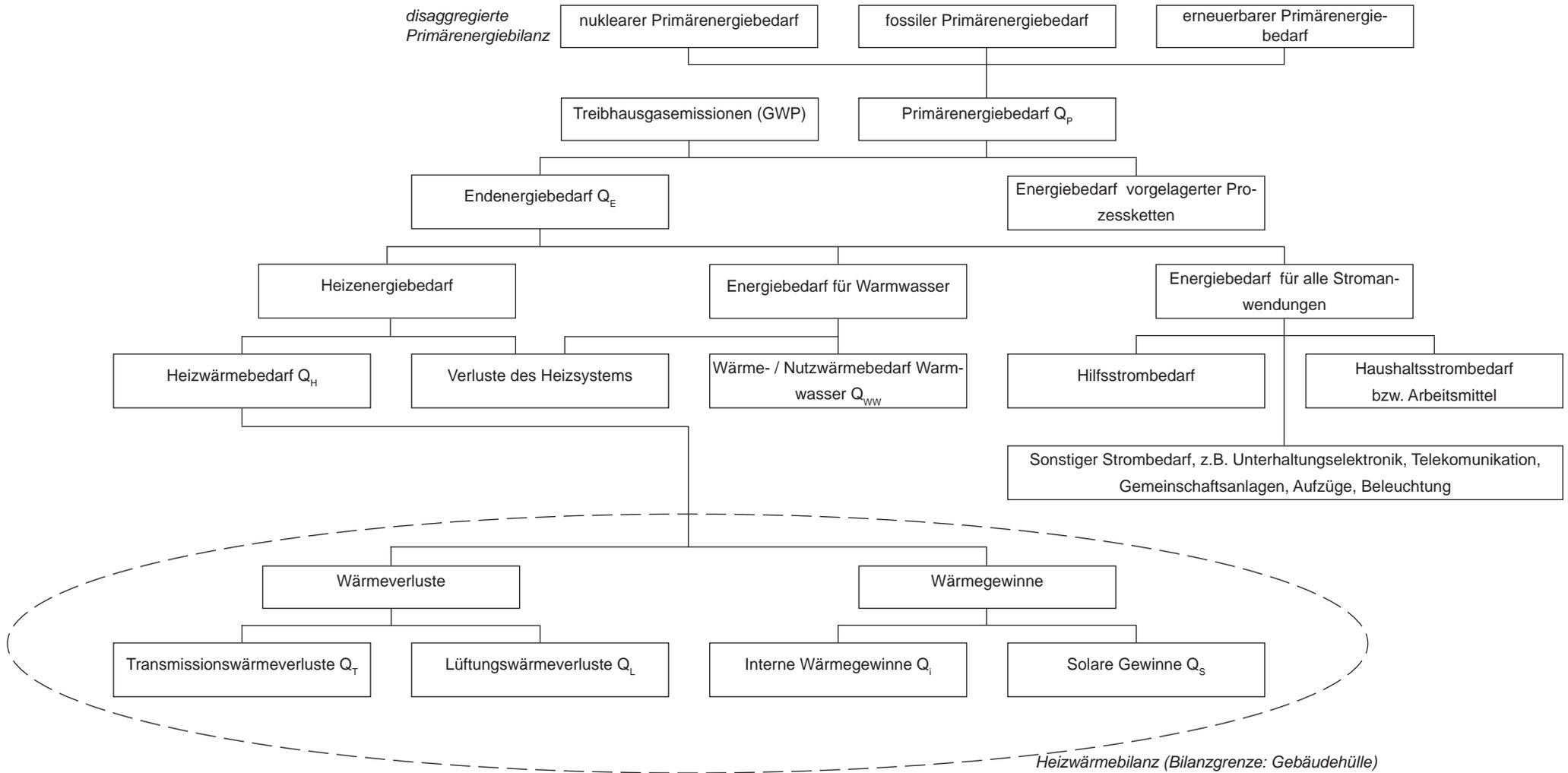


Abbildung 4.2: Systematik der Energiebilanzierung in den Untersuchungen. Bei der Primärenergiebilanz wird nur der nicht erneuerbare Teil (fossil, nuklear) ausgewiesen.  
 Quelle: (Vallentin 2011, S. IV-5).

gend, weil ansonsten der Energiebedarfs des Sektors der privaten Haushalte nur unvollständig wiedergegeben werden würde. Die Stromanwendungen umfassen den Hilfsstromeinsatz in der Haustechnik (z.B. Ventilatoren, Pumpen, Regelung), den Haushaltsstrombedarf (z.B. Kochen, Waschen, Trocknen, Kühlgeräte) und alle sonstigen Stromanwendungen (z.B. Beleuchtung, Telekommunikation, Unterhaltungselektronik, Aufzüge und sonstige Gemeinschaftsanlagen).

- Aus der Summe von Heizenergie-, Warmwasser- und Strombedarf wird der Endenergiebedarf  $Q_E$  berechnet. Diese Größe entspricht genau dem Energieinhalt (z.B. Heizwert) der eingesetzten Energieträger, wie sie sich über Zähler oder die Lieferungen frei Haus ablesen bzw. bestimmen lassen.
- Der Primärenergiebedarf bezieht darüberhinaus alle Vorketten eines Energieträgers mit ein, d.h. es wird zusätzlich der Energieaufwand für Exploration, Förderung, Transport, Umwandlungen und Lieferung frei Haus aufaddiert. Üblicherweise geschieht dies über Primärenergiefaktoren. Hierbei wird abhängig vom eingesetzten Energieträger der Primärenergieaufwand je Endenergieeinheit ausgewiesen.
- Die Treibhausgasemissionen werden ähnlich wie die Primärenergie über endenergiebezogene Emissionsfaktoren bestimmt, die angeben wie groß die  $CO_2$ -Äquivalent-Emissionen je Endenergieeinheit sind. Dabei werden neben Kohlendioxid auch die anderen treibhauswirksamen Gase zu einer Wirkungsgröße, dem sog. „Global Warming Potential“ (GWP), zusammengeführt.

Durch die Systematik der Energiebilanzierung sind die Bilanzgrenzen und damit auch der Betrachtungsrahmen der Szenarien festgelegt.

### 4.3 Kohortenmodell

Die denkbaren Entwicklungen im Luxemburger Wohngebäudepark 2010 - 2070 werden in einem Kohortenmodell dargestellt. Dort durchlebt jeder Repräsentant eines Gebäudetyps einen Lebenszyklus, d.h., es werden in vorgegebenen Zeitabständen Erneuerungs- und Ersatzmaßnahmen durchgeführt. Diese Zyklen sind von der mittleren Nutzungsdauer der entsprechenden Komponenten bzw. Bauteile abhängig (siehe Tab. 4.6, S. 65). Wie schon das Wort „Kohorte“ ausdrückt, wird eine größere Gruppe von repräsentativen Hausgruppen bzw. Gebäuden über den gesamten Betrachtungszeitraum im Hinblick auf die Veränderungen des energetischen Zustands gleichzeitig beobachtet bzw. modellhaft abgebildet. Dieses Modell hat den Vorteil, dass die Gesamtentwicklung über einen großen Zeitraum als Folge vieler individueller Einzelschritte nachvollziehbar bleibt. Damit ist es möglich, gleichzeitig die Trägheit aber auch die Dynamik des Gesamtsystems abzubilden. Das Modell weist ein hohes Maß an Transparenz auf, weil jeder Einzelschritt in seinen Auswirkungen auf das Gesamtsystem abgebildet wird. Dadurch kann vermieden werden, dass im Modell schwierig kontrollierbare, pauschale Annahmen getroffen werden müssen. Damit werden die energetischen Konsequenzen nachvollziehbar, die mit der Wahl verschiedener energetischer Qualitäten bei Sanierungs- bzw. Neubaumaßnahmen verbunden sind.

Gemäß dem Kopplungsprinzip wird davon ausgegangen, dass energetische Verbesserungen im Bestand immer in Kombination mit einer ohnehin anstehenden Maßnahme ausgeführt werden. Sobald beispielsweise der Anstrich oder der Außenputz einer Fassade erneuert wird, kann zusätzlich eine Außendämmung (z.B. in Form eines Wärmedämmverbundsystems) angebracht werden. Dies erhöht die Wirtschaftlichkeit der energetischen Maßnahmen erheblich und entspricht darüber hinaus dem zu beobachtenden Verhalten von Hausbesitzern und Wohnungseigentümern (vgl. Frondel et al. 2006, S. 89).

Das hier verwendete Kohortenmodell besteht aus insgesamt 70 Gebäudetypen. Dabei wurde die Systematik der deutschen Gebäudetypologie, wie sie in (IWU 2003) hergeleitet und dokumentiert ist, als Vorlage verwendet und auch für die künftigen Neubauten weitergeführt:

- Der heute vorhandene Gebäudebestand wird nach Baualter und Wohnform in Klassen eingeteilt.
- Die Abgrenzungen zwischen den Baualtersklassen orientieren sich an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und der Einführung neuer wärmetechnischer Vorschriften.
- Um verschiedene Gebäudegrößen abzubilden, wird zwischen Einfamilien-, Doppel-, Reihenhäusern sowie verschiedenen großen Mehrfamilienhäusern differenziert.
- Die Hüllgeometrien der Gebäudegruppen sowie die energetischen Eigenschaften der Bau- und Technikkomponenten wurden anhand von Planunterlagen und Informationen, die bei Vor-Ort-Begehungen erhoben wurden, bestimmt.
- Beim Neubau werden für jede Dekade neue Gebäudetypen modelliert. Damit kann die Einführung neuer Energiestandards und die technologische Weiterentwicklung von Bau- und Haustechnik berücksichtigt werden.

Die Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs im Kohortenmodell erfolgt über vollständige Energiebilanzen gem. (LEG Energiepass Heizung und Warmwasser) bzw. gem. (PHPP). Diese werden im Zeitabstand von 5 Jahren für alle 70 Gebäudetypen aufgestellt. Folgende Parameter fließen in die Berechnungen ein:

- Die Außenabmessungen der Hüllflächen, die das beheizte Volumen umschließen,
- Die U-Werte der opaken Hüllflächen,
- Die Fenster werden orientierungsabhängig mit ihren Flächen,  $U_w$ -Werten im eingebauten Zustand und den g-Werten der Verglasung erfasst.
- Für Verschattung, Rahmenanteil, Verschmutzung und nichtsenkrechten Strahlungseinfall wurde ein pauschaler

Abminderungsfaktor von 0,49 angesetzt.

- Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes (inklusive Einfluss der Luftdichtigkeit) wird über den resultierenden energetisch wirksamen Luftwechsel  $n_{L,eff}$  abgebildet.

### **Außenluftwechsel bei Fensterlüftung**

In Bestandsgebäuden erfolgt der Luftwechsel über Infiltration durch Leckagen in der Gebäudehülle und durch die Fensterlüftung der Bewohner. Hierbei stellt der Fensterluftwechsel eine stark nutzerabhängige Größe dar. Messungen in bewohnten Häusern zeigen, dass der Luftwechsel eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit hat und speziell im Kernwinter sehr geringe Werte annehmen kann. Die Fensteröffnungszeiten sinken dann auf Werte zwischen  $0,03 - 0,2 \text{ h}^{-1}$  ab (Reiß/ Erhorn/ Ohl 2001). Die gemessenen Mittelwerte für Außenluftwechsel während der Heizperiode in sanierten Bestandsgebäuden liegen bei Fensterlüftung durch die Bewohner zwischen  $0,18$  und  $0,33 \text{ h}^{-1}$ . Wurden bei der energetischen Modernisierung Lüftungsanlagen eingebaut, lagen die Luftwechselraten hingegen bei  $0,48 \text{ h}^{-1}$ . In allen Fällen wurden die Gebäude luftdicht ausgebildet. Der geringe Außenluftwechsel bei Fensterlüftung weist auf eine schlechte Innenluftqualität hin (Kah et al. 2005).

Der gewünschte Luftwechsel über Fenster, Abluftanlage oder Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung wurde in allen Szenarien am hygienischen Bedarf orientiert mit  $0,3 \text{ h}^{-1}$  angenommen.

Der zusätzliche Luftwechsel durch Infiltration wurde durch einen nach Gebäudetyp und Baujahr differenzierten Zuschlag berücksichtigt, so dass sich für Gebäude ohne Wärmerückgewinnung Gesamt-Luftwechselraten zwischen  $0,32$  und  $0,39 \text{ h}^{-1}$  ergeben.

Für Gebäude mit Wärmerückgewinnung ergeben sich niedrigere Werte des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels  $n_L$ . Die Annahmen für die verschiedenen Szenarien sind in den Tabellen 4.4, 4.5 und 4.6 beschrieben.

Die angegebenen Werte bezeichnen Mittelwerte der jeweili-

gen strategischen Typen, hängen also neben der gewünschten Luftwechselrate von  $0,3h^{-1}$  und dem nach Gebäudetyp und Baualter differenzierten zusätzlichen Infiltrationsverlust auch vom Anteil der Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung im jeweiligen strategischen Gebäudetyp ab.

### Nutzungs- und Klimaparameter

In der Heizwärmebilanz tauchen weitere Parameter auf, die die Nutzungsbedingungen widerspiegeln. Dazu zählen die Höhe der spezifischen internen Gewinne  $q_i$ , die Gradtagszahl  $G_T$ , die Anzahl der Heiztage, die Heizgrenztemperatur und der Reduktionsfaktor für Nachtabsenkung  $r_{NA}$ . Diese Kenngrößen sind teilweise abhängig vom energetischen Standard der Gebäude. Zur Bestimmung der exakten Werte für die Berechnungen im Kohortenmodell wurde daher für die Wohnbauten eine Klassifizierung nach der energetischen Qualität vorgenommen (siehe Tab. 4.2).

Die spezifischen internen Gewinne wurden generell niedriger als in den Rechenverfahren des Luxemburger Energiepasses angesetzt. Die heute gültigen Werte können zudem künftig durch geringere Belegungen und die Ausstattung der Gebäude mit stromeffizienten Geräten noch weiter abnehmen. Eine Nachtabsenkung hat vor allem in schlecht oder gering gedämmten Gebäuden eine verbrauchsmindernde Wirkung. Der entsprechende Reduktionsfaktor steigt mit Verbesserung der Standards immer mehr gegen 1,0 an.

Im Kohortenmodell wird durch spezielle Rechenansätze, die im Folgenden näher erläutert werden, berücksichtigt, dass im unsanierten Bestand die mittleren Raumtemperaturen aufgrund von Teilbeheizung (z.B. der Schlafräume) niedriger liegen. Der Einfluss der Teilbeheizung auf die Klimarandbedingungen ist durchaus komplex und nicht bis ins Einzelne erforscht. Denn dadurch ändern sich sowohl die mittlere Innentemperatur, die Heizgrenztemperatur, damit auch die Länge der Heizperiode und somit auch das solare Strahlungsangebot. Probeläufe zei-

Energetischer Standard	Luftwechsel mit/ohne LA* in $h^{-1}$	Spez. interne Gewinne in $W/m^2$	Gradtagszahl in $kKh/a$	Heizgrenztemperatur in $^{\circ}C$	Reduktionsfaktor Nachtabsenkung
<b>Wohngebäude:</b>					
Unsanierter Bestand	ca. 0,39	2,5 / 3,2***	63 - 70	15	0,92
Teilsanierter Bestand	ca. 0,38	2,5 / 3,2***	65 - 70	12 - 14	0,92
Bestand ab 1980	ca. 0,37	2,5 / 3,2***	65 - 75	12 - 14	0,95
Niedrigenergie(-sanierung)	ca. 0,35 / 0,35**	1,8 / 2,3***	75 - 80	11 - 13	0,98
Passivhaus(-sanierung)	ca. 0,07 - 0,13*	1,1 / 1,5***	80 - 83	10	1,00

gen jedoch, dass selbst mit Anwendung von Korrekturfaktoren die berechneten Bedarfswerte im Bestand deutlich höher liegen können als die gemessenen Verbrauchswerte. Neben der Teilbeheizung der Wohnungen sind offensichtlich weitere verbrauchsmindernde Effekte, z.B. aufgrund vorhandener Möbel an den Außenwänden, Dämmtapeten und geringeren Wärmebrücken bei Holzdeckenanschlüssen u.a. vorhanden; über einen Vergleich von berechneten Bedarfswerten mit gemessenen Verbrauchswerten wurde daher in (IWU 2003a, S. 2) ein empirischer „Nutzungsfaktor“ hergeleitet. Dieser berücksichtigt andererseits bei Niedrigenergie- und Passivhäusern deren Vollbeheizung und die dort regelmäßig vorhandenen höheren mittleren Raumtemperaturen im Winter von  $21 - 22^{\circ}C$ .

Diese Randbedingungen führen in der Tendenz zu höheren Bedarfswerten als die klassische Berechnung ohne Nutzungsfaktor. Der Nutzungsfaktor variiert zwischen Werten von 0,85 (unsanierte Altbauten) und 1,1 (Passivhäuser) und wird im Kohortenmodell bei der Berechnung der Heizwärmebilanzen berücksichtigt.

Tabelle 4.2

Zusammenstellung der gewählten Kennwerte zu den Nutzungs- und Klimarandbedingungen bei der Berechnung der Heizwärmebilanz im Kohortenmodell. Quellen: Eigene Berechnungen unter Verwendung der Daten in (IWU 2012) und (Valentin 2011, S. IV-17).

- \* Werte für Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung
- \*\* Werte für Abluftanlagen
- \*\*\* Werte für Einfamilienhäuser/ Mehrfamilienhäuser, siehe auch exakte Werte in Abbildung 4.4.

- ◇- STATEC Mittelwert 2011-2015
- Lux 2000-2009 Meteororm
- ▲- IPCC A2 2050 Lux Meteororm

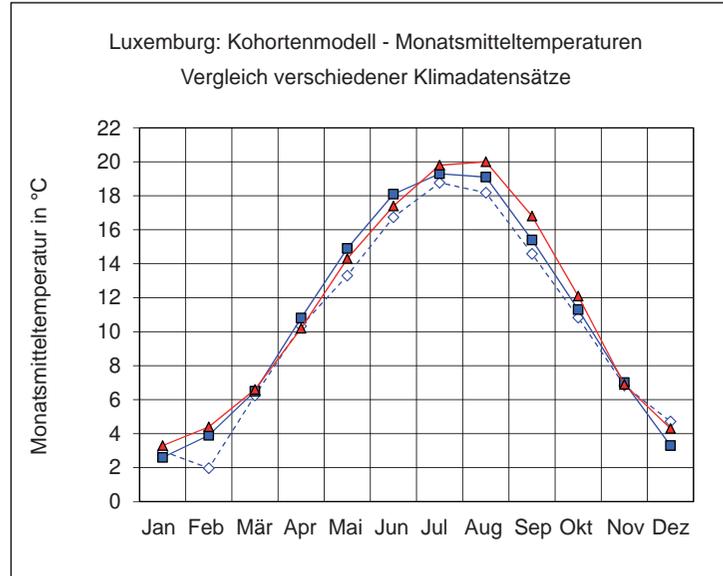


Abbildung 4.3  
Darstellung der Monatsmitteltemperaturen in verschiedenen Klimadatensätzen. Weitere Erläuterungen und Quellen: siehe Text.

- Business-as-usual, EFH
- ◇- Business-as-usual, MFH
- ▲- Effizienz, EFH
- △- Effizienz, MFH
- Effizienz-Plus, EFH
- Effizienz-Plus, MFH

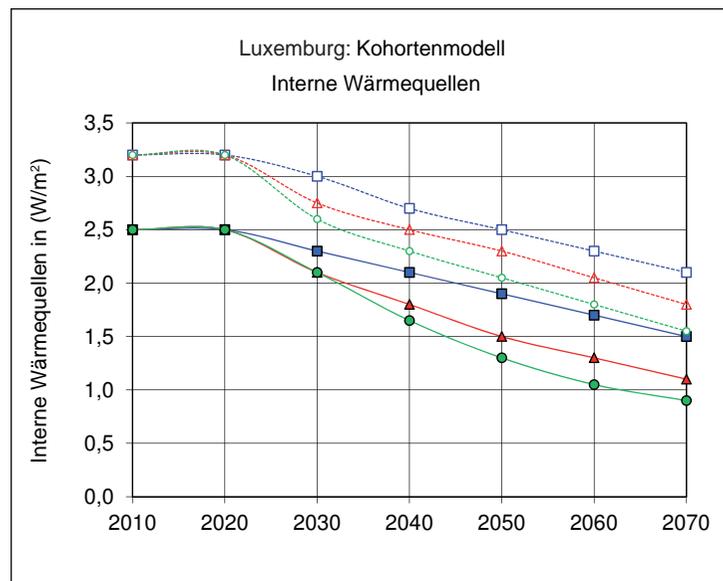


Abbildung 4.4  
Dynamische Entwicklung der internen Wärmequellen im Kohortenmodell. Diese sind unterschiedlich je nach Szenario und Gebäudetyp (EFH, MFH) modelliert. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

Er ist wie folgt definiert:

$$f_{\text{Nutzung}} = 0,5 + 2 / (3 + 0,6 h)$$

Dabei ist h der temperatur- und nutzflächenbezogene Wärmeverlust, mit:

$$h = (H_T + H_V) / A_{\text{EB}} \text{ (in W/m}^2\text{K)}$$

mit:

$H_T$ : temperaturbezogener Transmissionswärmeverlust (in W/K)

$H_V$ : temperaturbezogener Lüftungswärmeverlust (in W/K)

$A_{\text{EB}}$ : Energiebezugsfläche = beheizte Wohnfläche (in m<sup>2</sup>)

Mit dem Nutzungsfaktor können die unterschiedlichen Komfortniveaus, die sich abhängig vom Dämmstandard in den Wohngebäuden realisieren lassen, berücksichtigt werden. Bei energetischen Modernisierungen wird demnach zunächst ein Teil der Effizienzauswirkungen durch verbesserten Komfort kompensiert. Dieser sog. „Reboundeffekt“ lässt sich anhand der Verbrauchswerte im Vergleich zwischen un- und vollsanierten Gebäuden nachweisen. Andere Studien zu Verbrauchswerten großer Wohngebäudebestände kommen zu ähnlichen Ergebnissen (vgl. Schröder et al. 2012).

In den Berechnungen zum Heizwärmebedarf wurde zudem eine Anpassung an den zu erwartenden Klimawandel vorgenommen. Dieser fällt vermutlich regional unterschiedlich aus. In den bisherigen Klimabeobachtungen und bei den Auswertungen von Klimamodellen war ein Trend erkennbar, dass die langfristig zu erwartenden Temperaturerhöhungen im Alpenraum größer ausfallen als im europäischen Flachland. Im Kohortenmodell wurde eine Anpassung gemäß einem Testreferenzjahr vorgenommen, dass sich am IPCC-Szenario A2 für den Standort Luxemburg-Stadt für das Jahr 2050 orientiert. Hierbei ist ein spürbarer Einfluss auf die Monatsmitteltemperaturen zu erkennen. Die Berücksichtigung des zu erwartenden

Klimawandels im Kohortenmodell erfolgt über einen Anpassungsfaktor für die Heizgradstunden, der einen linearen Verlauf zwischen den Jahren 2010 und 2050 aufweist.

Für die Bestimmung der internen Wärmequellen wurde ein differenziertes Modell entwickelt, in dem einerseits die Abhängigkeit vom Strombedarf als auch von der typischen Belegung in den Wohngebäuden berücksichtigt wird. Weil die Stromeffizienz vor allem von den Randbedingungen in den Szenarien abhängen und die Belegung vor allem vom Gebäudetyp ergeben sich insgesamt sechs Verläufe für die internen Wärmequellen (siehe Abb. 4.4). Vor allem in den Effizienzszenerarien sinken diese Werte deutlich ab (bis hinunter zu Werten zwischen 0,9 - 1,8 W/m<sup>2</sup>. Dies deckt sich mit Erfahrungen der Autoren in Passivhäusern, in denen bei sehr effizienter Stromausstattung und geringer Belegung die Verbrauchswerte für Raumwärme spürbar höher liegen, als in baugleichen Passivhäusern mit üblicher Stromeffizienz und normaler Belegung.

In Tabelle 4.3 finden sich knappe Angaben zum solaren Strahlungsangebot auf verglaste Flächen. Als Standort hierfür wurde, wie auch für die Monatsmitteltemperaturen, Luxemburg-Stadt gewählt.

Ein zwar nur in geringem Ausmaß klimaabhängiger Faktor ist der Reduktionsfaktor von normal beheizten Wohnräumen zum Erdreich bzw. zu unbeheizten Kellern. Dieser wurde pauschal mit 0,5 gewählt. Hier spielt künftig u.U. eine Rolle, dass Kellerräume zunehmend in die thermische Hülle integriert werden. Dies führt einerseits zu einer spürbaren Vergrößerung der Energiebezugsfläche (man könnte diese Räume, wie im (PHPP) vorgeschlagen mit einem Faktor von 0,6 anrechnen) und andererseits zu geringeren Wärmeverlusten der erdgeschossigen Wohnräume zu den Kellerbereichen. Dieser Punkt wurde jedoch im Kohortenmodell nicht weiter verfolgt, weil er sowohl im Ausgangszustand als auch im künftigen Verlauf nur schwer abschätzbar ist.

#### 4.4 Szenarioabhängige Annahmen zu den energetischen Qualitäten der Baukomponenten im Kohortenmodell.

Die energetischen Qualitäten der baulichen und technischen Komponenten stellen wichtige Parameter der Energiebilanz zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs dar.

Während die energetisch-technischen Qualitäten der Komponenten aller Bestandsgebäude im Jahr 2010 (Ausgangszustand), abhängig vom Baualter, Gebäudetyp und sonstigen Eigenschaften variieren (siehe Tab. 3.1, S. 49), werden für die anstehenden Sanierungsmaßnahmen und künftigen Neubauten in den Szenarien festgelegte Standards bzw. Qualitäten vorgegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit gelten diese für alle gleichartigen Fälle. Im Betrachtungszeitraum werden die Anforderungen an die energetischen Qualitäten nach und nach erhöht, so dass sich ein dynamischer Verlauf der Anforderungsniveaus bei den energetischen Qualitäten in den nächsten Dekaden ergibt. Für die Hüllflächen (Außenwände, Dächer, Decken bzw. Bodenplatten zum Keller oder Erdreich) werden pauschale mittlere U-Werte in Ansatz gebracht, die bereits alle Anschlussdetails und Wärmebrücken mitenthalten. Daher sind die genannten U-Werte nicht mit denen des ungestörten Bauteils gleichzusetzen. Bei den Fenstern wird der gesamte  $U_w$ -Wert des Fensters im eingebauten Zustand eingesetzt sowie der g-Wert der Verglasungen.

Bei Sanierungen wird zwischen den ohne Einschränkungen sanierbaren und den bedingt sanierbaren Altbauten sowie Baudenkmalen unterschieden. Die möglichen Dämmqualitäten sind für den bedingt sanierbaren Bestand deutlich geringer angesetzt als für den voll sanierbaren (siehe Werte in Klammern in den oberen Tabellenteilen der Tabellen 4.4, 4.5 und 4.6). Das trifft insbesondere auf die Außenwände zu, die bei diesen Wohnbauten aus denkmalpflegerischen oder gestalterischen Gründen, falls überhaupt, nur mit Innendämmungen versehen

Solarstrahlung auf Fensterflächen (Standort: Luxemburg-Stadt)	
Süd:	336 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Ost/West:	188 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Nord:	87 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Horizontal:	285 kWh/(m <sup>2</sup> a)

Tabelle 4.3  
Angebot an Solarstrahlung auf Fensterflächen während der Heizperiode für den Standort Luxemburg-Stadt. Quelle: (PHPP-V9).

<b>Business-as-usual-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand</b> (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,57 ( - )	0,52 ( - )	0,47 ( - )	0,43 ( - )	0,40 ( - )
Dach (U-Wert)	0,45 (0,57)	0,36 (0,53)	0,31 (0,51)	0,20 (0,49)	0,25 (0,45)
Kellerdecke (U-Wert)	0,57 (0,67)	0,53 (0,63)	0,51 (0,61)	0,49 (0,59)	0,45 (0,55)
Fenster (U-Wert)	1,55 (1,95)	1,45 (1,85)	1,35 (1,75)	1,27 (1,65)	1,20 (1,55)
Fenster (g-Wert)	0,65 (0,66)	0,65 (0,60)	0,65 (0,57)	0,63 (0,55)	0,60 (0,50)
Lüftung ( $n_L$ - Wert)	0,39 (0,39)	0,37 (0,39)	0,36 (0,39)	0,35 (0,39)	0,33 (0,39)
<b>Business-as-usual-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten</b> (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,19 (0,19)	0,16 (0,16)	0,16 (0,16)	0,15 (0,15)	0,145 (0,145)
Dach (U-Wert)	0,155 (0,155)	0,14 (0,14)	0,135 (0,135)	0,13 (0,13)	0,12 (0,12)
Kellerdecke (U-Wert)	0,24 (0,24)	0,20 (0,20)	0,20 (0,20)	0,19 (0,19)	0,18 (0,18)
Fenster ( $U_w$ -Wert)	1,0 (1,0)	0,93 (0,93)	0,93 (0,93)	0,91 (0,91)	0,85 (0,85)
Fenster (g-Wert)	0,57 (0,57)	0,57 (0,57)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,52 (0,52)
Lüftung ( $n_L$ - Wert)	0,21* (0,21*)	0,19 (0,19)	0,17 (0,17)	0,17 (0,17)	0,16 (0,16)

\* Der angegebene Wert entspricht einem Mittelwert für die Periode 2010-2019 für die Gebäude mit und ohne WRG.

Tabelle 4.4

Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Business-as-usual-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kann eine bessere Qualität zum Zuge kommen. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Außenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in  $W/m^2K$ . Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt- $U_w$ -Wert des Fensters in  $W/m^2K$  im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels  $n_L$  in  $1/h$  charakterisiert.

werden können. Diese kommen ohnehin nur im Effizienz-Plus-Szenario zum Einsatz. Auch für die anderen Bauteile wurden geringere energetische Qualitäten angenommen, um die vorhersehbaren Restriktionen und bautechnischen Schwierigkeiten der energetischen Sanierung unter denkmalpflegerischen Auflagen abzubilden. Diese betreffen beispielsweise die Fenster und die Lüftungskonzepte.

Im Business-as-usual-Szenario (siehe Tabelle 4.4) orientieren sich die energetischen Qualitäten für Bau- und Technikkomponenten an den heute bereits erkennbaren Entwicklungen und Trends.

Im Effizienz-Szenario (siehe Tabelle 4.5) werden hingegen ab 2020 konsequent effizientere Komponenten und Baustandards zugrundegelegt. Im Neubau ist dies bereits durch die Einführung des gesetzlichen Standards (RGD 2016) vollzogen. Im Bestand ist jedoch die derzeitige mittlere Modernisierungspraxis von diesen energetischen Qualitäten weit entfernt. Daher ist hier auch im Effizienz-Szenario eine längere Übergangsphase vorgesehen. Das gilt speziell für die Lüftungskonzepte, bei denen hier noch längere Zeit auch Abluftanlagen möglich sind. Die energetischen Sanierungen werden im Bereich der Hülle ab ca. 2020/30 mit Passivhauskomponenten durchgeführt. Auch die energetische Qualität der Passivhauskomponenten wird am Ende des Betrachtungszeitraums durch technologische Entwicklungen gegenüber heute weiter verbessert sein, was sich dann auch für den Neubau positiv auswirkt.

Im Effizienz-Plus-Szenario kommen ab 2020/30 technologische Weiterentwicklungen zum Einsatz, die sich heute noch im Erprobungsstadium befinden oder wenigstens theoretisch untersucht sind (siehe Tab. 4.6):

- Im Vergleich zum Effizienz-Szenario kommen bessere Dämmqualitäten bei allen Außenbauteilen zum Einsatz. Dabei wird davon ausgegangen, dass sowohl bei den konventionellen Dämmstoffen technologische Weiterentwick-

lungen stattfinden als auch für spezielle Anwendungen verstärkt neue Dämmmaterialien (z.B. Vakuumdämm-Paneele) zur Verfügung stehen. Sollten die Energiepreise künftig wieder steigen, könnten diese Komponenten ab ca. 2020/30 durchaus wirtschaftlich interessant werden.

- Bei der konstruktiven Bewältigung typischer Wärmebrücken kommen verstärkt kostengünstige Standardprodukte zum Einsatz, die z.B. statisch hochfeste Verbindungen mit einem sehr guten Wärmeschutz kombinieren.
- Die Fenster stellen auch im Passivhaus weiterhin die thermisch schwächsten Bauteile mit den größten flächenbezogenen Wärmeverlusten dar. Technologische Weiterentwicklungen (Rahmen, Rahmenbreite, Verglasungen, Glasrandverbund) sind von besonderer strategischer Bedeutung für die Weiterentwicklung des Passivhauskonzeptes. Diese Entwicklungen sind bereits in vollem Gange. Eine spezielle Rolle spielen hierbei die geometrische und thermische Optimierung des Fensterrahmens und seiner Einbausituation sowie leichte und evtl. künftig kostengünstige Vakuumverglasungen. Somit erscheinen ab 2030 Fenster-U-Gesamt-Werte im eingebauten Zustand von 0,5 W/m<sup>2</sup>K durchaus erreichbar zu sein. Die heute verfügbaren marktbesten Fenster erreichen bereits Werte um 0,60 – 0,65 W/m<sup>2</sup>K. Die Entwicklungen bei Fenstern und Verglasungen sind darüberhinaus von größter Bedeutung für ihren Einsatz im Denkmalbestand, weil hier besonders hohe Anforderungen an Gewicht, Integrationsfähigkeit in alte Fensterkonstruktionen bzw. die Rekonstruktion alter Rahmenprofile gestellt werden.
- Auch bei Lüftungsanlagen sind weitere energetische Optimierungen absehbar, die zunächst vor allem die Elektroeffizienz der Lüftungsgeräte betreffen. Diese Verbesserungen werden bei der Berechnung des Hilfsstromeinsatzes berücksichtigt. In die Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs fließt als Einflussgröße der energetisch wirksame Luftwechsel ein. Dieser wird durch den mittleren Anlagenluftwechsel, den Wärmebereitstellungsgrad der Wärme-

<b>Effizienz-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand</b> (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,45 (0,97)	0,22 (0,90)	0,19 (0,80)	0,18 (0,70)	0,16 (0,60)
Dach (U-Wert)	0,37 (0,57)	0,22 (0,52)	0,19 (0,47)	0,17 (0,42)	0,16 (0,35)
Kellerdecke (U-Wert)	0,50 (0,625)	0,37 (0,52)	0,32 (0,47)	0,27 (0,42)	0,22 (0,35)
Fenster (U-Wert)	1,45 (1,75)	1,25 (1,45)	1,15 (1,35)	1,05 (1,25)	0,95 (1,10)
Fenster (g-Wert)	0,65 (0,68)	0,65 (0,62)	0,62 (0,57)	0,57 (0,55)	0,55 (0,51)
Lüftung (n <sub>L</sub> - Wert)	0,39 (0,39)	0,37 (0,39)	0,34 (0,38)	0,32 (0,38)	0,30 (0,37)
<b>Effizienz-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten</b> (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,17 (0,18)	0,13 (0,14)	0,12 (0,13)	0,11 (0,12)	0,095 (0,11)
Dach (U-Wert)	0,15 (0,15)	0,13 (0,13)	0,12 (0,12)	0,11 (0,11)	0,095 (0,095)
Kellerdecke (U-Wert)	0,23 (0,23)	0,19 (0,19)	0,18 (0,18)	0,18 (0,18)	0,17 (0,17)
Fenster (U-Wert)	0,99 (1,04)	0,88 (0,93)	0,83 (0,83)	0,78 (0,78)	0,70 (0,70)
Fenster (g-Wert)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,53 (0,53)	0,50 (0,50)
Lüftung (n <sub>L</sub> - Wert)	0,20* (0,20*)	0,16 (0,16)	0,14 (0,14)	0,13 (0,13)	0,12 (0,12)

\* Der angegebene Wert entspricht einem Mittelwert für die Periode 2010-2019 für die Gebäude mit und ohne WRG.

Tabelle 4.5

Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Effizienz-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt nämlich die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kann eine bessere Qualität zum Zuge kommen. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Aussenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in W/m<sup>2</sup>K. Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt-U<sub>w</sub>-Wert des Fensters in W/m<sup>2</sup>K im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels n<sub>L</sub> in 1/h charakterisiert.

<b>Effizienz-Plus-Szenario: energetische Qualitäten Sanierungsmaßnahmen im Bestand</b> (Werte in Klammern: bedingt sanierbarer Bestand)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,39 (0,92)	0,17 (0,80)	0,15 (0,70)	0,14 (0,60)	0,13 (0,45)
Dach (U-Wert)	0,34 (0,55)	0,17 (0,48)	0,15 (0,43)	0,14 (0,38)	0,13 (0,30)
Kellerdecke (U-Wert)	0,47 (0,55)	0,31 (0,38)	0,26 (0,33)	0,24 (0,28)	0,21 (0,22)
Fenster (U-Wert)	1,32 (1,65)	0,97 (1,20)	0,85 (1,05)	0,78 (0,95)	0,70 (0,85)
Fenster (g-Wert)	0,60 (0,68)	0,55 (0,63)	0,55 (0,60)	0,55 (0,60)	0,58 (0,56)
Lüftung ( $n_L$ - Wert)	0,38 (0,39)	0,36 (0,38)	0,30 (0,37)	0,25 (0,36)	0,22 (0,36)
<b>Effizienz-Plus-Szenario: energetische Qualitäten Neubauten</b> (Werte in Klammern: Mehrfamilienhäuser > 2 WE)					
Komponente / Jahr	2010 - 2019	2020 - 2029	2030 - 2039	2040 - 2049	ab 2050
Außenwände (U-Wert)	0,165 (0,17)	0,105 (0,115)	0,095 (0,105)	0,085 (0,095)	0,75 (0,83)
Dach (U-Wert)	0,14 (0,14)	0,105 (0,105)	0,095 (0,095)	0,085 (0,085)	0,75 (0,75)
Kellerdecke (U-Wert)	0,23 (0,23)	0,175 (0,175)	0,17 (0,17)	0,16 (0,16)	0,155 (0,155)
Fenster (U-Wert)	0,94 (0,94)	0,75 (0,75)	0,675 (0,675)	0,625 (0,625)	0,55 (0,55)
Fenster (g-Wert)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,55 (0,55)	0,575 (0,55)	0,60 (0,60)
Lüftung ( $n_L$ - Wert)	0,13* (0,13*)	0,10 (0,10)	0,07 (0,07)	0,06 (0,07)	0,06 (0,06)

\* Der angegebene Wert entspricht einem Mittelwert für die Periode 2010-2019 für die Gebäude mit und ohne WRG.

Tabelle 4.6

Angaben zur energetischen Qualität der baulich-technischen Komponenten der Wohngebäude im Effizienz-Plus-Szenario. Im oberen Teil der Tabelle sind die Kennwerte für die Sanierungsmaßnahmen im Bestand zusammengestellt. Hierbei ist zu beachten, dass diese jeweils nur für anstehende Erneuerungsmaßnahmen gelten. Gemäß dem Kopplungsprinzip bleibt nämlich die energetische Qualität von baulich-technischen Komponenten im Modell solange unverändert erhalten, bis nach Ablauf der Nutzungsdauer eine Erneuerung ansteht. Erst dann kann eine bessere Qualität zum Zuge kommen. Im unteren Teil der Tabelle sind die Kennwerte für künftige Neubauten genannt.

Die Angaben zu den U-Werten von Aussenwänden, Dächern, Kellerdecken erfolgen in  $W/m^2K$ . Die Angabe des U-Wertes der Fenster bezieht sich auf den Gesamt- $U_w$ -Wert des Fensters in  $W/m^2K$  im eingebauten Zustand. Die energetische Güte des Lüftungskonzeptes wird über den Kennwert des effektiven energetisch wirksamen Luftwechsels  $n_L$  in  $1/h$  charakterisiert. Im Vergleich zu den anderen Szenarien wurde eine deutlich höhere mittlere Effizienz und eine verbesserte Luftdichtheit der Hülle angenommen.

rückgewinnung und den Infiltrationsluftwechsel bestimmt. Verbesserungen sind bei allen der drei genannten Größen möglich. Der Anlagenluftwechsel lässt sich z.B. durch eine luftqualitätgesteuerte Volumenregelung oder eine Kaskadenlüftung reduzieren. Auch die künftig zu erwartende geringere mittlere Belegungsdichte führt in Zukunft zu kleineren mittleren Anlagenluftwechseln. Die energetische Qualität von Wärmetauscher, Gerätegehäuse und bei der Dämmung von Lüftungsleitungen kann gegenüber dem heute Üblichen deutlich verbessert werden.

- Nicht zuletzt spielt die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle energetisch und bauphysikalisch eine wichtige Rolle. Mit heute vorhandenen Dichtkonzepten und -mitteln lassen sich im Neubau bei konsequenter Anwendung gegenüber dem geforderten Passivhaus-Grenzwert von  $n_{50} = 0,6 h^{-1}$  regelmäßig deutlich günstigere Drucktest-Kennwerte um  $0,4 - 0,2 h^{-1}$  erzielen.

Die energetischen Kennwerte zu den Einzelkomponenten im Effizienz-Plus-Szenario sind in Tabelle 4.6 zusammengestellt. Die Spannweite der energetischen Qualitäten in den verschiedenen Szenarien umfasst das gesamte Spektrum der heute verfügbaren bautechnischen Komponenten und markttypischen Produkte. Spekulative Annahmen zu künftig vorstellbaren bzw. wünschenswerten Technologien wurden jedoch selbst in dem explorativen Effizienz-Plus-Szenario bewusst vermieden.

#### 4.5 Nutzungsdauern und Erneuerungszyklen

Die mittlere Nutzungsdauer der baulichen und technischen Komponenten ist ein wichtiger Parameter im Kohortenmodell, denn darüber werden die Erneuerungszyklen von Bauteilen und Technikkomponenten festgelegt, die dann Auslöser für daran gekoppelte energetische Maßnahmen sind. Diese Zyklen sollten möglichst realistisch bestimmt werden. Werden die

Nutzungsdauern zu kurz gewählt, werden die Möglichkeiten für eine energetische Sanierung zu optimistisch eingeschätzt. Im umgekehrten Fall ergibt sich eine zu pessimistische Einschätzung.

In der Literatur finden sich erheblich voneinander abweichende Angaben zur mittleren Nutzungsdauer von Bau- und Technikkomponenten. Hintergrund sind u.a. unterschiedliche Motivationen und Bewertungen. So werden die Nutzungsdauern bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen i.d.R. deutlich geringer angesetzt, als die tatsächliche Haltbarkeit der Konstruktionen beträgt. Sie orientieren sich häufig an in der Wirtschaft üblichen Abschreibungszeiträumen. Dadurch werden jedoch an sich wirtschaftlich tragfähige Lösungen „schlechtgerechnet“ und u.U. verhindert. Es existieren nur wenige empirische Untersuchungen zu Nutzungsdauern. In (Kleemann et al. 2000, S. 11) werden Renovierungszyklen von 30 - 60 Jahren genannt und eine Untersuchung von 1260 Wohneinheiten im Ruhrgebiet angeführt, für die ein mittlerer Renovierungszyklus von 53 Jahren ermittelt wurde. Vollsanierungen stellen jedoch nicht den Regelfall im Sanierungsgeschehen dar. Baukomponenten werden dann ersetzt oder erneuert, wenn deren Nutzungsdauer abgelaufen ist – und das ist davon abhängig, um welches Bauteil, um welche Konstruktionsart oder welche Technikkomponente es sich handelt. Daher werden Nutzungsdauern sinnvollerweise differenziert nach Bauteil oder Komponente ausgewiesen.

In Tabelle 4.7 sind die im Kohortenmodell verwendeten Nutzungsdauern ausgewiesen. Diese wurden in Anlehnung an (Kleemann et al. 2000) im oberen Bereich der in der Literatur genannten Werte gewählt, weil die Bauteile und Komponenten tatsächlich langlebiger sind, als häufig theoretisch angenommen wird und sich daraus längere Erneuerungszyklen ergeben (s.o.). Dies ist von Bedeutung, damit die Berechnungen im Kohortenmodell nicht auf zu optimistischen Annahmen bzgl. Erneuerungsraten und Sanierungseffizienzen beruhen. Die Nut-

Bauteil / Komponente	Mittlere Nutzungsdauer [a]	Sanierungsrate
<b>Baukomponenten</b>		
Außenwände (Putz / sonstige Bekleidungen / Dämmung)	50	2,0%
Anstriche / Beschichtungen	5 - 10	10,0 - 20,0%
Dach (Steildachaufbau)	50	2,0%
Dach (Flachdachaufbau)	30	3,3%
Kellerdecke (zugänglich)	40	2,5%
Kellerdecke (Bodenaufbau)	80	1,25%
Kellerwände und Bodenplatten	80 - 120	1,0%
Fenster	40	2,5%
Tragkonstruktionen	80 - 120	1,0%
Mittlere Nutzungsdauer (Baukomponenten)	50 - 60	1,5 - 2,0%
<b>Technikkomponenten</b>		
Haustechnik - Heizsystem	20	5,0%
Haustechnik - Wärmeverteilung	50	2,0%
Lüftungstechnik (Gerät)	20 - 25	4,0 - 5,0%
Lüftungsverteilung (Kanalnetz)	50	2,0%
Elektroinstallationen	30 - 50	2,0 - 3,5%
Beleuchtung	5 - 10	10,0 - 20,0%
Haushaltsgeräte	10 - 20	5,0 - 10,0%
Unterhaltungselektronik	5-10	10,0 - 20,0%
Computer u.ä.	5-10	10,0 - 20,0%
Mittlere Nutzungsdauer (Technikkomponenten)	15 - 25	4,0 - 6,5%

Tabelle 4.7: Mittlere Nutzungsdauer und daraus abgeleitete Sanierungsrate für die energetisch relevanten Bau- und Technikkomponenten. Die Angabe erfolgt für die technische Standzeit (= tatsächliche Lebensdauer) und nicht als wirtschaftlicher Abschreibungszeitraum. Quelle: (Vallentin 2011, S. IV-19 und Ergänzungen).

Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade (Erzeugung, Speicherung, Verteilung)								
	Strom dir.	WP Sole	WP Luft	FW	Öl	Gas	Biomasse	Biomasse dez.
<b>Effizienz-Szenario</b>								
2020 Heizung	0,98	2,90	2,70	0,86	0,87	0,93	0,74	0,65
2020 Warmwasser	0,92	2,10	1,80	0,71	0,72	0,80	0,55	0,40
2050 Heizung	0,98	3,20	3,00	0,89	0,93	0,99	0,80	0,65
2050 Warmwasser	0,93	2,40	1,80	0,76	0,79	0,88	0,62	0,40
<b>Effizienz-Plus-Szenario</b>								
2020 Heizung	0,98	3,20	3,00	0,86	0,87	0,93	0,74	0,65
2020 Warmwasser	0,92	2,40	2,20	0,71	0,72	0,80	0,55	0,40
2050 Heizung	0,98	4,18	3,98	0,89	0,93	0,99	0,80	0,65
2050 Warmwasser	0,93	3,40	3,30	0,76	0,79	0,88	0,62	0,40

Tabelle 4.8  
Entwicklung der Jahresnutzungsgrade im Effizienz- und im Effizienz-Plus-Szenario für Heizung und Warmwasser in den Jahren 2020 und 2050.

zungsdauern von tragenden Hauptkonstruktionen liegen bei 80 Jahren und mehr. Auch die sonstigen baulichen Komponenten sind mit 30 - 50 Jahren Nutzungsdauer als langlebig einzustufen. Technische Anlagen wie Heizung und Lüftungsgeräte weisen mit 25 - 30 Jahren bereits deutlich kürzere Erneuerungszyklen auf. Mit 5 - 20 Jahren sind Ausstattungsgegenstände und Elektrogeräte am kurzlebigsten.

Der Erstellungszeitpunkt der Gebäudetypen bildet jeweils den Ausgangspunkt für die Erneuerungszyklen. Diese werden im Kohortenmodell in 5-Jahres-Schritten modelliert, wobei die energetischen Kennwerte der betreffenden Bauteile bzw. Technikkomponenten - je nach Sanierungstiefe und Qualität entsprechend den Vorgaben in den Szenarien - angenommen werden.

Wie in Tab. 4.7 dargestellt, lassen sich die Nutzungsdauern über ihren Kehrwert in komponentenabhängige Sanierungsraten umrechnen. Bündelt man hier Maßnahmenpakete, so er-

geben sich daraus realistische Sanierungszyklen. Denn man kann pauschal annehmen, dass es nicht im Interesse der Hauseigentümer liegt, alle 5 Jahre Einzelmaßnahmen mit ihren typischen Störpotenzialen auszuführen. Auffällig ist, dass die mittlere Sanierungsrate im Bereich der Technikkomponenten mit 4,0 - 6,5 % deutlich höher liegt, als im Bereich der Bauteile mit 1,5 - 2,0 %. Bei der Gebäudetechnik können somit neue Qualitäten und Konzepte deutlich schneller den Bestand durchdringen, als dies bei der Gebäudekonstruktion der Fall ist.

#### 4.6 Definition der Bezugsfläche

Bei der Bestimmung der spezifischen Kennwerte wird die tatsächlich vorhandene Nutzfläche verwendet. Bei der sog. Energiebezugsfläche  $A_{EB}$  werden nur die Nutzflächen innerhalb der thermischen Hülle angerechnet, z.B. die beheizte Wohnfläche (nicht jedoch Balkone, gedeckte Terrassen, Loggien oder Abstellräume ect. außerhalb der Gebäudehülle). Die Energiebezugsfläche wurde über die Außenmaße der Gebäudetypen und die Geschosszahl ermittelt. Die so ermittelten Geschossflächen GF wurden über pauschale Umrechnungsfaktoren in die Energiebezugsfläche umgerechnet. Diese Faktoren (ausgedrückt als Verhältnis  $A_{EB}/GF$ ) liegen je nach Gebäudetyp zwischen 0,70 und 0,80.

#### 4.7 Szenarioabhängige Modellierung der energetischen Qualitäten der Technikkomponenten im Kohortenmodell

Analog zu den Bauteilen wird bei den haustechnischen Komponenten (z.B. Heizung, Warmwassererzeuger, Lüftung) verfahren. Es wurden szenarioabhängige Annahmen zur energetischen Qualität der Systeme zusammengestellt. Diese werden in einfachen Kennwerten ausgedrückt (z.B. energieäquivalenter Luftwechsel des Lüftungskonzeptes bzw. Jahresnutzungsgrad der Wärmeversorgung inkl. Erzeugung, Speicherung und

Verteilung) und zeitabhängig variiert. Für die Bestimmung des nutzerabhängigen Warmwasser- und Strombedarfs wird auf die Kennwerte anderer Szenarienstudien zurückgegriffen, und ein Abgleich mit Studien bzw. Daten, die auf Luxemburg bezogen sind, vorgenommen (siehe Tab. 4.9).

### Modellierung der Wärmeversorgungssysteme

Die energetische Qualität der Wärmeversorgungssysteme (Heizung/Warmwasser) wird im Rechenmodell durch ihre Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade für Erzeugung, Speicherung und Verteilung abgebildet. Diese wurden anhand von Literaturwerten und Ergebnissen aus Messprojekten hergeleitet (vgl. Vallentin 2011, S. IV-34 f. und IV-42 f.), (Peper/Feist 2008), (Peper 2009) und (Miara 2011). Während die Werte für brennstoffbetriebene Wärmeversorgungssysteme und direktelektrische Systeme in den einzelnen Szenarien nicht differenziert wurden, wurden die Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade der Wärmepumpensysteme im Effizienz-Plus-Szenario höher als im Effizienz-Szenario festgelegt, weil hier noch sehr weitgehende Technologieverbesserungen möglich sind (z.B. Direktverdampfer-Wärmepumpen).

Um die in Zukunft zu erwartenden technischen Weiterentwicklungen zu berücksichtigen, wurden die Systemeffizienzen nach Baujahren differenziert. Tabelle 4.8 zeigt exemplarisch die Werte für das Effizienz- und das Effizienz-Plus-Szenario jeweils für die Jahre 2020 und 2050. Im Jahr 2020 wurden für die Nutzungsgrade in den Effizienz-szenarien (EFF und EFF-Plus) für alle Systeme außer Wärmepumpen identische Werte angenommen. Für Wärmepumpen wurden im Effizienz-Plus-Szenario hingegen um 0,3 höhere Gesamt-Jahresanlagennutzungsgrade angesetzt.

Für 2050 wurden in beiden Szenarien geringfügige Verbesserungen bei der Anlageneffizienz angenommen. Sie liegen zwischen 0,03 und 0,06. Bei den Wärmepumpen wurden für 2050 im Effizienz-Szenario und im Effizienz-Plus-Szenario jedoch

Quelle	Art der Information
Auswertung Energieausweisregister Ministère de l'Économie	Verteilung Heizsysteme im Gebäudepark
Statec B1501 Conditions 1960-2001	Verteilung im Gebäudepark
Statec B1507 Private households living	Verteilung im Gebäudepark
Statec RP2011-Nombre de logements par type	Verteilung im Gebäudepark
NEEAP (Excel), Ministère de l'Économie	Verteilung im Gebäudepark
Fraunhofer-ISI, KWK-Studie 2016	Anteil Fernwärme
Statec A4302 Final energy consumption 2000-2014	Endenergieverbrauch nach Energieträgern
Statec A4402 Net heat production 2000 - 2014	Endenergieerzeugung nach Nutzung und Energieträgern
Dissertation Rainer Vallentin	Jahresnutzungsgrade Heizsysteme

Tabelle 4.9  
Kurzübersicht über die Quellen, die für die Modellierung der Wärmeversorgung im Kohortenmodell im Gebäudebestand herangezogen wurde. Die Kohleheizungen wurden im Kohortenmodell nicht berücksichtigt, da deren Anteil 1990 bei 3% lag und sie 2001 nahezu aus dem Bestand verschwunden sind.

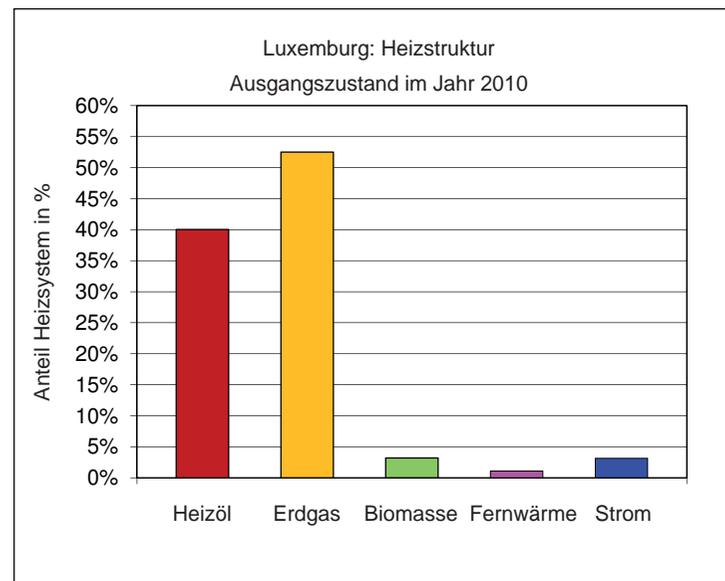


Abbildung 4.5  
Ausgangszustand der Heizstruktur Luxemburgs im Jahr 2010. Bei den stromgestützten Systemen sind auch Wärmepumpen mit enthalten.

deutliche Verbesserungen der mittleren Jahresnutzungsgrade gegenüber den Werten für 2020 modelliert.

Zum Vergleich der Rechenmethodik wurden die im Kohortenmodell für das Effizienz-Szenario für das Jahr 2020 hinterlegten Jahresnutzungsgrade mit Werten verglichen, die nach dem Verfahren des Luxemburger Energiepasses mit dem Programm LESOSAI ermittelt wurden. Am Beispiel eines Einfamilienhauses mit einem Heizwärmebedarf von etwa 27 kWh/(m<sup>2</sup>a) und eines Mehrfamilienhauses mit einem Heizwärmebedarf von etwa 21 kWh/(m<sup>2</sup>a) wurden die Wirkungsgrade der folgenden Wärmeversorgungssysteme für Raumheizung und Warmwasserbereitung verglichen:

- Direktelektrische Beheizung
- Wärmepumpensysteme (Sole und Luft)
- Fernwärmeversorgung
- Öl-Zentralheizung
- Gas-Zentralheizung und
- Holz-Zentralheizung

Wie aus Tab. 4.10 zu erkennen, stimmen die Werte im Mittel von Raumheizung und Warmwasser für alle Systeme außer bei den Wärmepumpensystemen sehr gut überein. Die Abweichungen zwischen den im Kohortenmodell verwendeten Werten und den Berechnungsergebnissen aus LESOSAI gemäß Energiepassverfahren Luxemburg liegen im Bereich zwischen Null und acht Prozent.

Hingegen sind die Jahresnutzungsgrade für die Wärmepumpen nach den Annahmen des Kohortenmodells im Mittel für Heizung und Warmwasser sehr deutlich niedriger, als der nach LESOSAI ausgewiesene Wert. Während der Mittelwert (EFH/MFH, Sole/Luft, Heizung/Warmwasser) im Kohortenmodell bei 250% liegt, weist LESOSAI einen Wert von 326% aus. Es wurde entschieden, die Werte im Kohortenmodell so zu belassen, da sie nach eingehender Analyse von Feldtests als repräsentativer für den Durchschnitt der installierten Wärmepumpensys-

teme angesehen werden dürfen, als die deutlich höheren Werte nach LESOSAI. Wichtig für diese Einschätzung ist, dass im Kohortenmodell der Jahresnutzungsgrad des Heizsystems alle Verluste des Systems abbildet, wie Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Wärmeübergabe. Zur Ermittlung der im Kohortenmodell verwendeten Werte für die Erzeuger-Effizienzen von Wärmepumpen wurden auf die Ergebnisse des Projekts „Wärmepumpeneffizienz“ des Fraunhofer Instituts für solare Energiesysteme zurückgegriffen. In diesem Projekt wurden die Effizienzen von 56 Sole-Wärmepumpen und 18 Luft-Wärmepumpen in einem Feldtest untersucht (Miara 2011). In Abbildung 4.6 sind die Mittelwerte der gemessenen Jahresarbeitszahlen für je verschieden gewählte Bilanzgrenzen aufgezeigt.

Die mittleren Jahresarbeitszahlen der messtechnisch untersuchten Erdreich-Wärmepumpen lagen in den drei vermessenen Jahren zwischen 4,19 und 3,75. Bei den Außenluft-Wärmepumpen liegen diese Werte mit 3,17 bis 2,74 deutlich niedriger. Nur der jeweils niedrigste Wert bildet alle Verluste des Wärmepumpensystems im engeren Sinne ab. Es fehlen jedoch dann immer noch die Speicher- und Verteil- sowie Übergabeverluste, um den Jahresnutzungsgrad zu bestimmen. Obwohl die im Feldtest des ISE bestimmten Messdaten bereits 7-10 Jahre alt sind, können sie auch heute noch als repräsentativ für die mittlere Erzeugereffizienz von Wärmepumpensystemen gelten, weil hier gegenläufige Effekte zwischen Verbesserung der Arbeitszahl und dem Wärmebedarf des Gebäudes auftreten.

Die Wärmeverluste energetisch hochwertig sanierter Gebäude wurden in zwei Messprojekten des Passivhaus-Instituts Darmstadt untersucht [Peper/Feist 2008], [Peper 2009]. In beiden Fällen treten Verluste für Wärmespeicherung und -verteilung zwischen 5 bis 10 kWh/(m<sup>2</sup>a) für Heizung und Warmwasser auf. Auf dieser Grundlage können nun die im Feldtest des Fraunhofer-ISE bestimmten Arbeitszahlen und die in den Messprojekten des Passivhaus-Instituts bestimmten Speicher- und Ver-

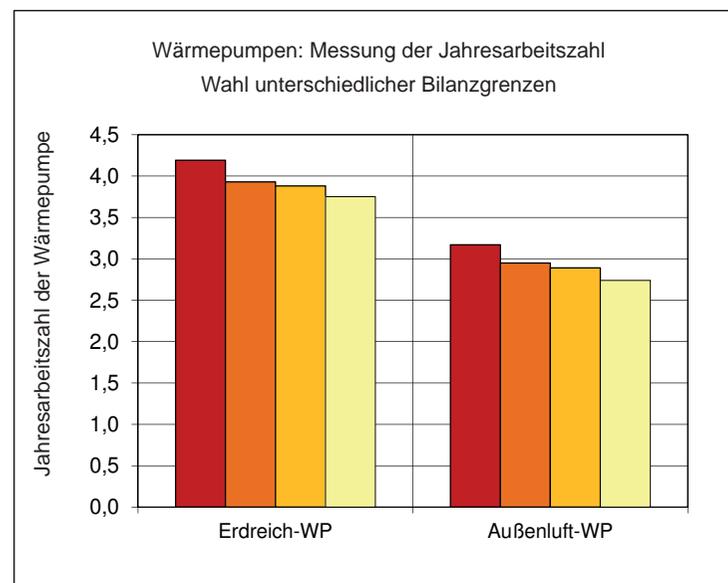
Vergleich Jahresnutzungsgrade der Heizsysteme: Kohortenmodell versus Rechenmethode für die Energieausweise Luxemburgs							
		Strom, direkt	Wärmepumpen	Fernwärme	Öl-zentral	Gas-zentral	Holz-zentral
<b>Kohortenmodell</b>	Heizung	98,0%	290,0%	86,0%	87,0%	93,0%	74,0%
	Warmwasser	92,0%	210,0%	71,0%	72,0%	80,0%	55,0%
	<b>Gesamt</b>	<b>95,0%</b>	<b>250,0%</b>	<b>78,5%</b>	<b>79,5%</b>	<b>86,5%</b>	<b>64,5%</b>
<hr/>							
<b>LESOAI</b>	Heizung	100,0%	387,8%	91,2%	93,0%	93,0%	66,6%
	Warmwasser	90,9%	265,4%	70,5%	71,6%	67,0%	54,3%
	<b>Gesamt</b>	<b>95,5%</b>	<b>326,6%</b>	<b>80,8%</b>	<b>82,3%</b>	<b>80,0%</b>	<b>60,5%</b>
<hr/>							
	<b>Abweichung</b>	<b>-0,5%</b>	<b>-30,6%</b>	<b>-2,9%</b>	<b>-3,5%</b>	<b>7,5%</b>	<b>6,2%</b>

Tabelle 4.10  
Vergleich der Rechenwerte zu den Jahresnutzungsgraden verschiedener Heizsysteme. Oben sind die Werte, die sich gemäß dem Kohortenmodell ergeben aufgeführt. Unten finden sich die Werte, die mit dem Programm LESOAI unter Anwendung Rechenmethodik der Energieausweise ergeben. Die Abweichungen sind bis auf die Wärmepumpen gering. Für letztere sind somit weitergehende Betrachtungen notwendig. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

teilverluste zu dem Jahresnutzungsgrad für Erdreich(Sole)- und Außenluft-Wärmepumpen zusammengeführt werden (siehe Tab. 4.11).

Treten in einem energetisch hochwertigem Gebäude die in den Messungen des PHI ermittelten Speicher- und Verteilverluste auf, und liegt die Effizienz der Erzeuger Sole-WP und Erdreich-WP im Bereich des Mittelwertes aus den Feldtests des ISE, so resultiert für die Erdreich-Sole-Wärmepumpe ein Jahresnutzungsgrad von 2,82 und für die Außenluft-Wärmepumpe ein Wert von 1,8. Angesichts dieser dann gegenüber den Annahmen in den Luxemburger Energiepässen deutlich geringen Werte, orientieren sich die Jahresnutzungsgrade der Wärmepumpensysteme im Kohortenmodell an den geringeren Werten gemäß (Vallentin 2011, S. IV-34 f. und 42 f.).

In den Szenarien setzen sich die in der Vergangenheit zu beobachtenden Trends fort. Jedoch unterscheiden sich die Szenarien im Hinblick auf den Zeitpunkt des Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen. Bei den Ölheizungen erfolgt dies im Business-as-usual-Szenario bis 2070, im Effizienz-Szenario bis



■ Wärmepumpe alleine  
■ + Solepumpe / Ventilator  
■ + Heizstab  
■ + Ladepumpe

Abbildung 4.6  
Messwerte der Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen bei unterschiedlichen Bilanzgrenzen (Miara et al. 2011)

Tabelle 4.11

Ermittlung der Jahresnutzungsgraden für typische Erdreich-Sole- und für Außenluft-Wärmepumpen. Berücksichtigt sind alle Verluste des Systems. Weitere Erläuterungen: siehe Text.

Abschätzung des Gesamt-Jahresnutzungsgrades (eta-Jahr) von Luft- und Sole-Wärmepumpen								
	Nutzwärme	Speicher- und Verteilverluste	Wärmebedarf	Wärmebedarf (Heiz + WW)	Typ WP	AZ WP	Endenergie	eta (Jahr)
Heizung	20 kWh/(m²a)	5 kWh/(m²a)	25 kWh/(m²a)	48 kWh/(m²a)	Sole	3,88	12,4 kWh/(m²a)	2,82
Warmwasser	15 kWh/(m²a)	8 kWh/(m²a)	23 kWh/(m²a)					
Heizung	20 kWh/(m²a)	5 kWh/(m²a)	25 kWh/(m²a)	48 kWh/(m²a)	Luft	2,89	16,6 kWh/(m²a)	1,80
Warmwasser	15 kWh/(m²a)	8 kWh/(m²a)	23 kWh/(m²a)					

2060 und im Effizienz-Plus-Szenario bis 2045.

Geht man von einer mittleren Lebensdauer eines Ölkessels von 25 Jahren aus, bedeutet dies, dass je nach Szenario ein Einbauverbot für neue Ölkessel im Jahr 2045, 2035 oder 2020 ausgesprochen werden müsste. Die aktuellen Entwicklungen zeigen zwar, dass Ölheizungen auch ohne Einbauverbote allmählich aus dem Bestand verschwinden werden. Falls die Dekarbonisierung aus Klimaschutz-Gründen jedoch schneller erfolgen soll, wie dies gemäß den Zielen des Pariser Klimaschutz-Abkommens geboten wäre, sind zusätzliche Anreize zu den gesetzlichen Regelungen bzw. zur Erleichterung von Umrüstungen auf andere Energieträger oder das Verbot von Neuinstallationen im Neubau oder nach Heizkesseltausch erforderlich. Diese Notwendigkeit ergibt sich bereits im Effizienz- aber noch stärker im Effizienz-Plus-Szenario.

Im Effizienz-Plus-Szenario wird zudem ein Ausstieg von Erdgasheizungen bis 2070 angenommen. Im Neubau und in der Sanierung werden Wärmepumpenheizungen (WP), wie in der Vergangenheit zu beobachten, weiter zunehmen bis auch hier eine Sättigung erreicht wird. Biomasseheizungen werden, was ihren Endenergieeinsatz insgesamt betrifft, in etwa auf dem jetzigen Niveau gehalten. Was die versorgten Wohnflächen angeht, können hier szenarienabhängig Zuwächse generiert werden. Im Business-as-usual-Szenario können wegen der hohen Bedarfswerte im Bestand nur ein geringer Ausbau rea-

lisiert werden. Anders sieht es im Effizienz- und Effizienz-Plus-Szenario aus. Die Anteile steigen hier von 3,2 % im Jahr 2010 auf 11,4% bzw. 15,1% im Jahr 2050 an. Fernwärme wird in allen Szenarien noch etwas ausgebaut, vor allem bei den Mehrfamilienhäusern im Bestand. In den Effizienz-szenarien ist hier eine wirtschaftlicher Versorgung von einer ausreichend hohen Wärmedichte des Versorgungsgebiets abhängig.

Direktelektrische Wärmeversorgungen bleiben in ihrem Umfang nahezu konstant; dies unter der Annahme, dass vor allem im Bestand dezentrale elektrische Warmwasserbereitungen vorhanden sind, die häufig auch nach Sanierungen dort verbleiben. Neue Anwendungen ergeben sich im Neubau bei Einzelzapfstellen bzw. in ansonsten sehr effizienten Gebäuden.

#### Modellierung des Warmwasserbedarfs

Bei den Warmwasseranwendungen sind gegenläufige Tendenzen vorhanden, die einerseits verbrauchserhöhend sind (z.B. steigende Komfortansprüche, hygienische Anforderungen) und andererseits verbrauchsmindernd sind (z.B. wassersparende Armaturen, Duschwasser-Wärmerückgewinnung).

Für den Nutzenergiebedarf der Warmwasseranwendungen in den privaten Haushalten wurden die Angaben aus (Valentin 2011, S. IV-44) übernommen und an die verfügbaren Verbrauchsdaten von Projekten in Luxemburg angepasst, welche

deutlich unter den o.g. Kennwerten liegen. Entsprechend wurden die szenarioabhängigen Entwicklungen nach unten korrigiert. Die so ermittelten Werte sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

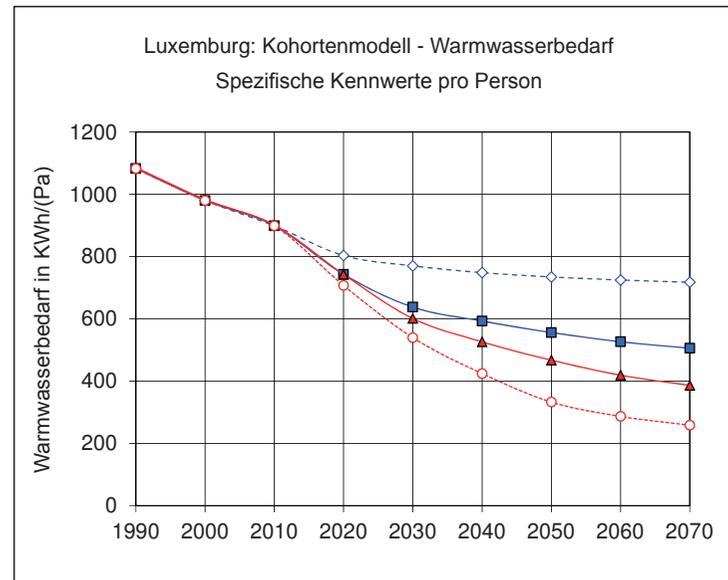
### Modellierung des Strombedarfs in den Szenarien

Die Stromanwendungen in den Gebäuden stellen ein wichtiges Handlungsfeld für die Effizienz- und Klimaschutzstrategien dar. Während im Effizienz-Szenario die Gebäude ab 2020 konsequent mit besonders stromeffizienten Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Arbeitsmitteln usw. ausgestattet werden, findet im Business-as-usual-Szenario nur eine zurückhaltende Verbesserung der Stromeffizienz statt. Weil jedoch dort gleichzeitig eine bedeutende Ausweitung der Stromanwendungen stattfindet, werden die gerätebezogenen Effizienzverbesserungen teilweise bzw. weitgehend aufgezehrt (sog. Rebound-Effekt).

Im Effizienz-Plus-Szenario werden ab 2020/30 nochmals verbesserte Geräte und Technologien zum Standard. Dies betrifft das gesamte Feld der Elektrogeräte, Beleuchtung, Kommunikationselektronik und Allgemeinstromanwendungen (z.B. TG-Beleuchtung, Aufzüge) in und an den Wohngebäuden. Eine genauere Darstellung zum Thema findet sich in (Vallentin 2011, S. IV-52 ff.). In dieser Untersuchung wird eine Halbierung des Haushaltsstrombedarfs bis 2030-2040 für machbar eingestuft, weil dies bereits heute mit den effizientesten Ausstattungen umsetzbar ist.

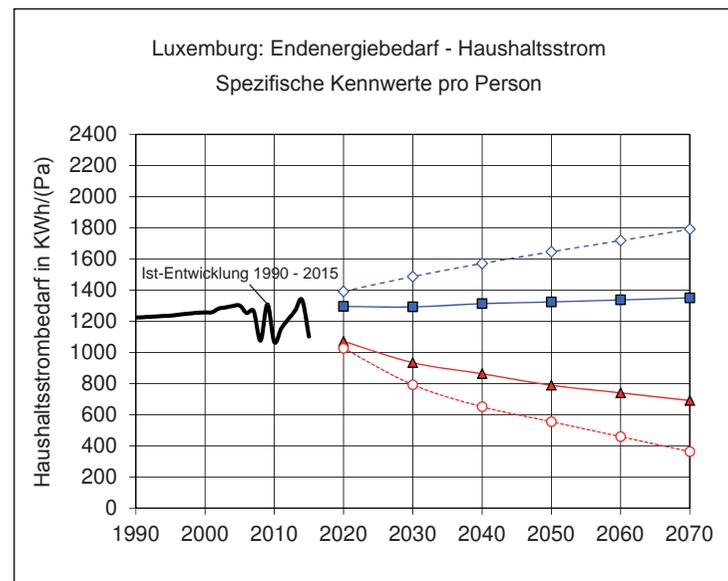
Für den Strombedarf der privaten Haushalte existieren Verbrauchsdaten zu Luxemburg aus den Jahren 1990 - 2014, allerdings ohne Differenzierung zwischen Haushaltsstrom, Hilfsstrom und Strom für Wärmeerzeugung (vgl. Statec 2015). Diese liegen im Gegensatz zu den Warmwasseranwendungen höher als die entsprechenden Vergleichswerte in Deutschland.

Von diesen Werten wurde der Anteil für Hilfsstrom und Strom zur Wärmeerzeugung abgezogen und daraus der Ausgangs-



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 4.7  
Szenarioabhängige Modellierung des Nutzenergiebedarfs pro Person für alle Warmwasseranwendungen in den Haushalten. Angabe der Werte in kWh/(Pa).

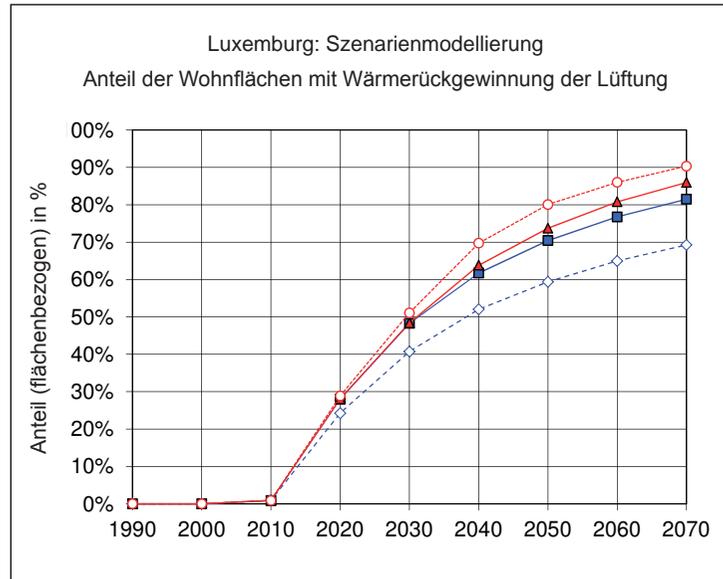


- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus
- - - IST - Entwicklung

Abbildung 4.8  
Szenarioabhängige Modellierung des Endenergiebedarfs pro Person für den Haushaltsstrom. Angabe der Werte in kWh/(Pa).

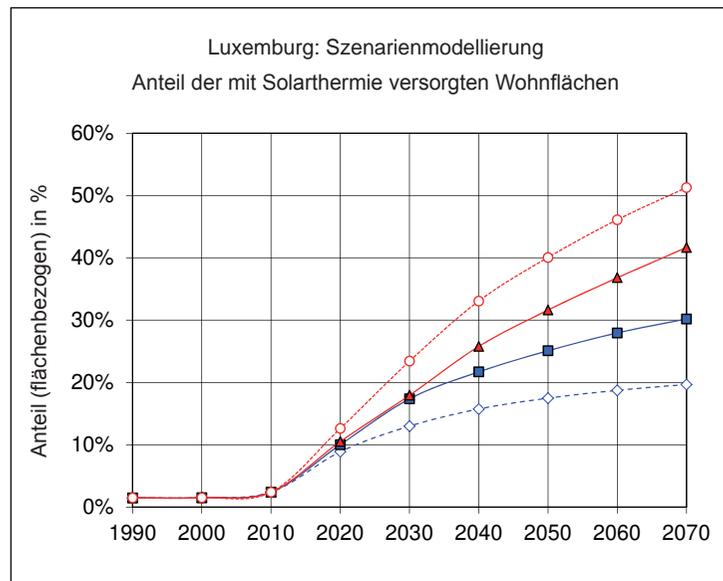
- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 4.9  
Anteile der Wohnflächen, die eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung aufweisen, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurden.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 4.10  
Anteile der mit Solarthermie versorgten Wohnflächen, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurden.



wert für 2010 in Höhe von ca. 1200 kWh/(Pa) bestimmt. Danach wurden die Kennwerte aus (Vallentin 2011, S. IV-59) entsprechend angepasst und weiterentwickelt. Die Ist-Entwicklung und die szenarioabhängigen Kennwerte für die Berechnungen im Kohortenmodell sind in Abbildung 4.8 zusammengestellt.

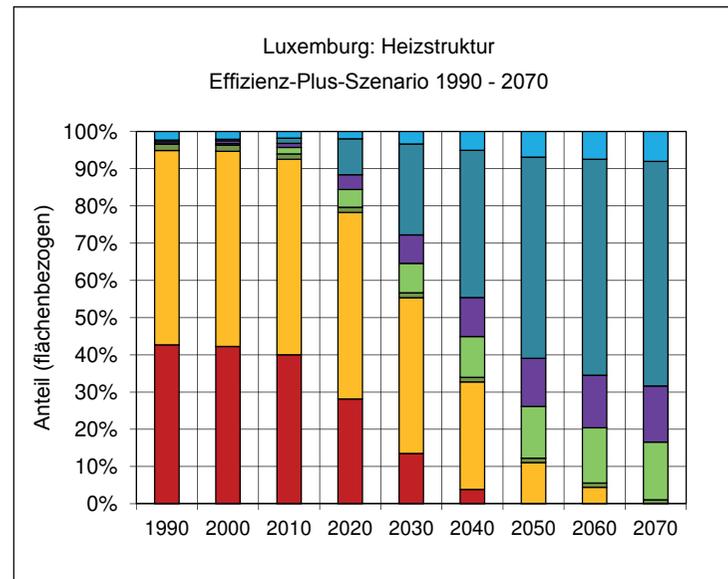
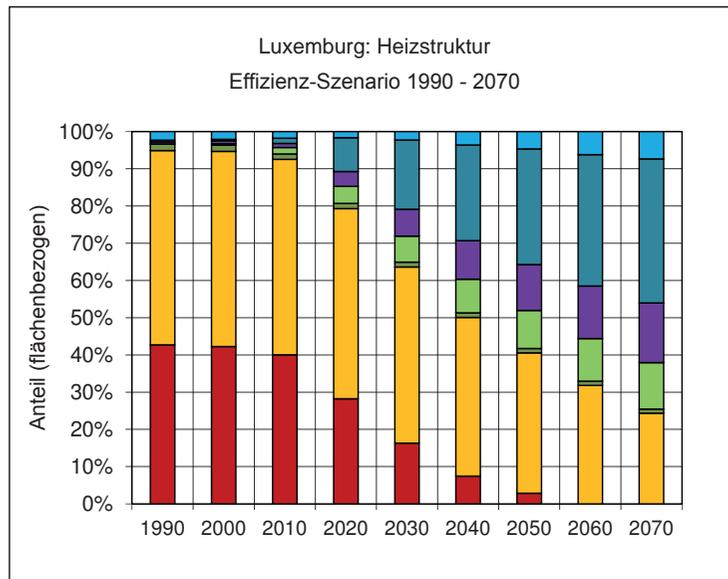
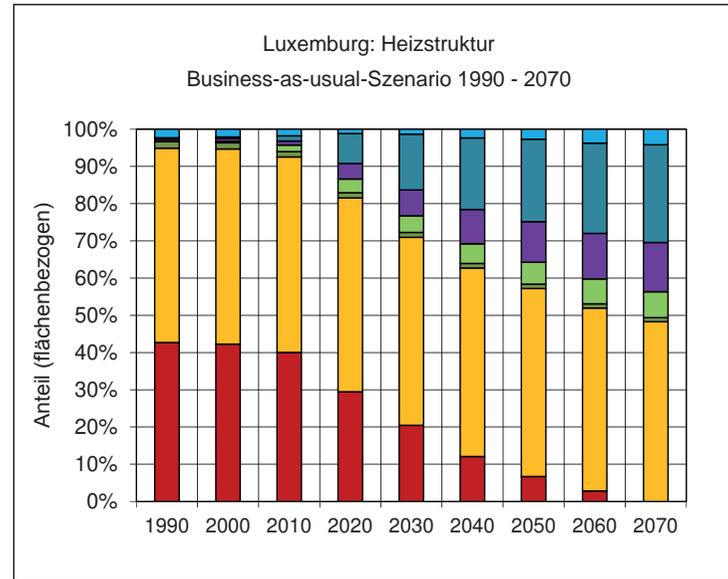
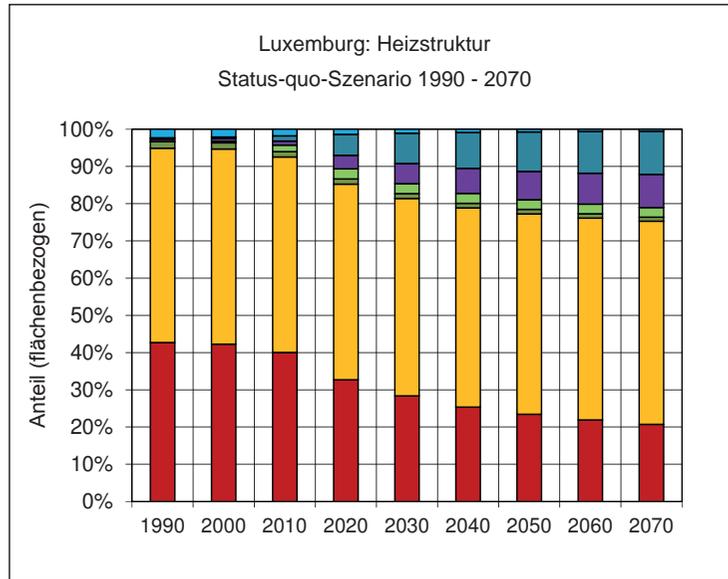
### Modellierung der Lüftungs- und Solaranlagen

Die Anteile der Wohnflächen, die über eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung verfügen, steigt in allen Szenarien deutlich an, wenn auch mit gewissen Unterschieden, die vor allem den Wohngebäudebestand betreffen (Abb. 4.9). Im Neubau ist seit 2017 der Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung durch die Anforderungen der gesetzlichen Anforderungen (RGD 2016) bereits weitgehend vorgegeben. In den Effizienzszenarien werden nach 2020/2030 dann auch bei energetischen Modernisierungen immer mehr Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung eingebaut, während dies im Business-as-usual-Szenario weiterhin nur schleppend erfolgt.

Bei den thermischen Solaranlagen erfolgt in allen Szenarien ein stetiger Ausbau, der jedoch in den Effizienzszenarien deutlich umfassender erfolgt (siehe Abb. 4.10). Zu beachten ist hier, dass sich die Photovoltaik gegenüber der Solarthermie zunehmend als Konkurrenztechnologie etabliert hat. Dies spielt dann später, bei der Ermittlung der Potenziale der Photovoltaikherzeugung (Kapitel 10) eine Rolle.

### Szenarioabhängige Modellierung der Heizstruktur

Auch die Anteile der Versorgungssysteme und der Energieträger der Wärmeversorgung werden in jedem Szenario individuell festgelegt. Sie unterliegen zudem Veränderungen über die Zeit. Für den Ausgangszustand der Heizstruktur wurden die vorhandenen Angaben der Energieausweisregister oder statische Daten zu den Versorgungssystemen der Wohngebäude aus den Jahren 2005 - 2015 herangezogen (siehe Tab. 4.9). In Abbildung 4.11 wird deutlich sichtbar, welche ausgeprägte Dynamik bereits in der jüngsten Vergangenheit wirksam war. Auf-



- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse, zentral
- Biomasse, dezentral
- Erdgas
- Heizöl

Abbildung 4.11  
Darstellung der Heizstruktur des Wohngebäudeparks in Luxemburg 1990 - 2070, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurde. Die Anteile beziehen sich auf die versorgte Wohnfläche des jeweiligen Heizsystems.

fällig ist hierbei vor allem der Rückgang der Ölheizungen und der gleichzeitige Anstieg der mit Wärmepumpen versorgten Wohngebäude. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem darin, in welchem Tempo der Ausstieg aus den fossil gestützten Systemen erfolgt. Hiervon hängt u.a. der Erfolg der Klimaschutzstrategien ab. Am konsequentesten erfolgt dies im Effizienz-Plus-Szenario, am zurückhaltendsten im Business-as-usual-Szenario, in dem auch im Jahr 2050 noch fast 60 % der Wohnflächen fossil versorgt werden.

Für die Wärmeversorgungen werden unterschiedliche Heizsysteme in den Szenarien mit ihrem jährlichen Gesamtnutzungsgraden abgebildet. Diese ändern sich im Betrachtungszeitraum hin zu immer effizienteren Systemen. In den Effizienzszenerarien findet dies schneller und durchgreifender statt als im Business-as-usual-Szenario. Hierbei wird zwischen der Raumwärme- und der Trinkwarmwasserbereitstellung unterschieden.

#### **Szenarioabhängige Modellierung der Stromerzeugung**

Die Modellierung der Stromerzeugung erfolgt in den Szenarien nicht für Luxemburg sondern für Deutschland, weil nur hierzu belastbare Untersuchungen existieren, die eine Zeitperspektive bis 2050 bzw. 2060 aufweisen. Nachdem die luxemburger Stromversorgung relativ stark auf Stromimporte aus Deutschland und Belgien (und in geringerem Maße aus Frankreich) gestützt ist, und dies wahrscheinlich auch in Zukunft der Fall sein wird, erscheint dieses Vorgehen gerechtfertigt.

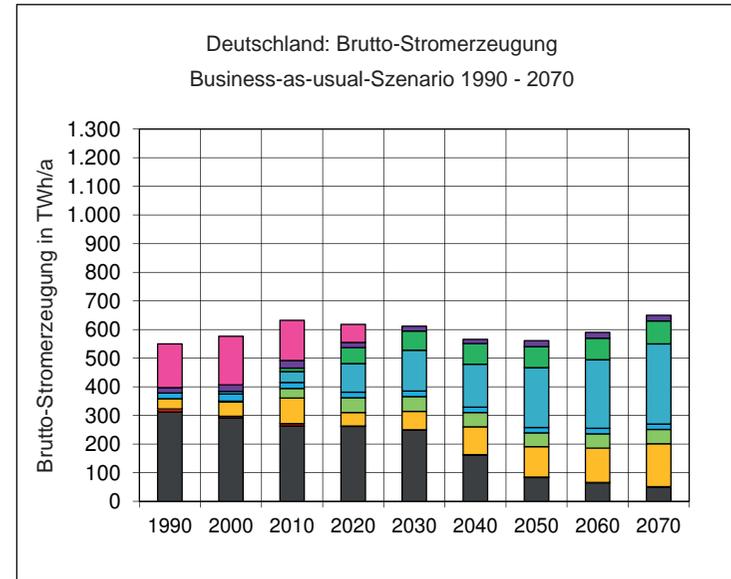
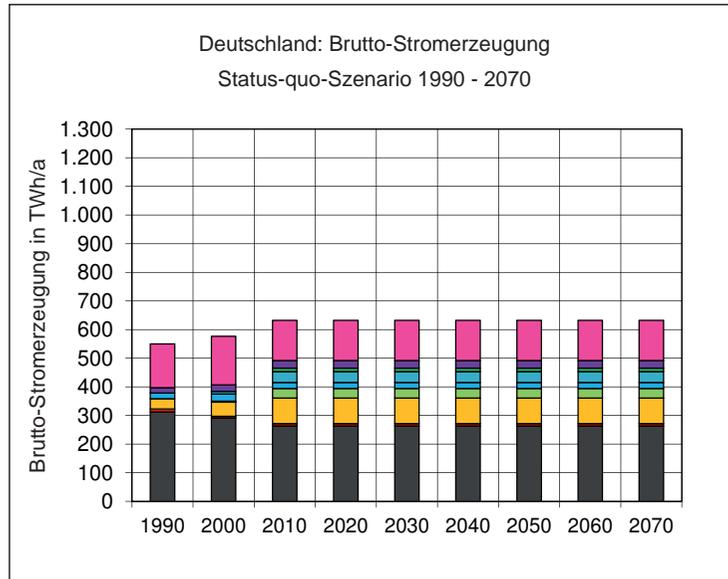
Für das Kohortenmodell wurden folgende Szenarien herangezogen:

- Im Business-as-usual-Szenario wird die Stromerzeugung gemäß der Referenzprognose und dem Trendszenario der Studie „Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose“ (ewi/gws/prognos 2014) modelliert. Hier wird die bisherige Entwicklung des Kraftwerkparks und die bekannten politischen Beschlüsse zur Energiewende und zum Atomenergieausstieg abgebildet und gemäß den dar-

aus ableitbaren Trend fortgeführt.

- Im Effizienz-Szenario wird das „Szenario 2011 A“ der Untersuchung „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ (Nitsch et al. 2012) herangezogen. Dieses verfolgt das Ziel, die Treibhausgasemissionen Deutschlands gegenüber dem Stand 1990 bis 2050 um ca. 80 % zu reduzieren. Die gesamte Bruttostromerzeugung bleibt bis 2050 in etwa auf dem Niveau von 2015 (585 TWh/a) erhalten, ob wohl hier in relevantem Ausmaß neue Stromnutzungen hinzukommen (z.B. Wärmepumpen, Mobilität). Deren Bedarf wird durch Effizienzsteigerungen an anderen Stellen kompensiert.
- Im Effizienz-Plus-Szenario wird das „Szenario 2013“, das eine Weiterentwicklung des zuvor genannten Leitszenarios 2011 darstellt, zugrundegelegt (vgl. Nitsch 2013). In diesem Szenario wird bis 2060 eine nahezu vollständig erneuerbare Energieversorgung modelliert, wodurch die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 86 % und bis 2060 um 94 % gegenüber dem Stand von 1990 reduziert werden können.

In Abbildung 4.12 ist die Bruttostromerzeugung für alle vier Hauptszenarien gegenübergestellt. In allen Szenarien ist der Atomenergieausstieg, wie politisch beschlossen, bis 2022 vollzogen. Übergangsweise steigt dadurch der Anteil der fossilen Stromerzeugung an. In allen Szenarien (mit Ausnahme des Status-quo-Szenarios, das nur eine modellstrategische Funktion hat) steigt danach der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung an. Nur in den Effizienzszenerarien gelingt dies so durchgreifend, dass ein Ausstieg aus der Kohleverstromung gelingt.



- Kernenergie
- Sonstige
- Fotovoltaik
- Windkraft
- Wasserkraft
- Biomasse / Müll
- Erdgas
- Mineralöl
- Kohle

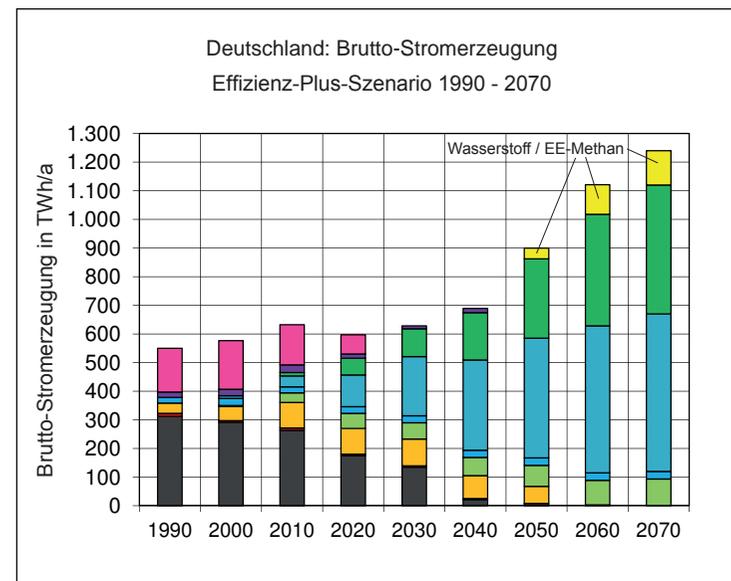
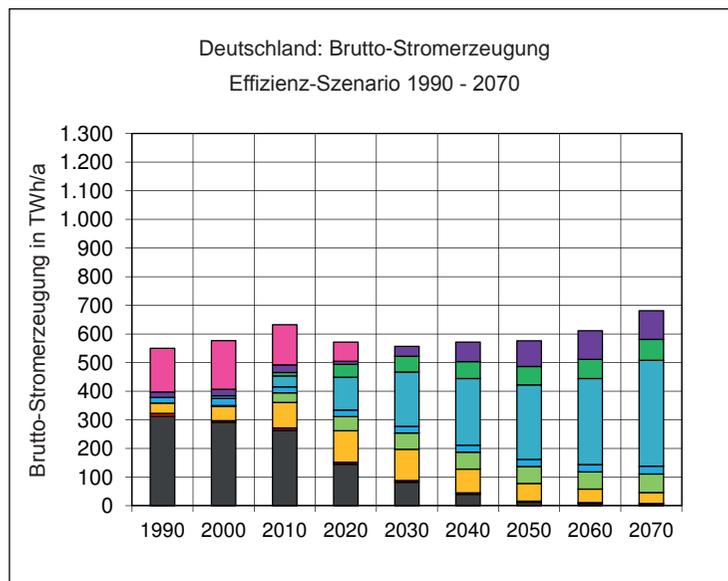


Abbildung 4.12  
Darstellung der Bruttostromerzeugung des Kraftwerkparcs in Deutschland 1990 - 2070, wie sie in den vier Hauptszenarien modelliert wurde. Im Effizienz-Plus-Szenario sind ab 2050 relevante Anteile aus erneuerbarem Wasserstoff bzw. Methan als saisonaler Speicher an der Stromerzeugung beteiligt (hellgelb dargestellt). Angabe der Werte in TWh/a.

- Kernenergie
- Sonstige
- Fotovoltaik
- Windkraft
- Wasserkraft
- Biomasse / Müll
- Erdgas
- Mineralöl
- Kohle

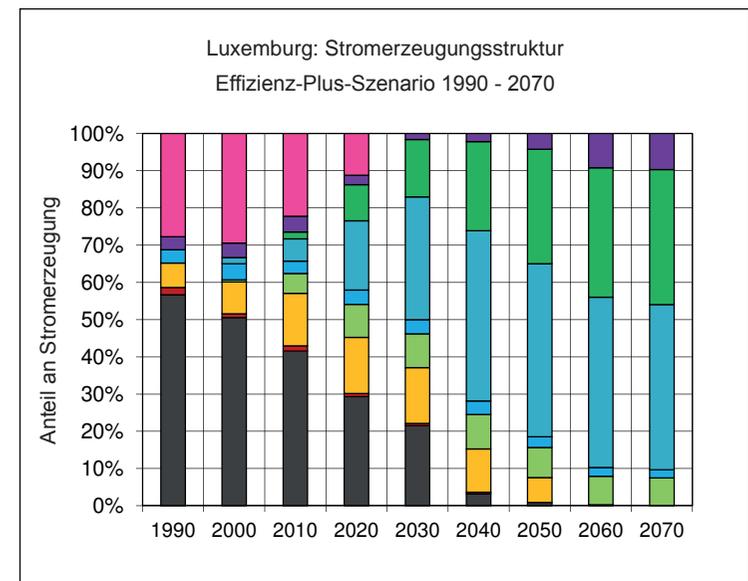
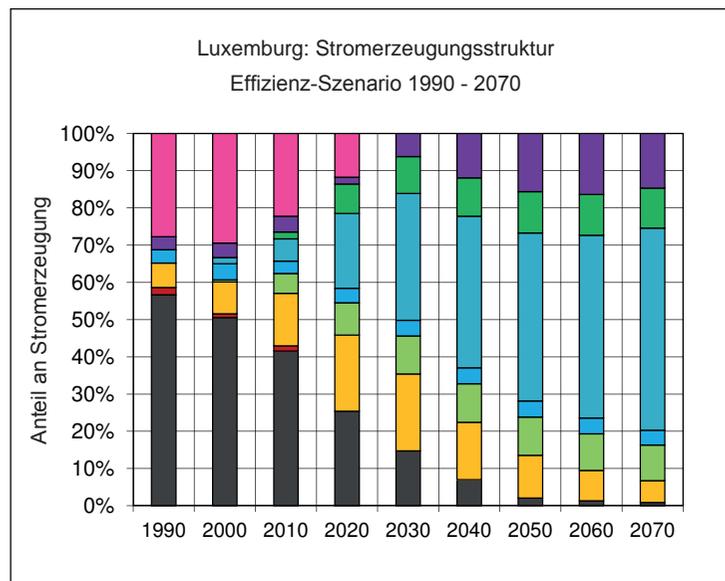
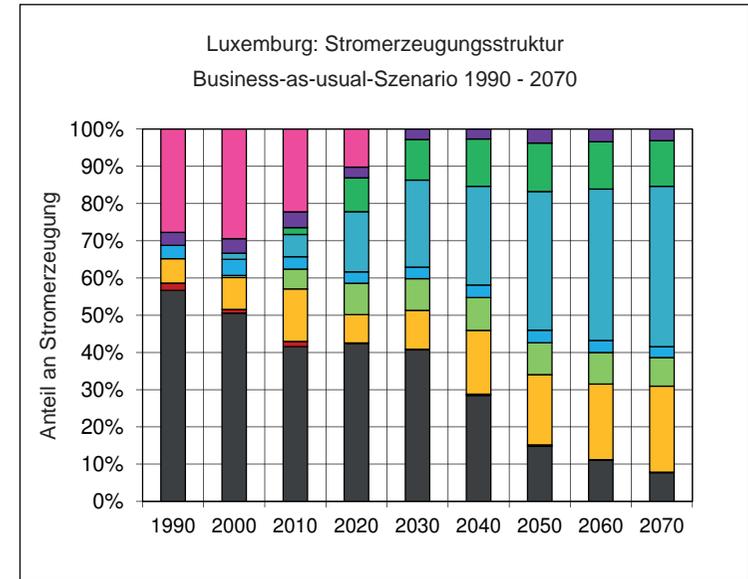
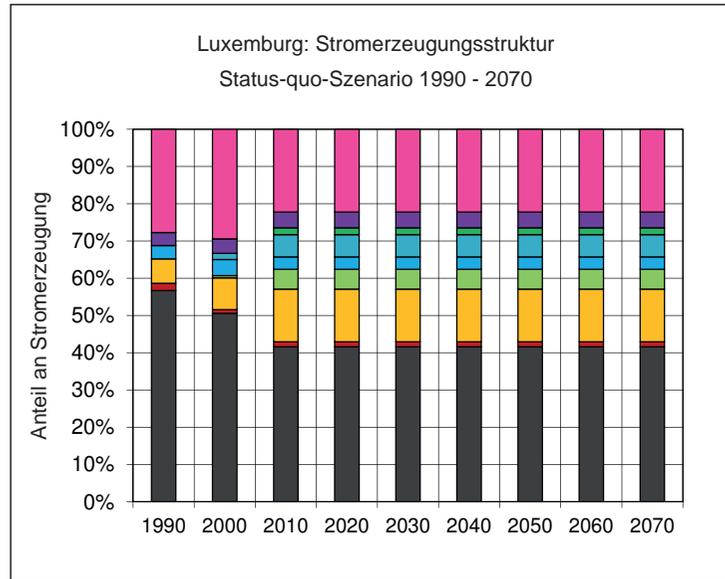
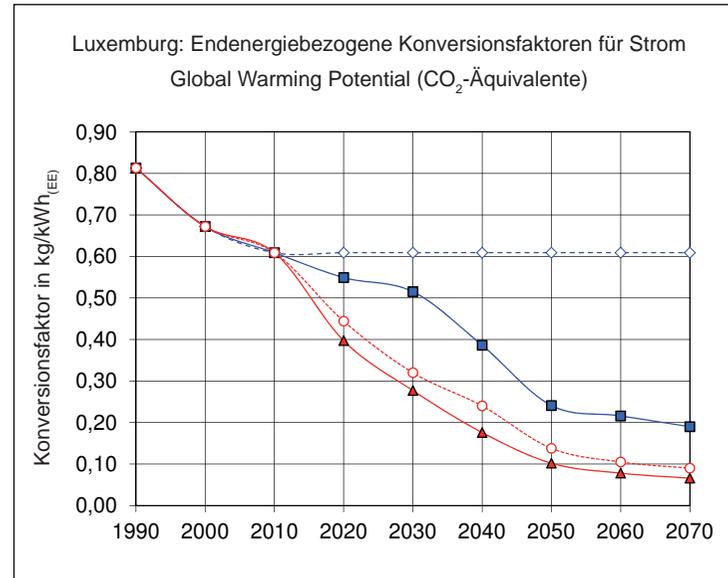
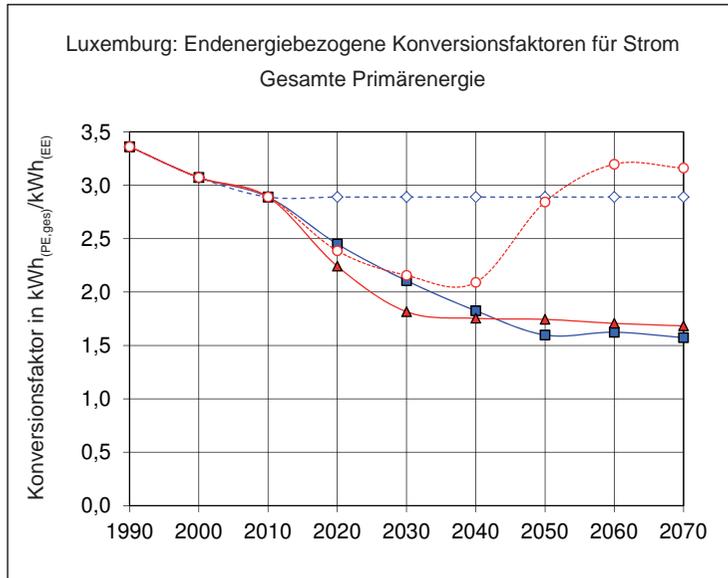
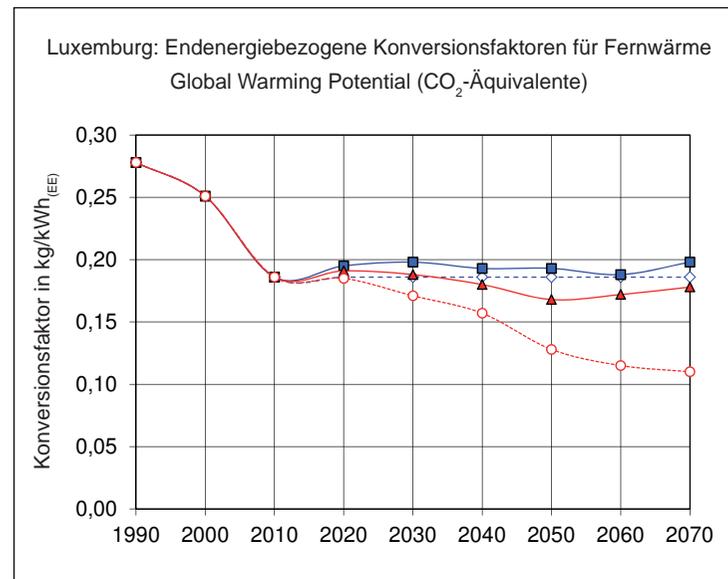
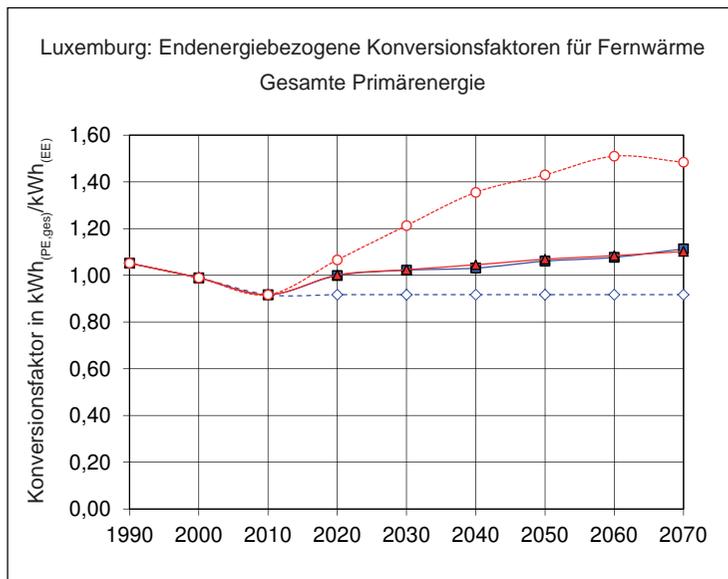


Abbildung 4.13  
 Struktur der Stromerzeugung  
 Deutschlands im Zeitraum 1990 -  
 2070, wie sie den vier Hauptszena-  
 rien auch für Luxemburg zugrunde-  
 gelegt wurde. Die Anteile verstehen  
 sich als Strombezug der Haushalte  
 frei Steckdose. Die Entwicklung bis  
 2010 wurde gemäß den Angaben  
 der Arbeitsgemeinschaft Energie-  
 bilanzen (AGEB 2017) zusamen-  
 gestellt. Die weitere Entwicklung  
 bis 2050/60 folgt verschiedenen  
 Szenarien, die im Text näher erläu-  
 tert sind. Die Entwicklung bis 2070  
 wurde von den Autoren modelliert.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 4.14  
Entwicklung der endenergiebezogenen Konversionsfaktoren für Netzstrom, basierend auf der Stromerzeugungsstruktur in Abb. 4.12 und der Konversionsfaktoren für die eingesetzten Energieträger gemäß (Vallentin 2011, S. IV-88 und IV-90).



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 4.15  
Entwicklung der endenergiebezogenen Konversionsfaktoren für Fernwärme, basierend auf der Fernwärmeerzeugungsstruktur gemäß (Klobasa et al. 2016), eigenen Berechnungen und Konversionsfaktoren für die eingesetzten Energieträger gemäß (Vallentin 2011, S. IV-88 und IV-90). Weitere Erläuterungen: siehe Text

Sowohl im Business-as-usual-Szenario, als auch im Effizienz-Szenario bleibt das Niveau der Bruttostromerzeugung nach 2015 in etwa konstant. Gänzlich anders verhält es sich im Effizienz-Plus-Szenario. Durch die nahezu vollständig erneuerbare Energieversorgung müssen dort künftig sehr viele der derzeit brennstoffgestützten Systeme (Strom, Wärme, Verkehr) durch stromgestützte Systeme ersetzt werden. Das führt zu einem starken Anstieg der Stromnachfrage in allen Sektoren. Hinzu kommt das Problem der saisonalen Speicherung (vor allem zur Überbrückung der Winterlücke), wodurch der Strombedarf nochmals ansteigt. Ab 2050 sind daher im Effizienz-Plus-Szenario zunehmend relevante Anteile von rückverstromten Wasserstoff oder Methan enthalten, die zuvor aus Stromüberschüssen (vor allem im Sommer) erzeugt und danach zwischengespeichert wurden. In Abbildung 4.12 sind diese als hellgelbe Balkenanteile gekennzeichnet.

Die Struktur der Stromerzeugung ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Auch hier zeigen sich die zuvor beschriebenen Unterschiede zwischen den Szenarien, insbesondere was den Ausstieg aus der fossilen Stromerzeugung angeht.

In Abbildung 4.14 sind abschließend die endenergiebezogenen Konversionsfaktoren zur Bestimmung des Primärenergiebedarfs (Primärenergiefaktoren für die gesamte Primärenergie) und die strombedingten Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) zusammengestellt. Besonders auffällig ist der starke Anstieg des Primärenergieaufwandes im Effizienz-Plus-Szenario, der aufzeigt, dass ein vollständig erneuerbares Energiesystem (auch aufgrund von Verlagerungseffekten) eine gegenüber heute deutlich aufwändigere Stromerzeugung bedingt.

#### **Modellierung der KWK-Produktion (Fernwärme)**

Die Modellierung der Kraft-Wärme-Kopplungs-Produktion (KWK) basiert für den Zeitraum 2005 - 2013 auf Daten des luxemburgischen Wirtschaftsministeriums (Klobasa 2017), der zugehörigen Studie Bewertung des Potenzials für den Einsatz

der hocheffizienten KWK (Klobasa et al. 2016) sowie Angaben in weiteren Berichten, die Angaben zur bisherigen bzw. künftigen Entwicklung der KWK-Produktion in Luxemburg enthalten.

Die Modellierung der weiteren Entwicklung wurde szenarioabhängig nach folgenden Gesichtspunkten vorgenommen:

- Im Business-as-usual-Szenario wird die KWK-Produktion gegenüber dem momentanen Stand noch etwas weiter ausgebaut während gleichzeitig der erneuerbare Anteil stetig zunimmt.
- Im Effizienz-Szenario wird der Anteil der Biomasse-KWK gegenüber dem Business-as-usual-Szenario deutlich gesteigert. Ab 2050 geht die KWK-Produktion allmählich zurück, um dem dann deutlich geringeren spezifischen Wärmebedarf des Gebäudeparks, der über Wärmenetze versorgt wird, gerecht zu werden.
- Im Effizienz-Plus-Szenario geht die KWK-Produktion aufgrund des geringeren Wärmebedarfs der Gebäude gegenüber dem Effizienz-Szenario ab 2040 nochmals weiter zurück. Der Brennstoffeinsatz der biomassegestützten Produktion bleibt jedoch identisch mit dem Effizienz-Szenario, d.h. der Anteil der gasgestützten Produktion geht dadurch noch mehr zurück. In diesem explorativen Szenario erfolgt ab 2020/30 allmählich der Einstieg in die Erzeugung von erneuerbarem Methan als Speichermedium bzw. ein entsprechender Bezug über Importe aus dem Gasnetz.

Das Methan wird aus Überschussstrom (z.B. Windkraft, Photovoltaik) über Elektrolyse und Umwandlung von Wasserstoff in Methan über die Zuführung von Kohlendioxid gewonnen. Das so erzeugte Gas kann problemlos im Gasnetz und in Gaskavernen gespeichert werden. Es wird davon ausgegangen, dass entsprechend der Stromerzeugung im Effizienz-Plus-Szenario, diese Speicherstruktur ganz oder teilweise im Ausland (speziell Deutschland) aufgebaut wird (siehe auch Abb. 9.1). Der An-

teil im Netzgas beträgt dort ausgehend von 5 % im Jahr 2030 bis 2050 bereits 50 %. Weil es sich dabei um einen aufwändigen Prozess handelt, ist es sinnvoll, die Rückverstromung in Heizkraftwerken bzw. BHKW's (anstelle in reinen Gaskraftwerken) vorzunehmen, damit der Gesamtwirkungsgrad (Erzeugung, Speicherung, Rückverstromung) nicht zu stark abnimmt. Die gasgestützte KWK-Produktion ist aus dieser Perspektive von besonderer strategischer Bedeutung, weil sie erzeugerseitig die für diese Speichertechnologie vorteilhafteste Umwandlungsoption darstellt.

Die Zuordnung des Brennstoffeinsatzes erfolgt mit der sog. Finnischen Methode. Dabei wird der primärenergetische Vorteil der gekoppelten Erzeugung zeitabhängig mit Referenzprozessen für die getrennte Produktion von Wärme und Strom abgeglichen. Dieser Vorteil wird dann zunächst dem KWK-Prozess als Ganzes und dann anteilig dem erzeugten Strom und der erzeugten Wärme zugeordnet. In Abbildung 4.14 sind die so ermittelten Primärenergie-Gesamt- sowie die GWP(CO<sub>2</sub>-Äquivalent)-Faktoren für die drei Szenarien abgebildet.

### **Modellierung der Photovoltaikerzeugung**

Einen Sonderfall, der separat vom sonstigen Kohortenmodell betrachtet wurde, stellt die Photovoltaikerzeugung auf Wohngebäuden dar.

Einerseits ist die Solarstromerzeugung bereits im Stromerzeugungsmodell enthalten – und dort als Netzstrom abgebildet. Andererseits ergeben sich durch die Eigennutzung in Wohngebäuden Synergieeffekte, die künftig von strategischem Interesse sein können. Sie wurden im Kohortenmodell deshalb nicht mit abgebildet, weil sie von einer ganzen Reihe von Annahmen abhängen, die nicht mit hinreichender Genauigkeit modelliert werden konnten bzw. die außerhalb des Bilanzrahmens der Studie liegen.

Dazu zählen:

- In welchem Umfang kommen bei Gebäuden mit PV-Anlagen stromgestützte Wärmeversorgungen (Wärmepumpen, Direktsysteme) zum Einsatz?
- Soll die PV-Anlage zusammen mit anderen erneuerbaren Energiesystemen (z.B. BHKW, Kleinwindanlage, thermische Solaranlage, Holzheizung) eingesetzt werden?
- Können mehrere PV-Anlagen im Sinne von Arealnetzen zusammengeschlossen werden, z.B. um eine höhere Eigennutzung zu erzielen?
- Wird in Verbindung mit der PV-Anlage ein Speichersystem installiert (evt. auch zu einem späteren Zeitpunkt)?
- Soll die PV-Anlage auch für Elektromobilität mit genutzt werden?

Diese Fragestellungen und eine Herleitung der Potenziale der Photovoltaikerzeugung werden in Kapitel 10 ausführlich behandelt. Dort wird vor allem zusätzlich betrachtet, in welchem Umfang die auf den Dächern der Wohngebäude installierten Photovoltaikanlagen einen Beitrag zur Deckung des Strombedarfes der Elektromobilität leisten kann.

## 5 Entwicklung Heizwärmebedarf 2010 - 2070

Auf der Basis des zuvor dokumentierten Kohortenmodells können nun die Ergebnisse zum Wärmebedarf des Wohngebäudeparks in Luxemburg differenziert nach strategischen Gruppen ausgewertet werden. Zunächst wird hier nur der Nutzwärmebedarf für Raumheizung betrachtet. Im nächsten Abschnitt werden dann auch die Heizsysteme miteinbezogen und der Endenergiebedarf für Raumwärme bestimmt. Für den spezifischen Heizwärmebedarf werden die Nutzflächen in Form der Energiebezugsfläche  $A_{EB}$  (hier definiert als die beheizte Wohnfläche) als Bezugsgröße verwendet. Der mittlere Heizwärme-Kennwert ist eine Schlüsselgröße für die Energieeffizienz der privaten Haushalte beim Heizbedarf, indem er die energetische Qualität des Wohngebäudeparks zum jeweiligen Zeitpunkt kennzeichnet.

Der Jahresheizwärmebedarf wird für jeden der 70 Gebäudetypen in 5-Jahres-Schritten in Form einer vollständigen Heizwärmebilanz bestimmt. Dabei wird bei jedem Zeitschritt geprüft, ob und welche Erneuerungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen anstehen und in welcher energetischen Qualität diese, gemäß den Vorgaben des jeweiligen Szenarios, auszuführen sind. Die Angaben zu den Hausgruppen und den Randbedingungen der energetischen Berechnungen sind in Abschnitt 4 erläutert.

Im Hinblick auf den spezifischen Jahresheizwärmebedarf findet in allen Szenarien ein in etwa lineares Absinken der Werte statt, wenn auch mit unterschiedlicher Geschwindigkeit (siehe Abb. 5.1). Dafür verantwortlich sind einerseits die Effizienzverbesserungen bei allen Gebäudekomponenten sowie den Lüftungskonzepten, die gleichermaßen Neubauten und energetische Modernisierungen im Bestand betreffen, andererseits haben auch die umfassenden Neubauaktivitäten einen Einfluss auf den spezifischen Jahresheizwärmebedarf, weil die Kenn-

werte im Neubau deutlich unter denen im Bestand liegen. Der Neubau hat nicht alleine die Aufgabe, den steigenden Bedarf nach Wohnflächen zu decken, sondern dient auch als Ersatz für die Wohnungen und Wohnhäuser, die allmählich aus dem Bestand verschwinden, weil sie abgerissen oder anderweitig genutzt werden.

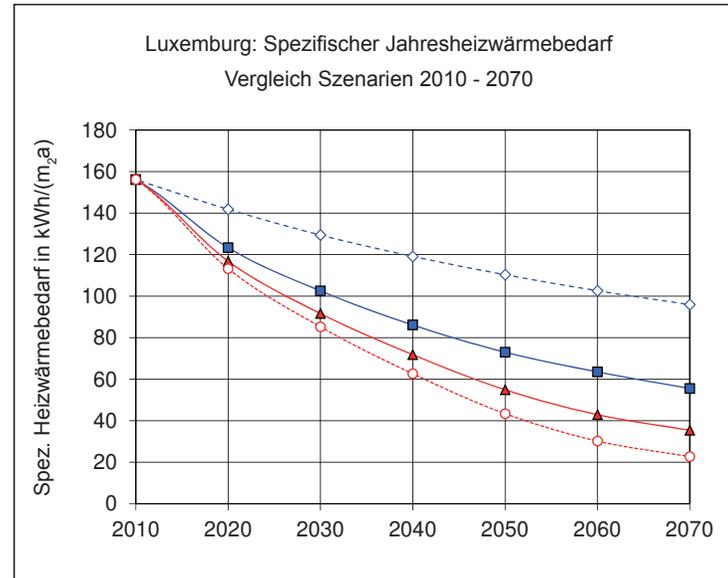
Die Entwicklung startet 1990 mit einem Ausgangswert von 184 kWh/m<sup>2</sup>a und geht 2010 auf 156 kWh/m<sup>2</sup>a zurück. Im Business-as-usual-Szenario lassen sich die mittleren Heizwärmebedarfe bis 2050 auf 73 kWh/m<sup>2</sup>a verringern. Im Effizienz-Szenario sinken sie auf etwa 55 kWh/m<sup>2</sup>a und im Effizienz-Plus-Szenario liegen sie mit nur 43 kWh/m<sup>2</sup>a nochmals deutlich tiefer. Die genannten Zahlen verstehen sich immer als Mittelwerte des gesamten Wohngebäudeparks.

Betrachtet man hingegen den gesamten Jahresheizwärmebedarf, so zeigt sich ein anderes Bild (siehe Abb. 5.2). Hier überlagern sich zwei Effekte, nämlich der deutliche Zuwachs an Wohnflächen über den gesamten Betrachtungszeitraum und die gleichzeitig sinkenden spezifischen Kennwerte je Nutzfläche. Im Status-quo-Szenario steigen die Bedarfswerte von 3740 GWh/a im Jahr 1990 bis 2030 auf etwa 4290 GWh/a an und verbleiben auch danach auf hohem Niveau. Im Business-as-usual-Szenario wird bereits eine deutliche Minderung erzielt. Im Jahr 2050 liegt der Bedarf dann bei knapp 2930 GWh/a. Erst unter den Randbedingungen der Effizienz-Szenarien ergeben sich mittel- und langfristig noch weitergehende Reduktionen. Der Heizwärmebedarf im Jahr 2030 beträgt dort 3060 GWh/a und kann bis 2050 auf ca. 2240 GWh/a verringert werden, was etwa 54 % des Bedarfs im Jahr 2010 entspricht. Im Effizienz-Plus-Szenario wird mit 2780 GWh/a im Jahr 2030 bzw. 1660 GWh/a im Jahr 2050 nochmals deutlich weniger

Heizwärme benötigt. Der Bedarf von 2050 entspricht dann nur noch 40% des Ausgangswertes von 2010. Die hier aufgezeigten Entwicklungen setzen sich auch nach dem Jahr 2050 in ähnlichem Tempo weiter fort.

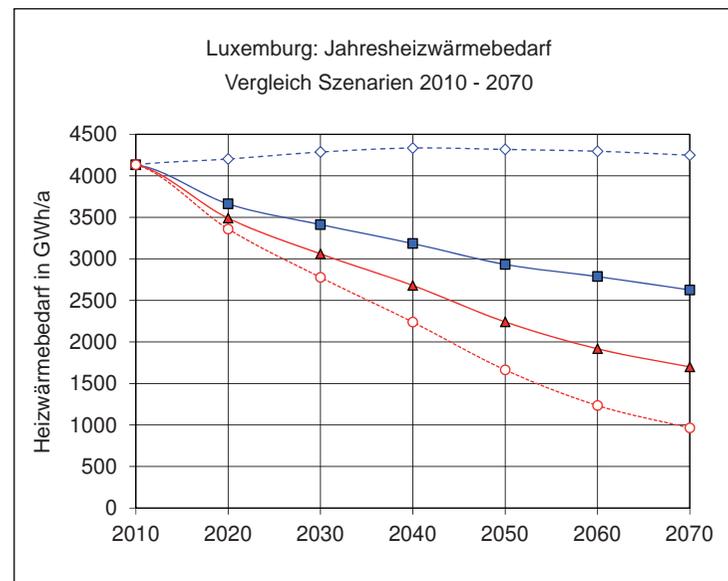
Eine differenzierte Analyse gemäß strategischen Typen (siehe Abb. 5.3.a+b sowie 5.4.a+b) zeigt auf, dass die größten Reduktionspotentiale im voll sanierbaren Bestand liegen. Die Bedarfswerte dieser zwei Gruppen betragen ausgehend vom Jahr 2010 mit 3450 TWh/a (100%) dann im Jahr 2050 im Business-as-usual-Szenario 1650 TWh/a (47,8%), im Effizienz-Szenario 1160 TWh/a (33,6 %) und im Effizienz-Plus-Szenario 930 TWh/a (27,0%). Hingegen können im bedingt sanierbaren Bestand aufgrund der hohen Eingriffsempfindlichkeit nur geringe Effizienzverbesserungen erzielt werden. Der Neubau seit 2010 spielt ebenfalls eine Rolle für den Gesamterfolg. Im Business-as-usual Szenario entfallen im Jahr 2050 ca. 890 TWh/a auf die Neubauaktivitäten seit 2010 während dieser Wert im Effizienz-Szenario ca. 720 TWh/a und im Effizienz-Plus-Szenario sogar nur ca. 410 TWh/a beträgt. Hier zeigt sich, dass der Neubau im Grunde den „Bestand von morgen“ darstellt und wegen des starken Wohnflächenzuwachses mit von strategischer Bedeutung für den Gesamterfolg ist.

Die Auswertung des spezifischen jährlichen Heizwärmebedarfs nach strategischen Typen (Abb. 5.5 a+b sowie 5.6 a+b) zeigt auf, dass die spezifischen Bedarfswerte der Baudenkmale sowie des sonstigen bedingt sanierbaren Bestandes immer deutlich über denen der beiden anderen Gruppen liegen. Der Neubau nach 2010 wiederum weist durchgehend günstigere Heizwärme-Kennwerte auf, als der umfassend sanierbare Bestand, weil der Altbau nur Schritt für Schritt erneuert werden kann und viele Anschlüsse aufweist, die nicht wärmebrückenfrei ausgeführt werden können sowie weitere Umsetzungshindernisse (z.B. nachbarrechtliche Probleme, Platzbedarf) bestehen. Auch die Integration der haustechnischen Anlagen ist im Bestand bedeutend schwieriger als im Neubau.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 5.1  
Entwicklung des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs in kWh/m<sup>2</sup>a in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

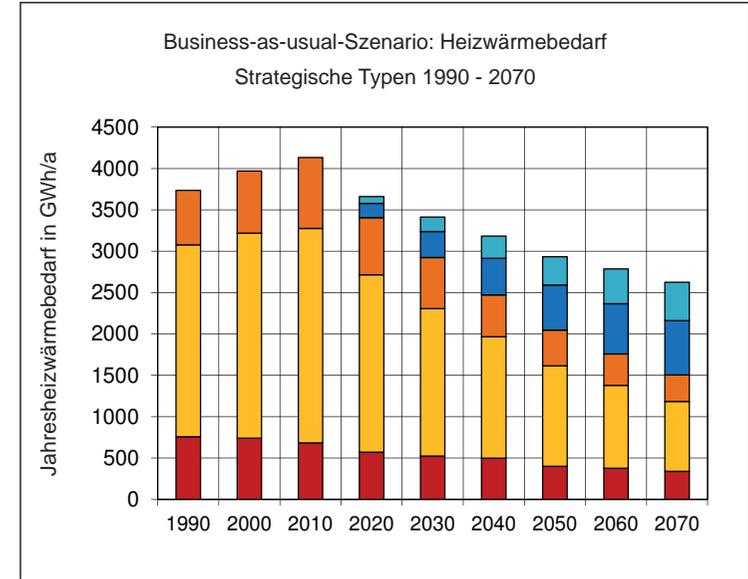
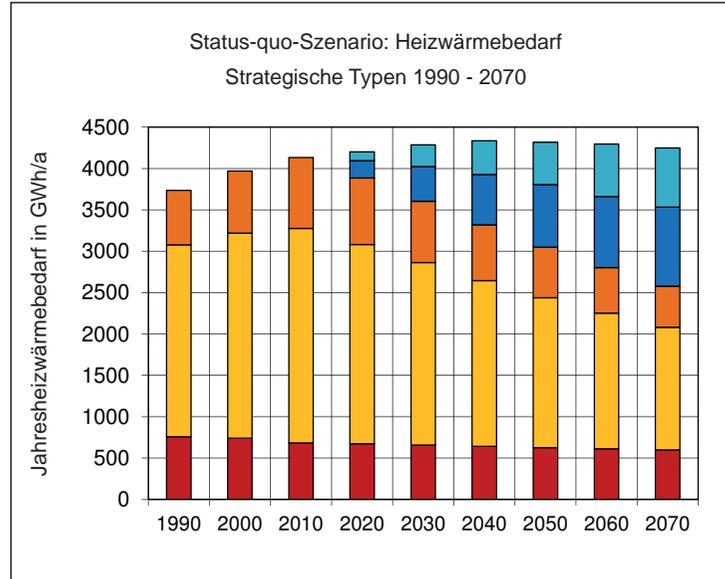


- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 5.2  
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs in GWh/a in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

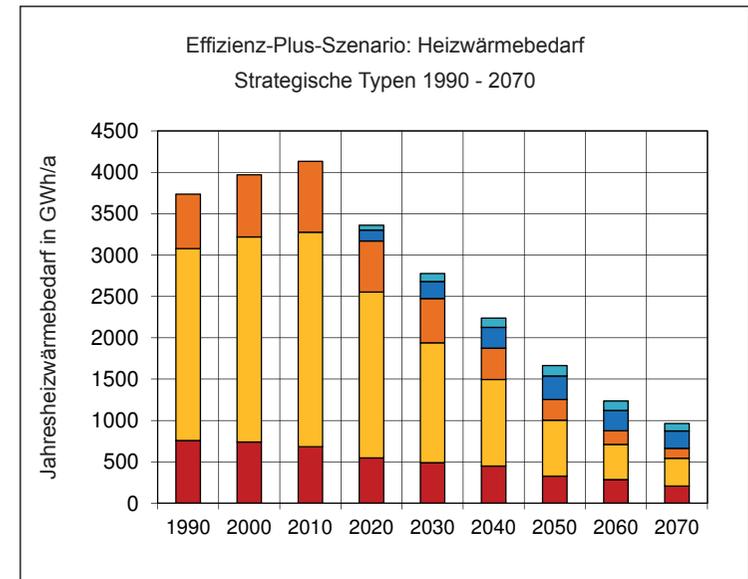
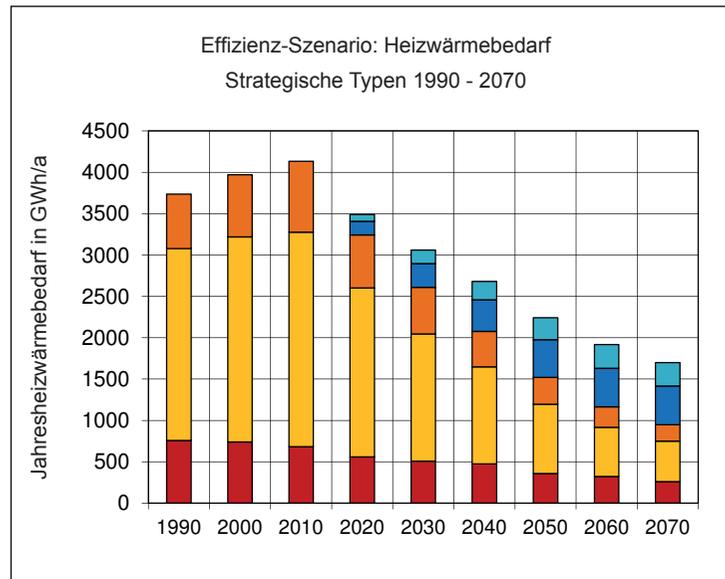
- Neubau MFH ab 2010
- Neubau EFH ab 2010
- Bestand MFH
- Bestand EFH
- Bedingt sanierbarer Bestand

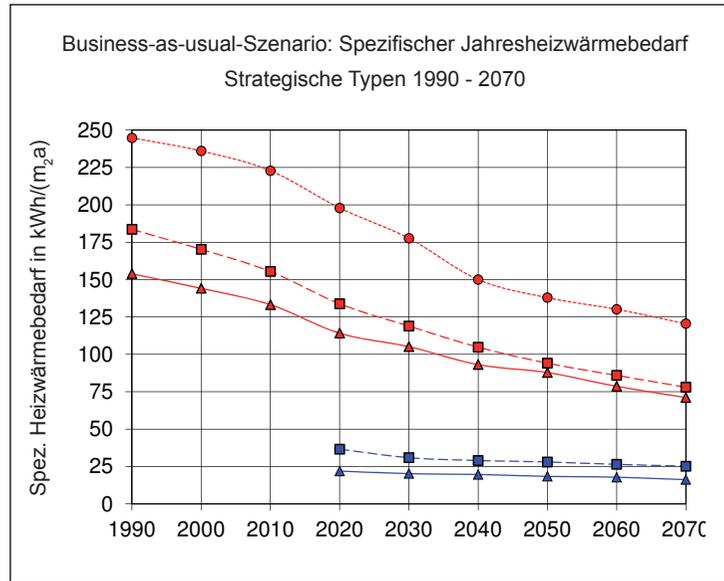
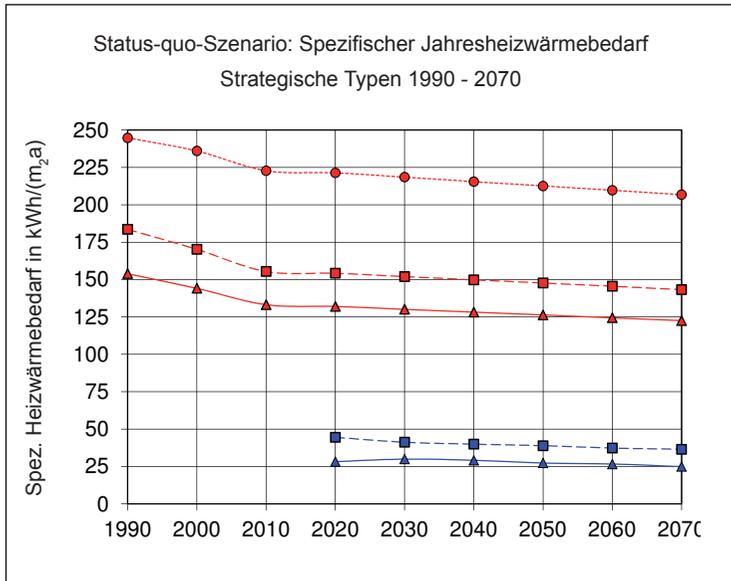
Abbildung 5.3 a + b  
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparks 1990 - 2070 in Luxemburg im Status-quo- (a) und Business-as-usual-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in GWh/a.



- Neubau MFH ab 2010
- Neubau EFH ab 2010
- Bestand MFH
- Bestand EFH
- Bedingt sanierbarer Bestand

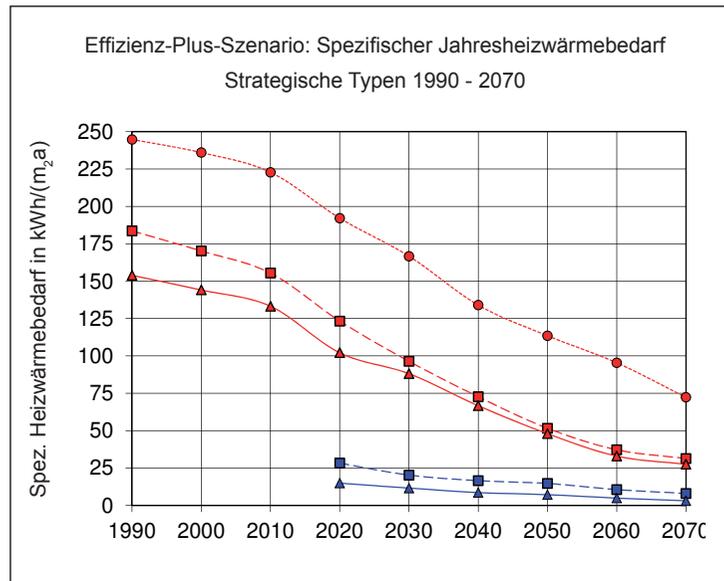
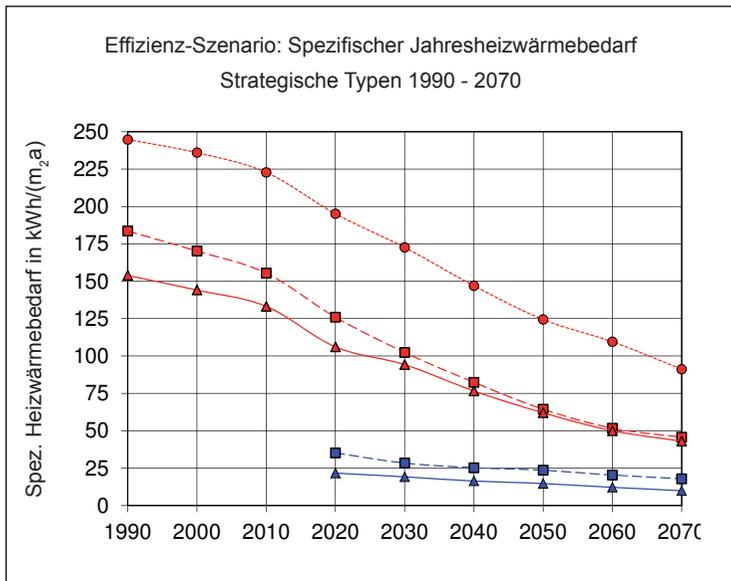
Abbildung 5.4 a + b  
Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparks 1990 - 2070 in Luxemburg im Effizienz- (a) und im Effizienz-Plus-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in GWh/a.





- Bedingt sanierbarer Bestand
- Bestand EFH
- ▲- Bestand MFH
- Neubau EFH (seit 2010)
- ▲- Neubau MFH (seit 2010)

Abbildung 5.5 a + b  
Entwicklung des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparcs 1990 - 2070 in Luxemburg im Status-quo- (a) und im Business-as-usual-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in kWh/(m²a).



- Bedingt sanierbarer Bestand
- Bestand EFH
- ▲- Bestand MFH
- Neubau EFH (seit 2010)
- ▲- Neubau MFH (seit 2010)

Abbildung 5.6 a + b  
Entwicklung des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs des Wohngebäudeparcs 1990 - 2070 in Luxemburg im Effizienz-Szenario (a) und im Effizienz-Plus-Szenario (b). Ausweisung der Werte getrennt nach den „strategischen Typen“ in kWh/(m²a).

Der entscheidende Unterschied besteht jedoch in den eingesetzten energetischen Qualitäten der verschiedenen Szenarien. Während im Status-quo- (Abb. 5.5.a) und im Business-as-usual-Szenario (Abb. 5.5.b) nur geringe Verbesserungen erreicht werden können, zeigt sich im Effizienz-Szenario (Abb. 5.6.a) ab 2020 der Erfolg der Dämm- und Lüftungsstrategien in deutlich absinkenden spezifischen Heizwärme-Kennwerten. Zu beachten ist hierbei, dass im Effizienz-Szenario bei den Baudenkmalen und im bedingt sanierbaren Bestand vorerst keine Innendämmungen zum Einsatz kommen. Dies erfolgt erst im Effizienz-Plus-Szenario (Abb. 5.6.b), in dem neben Innendämmungen zusätzlich technologisch besonders hochwertige Komponenten zum Einsatz kommen, deren Effizienz gegenüber heutigen Standards deutlich verbessert ist (hocheffiziente Wärmepumpen, Vakuumdämmung). Dadurch kann nach 2040 auch in den eingriffsempfindlichen Beständen eine spürbare Reduktion des spezifischen Jahresheizwärmebedarfs erreicht werden. Auch in den anderen strategischen Gruppen ergeben sich durchgängig geringere spezifische Bedarfswerte für Heizwärme als im Effizienz-Szenario.

Abschließend werden die Ergebnisse zum Heizwärmebedarf als Absolutwerte in GWh/a in detaillierter Form für jede der 70 Gebäudetypen abgebildet. Durch die hier gewählte Darstellung in Abb. 5.7 - 5.9 wird deutlich, dass sich der Heizwärmebedarf als Summe der Einzelbeiträge aller Gebäudetypen zusammensetzt, die jeweils individuellen Veränderungen unterliegen: Im Bestand lassen sich die Absolutwerte in jedem Typ entweder durch energetische Verbesserungen oder durch Abgänge verbessern. Gleichzeitig kommen durch den Neubau neue Gebäudetypen mit neuen Bedarfswerten hinzu. Erst in der Überlagerung der zeitlich abgestimmten und im Modell genau festgelegten Einzeleffekte kann die Gesamtentwicklung verstanden und auch quantitativ nachvollzogen werden.

Durch die gewählte Modellierung im Kohortenmodell wird die Entwicklung des Heizwärmebedarfs als evolutionärer Prozess schrittweiser Verbesserung erkennbar. Die Gelegenheiten für

Effizienzverbesserungen ergeben sich nur nach und nach über den gesamten Betrachtungszeitraum und sind im Modell aus wirtschaftlichen Gründen immer an ohnehin anstehende Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen gekoppelt.

Die Unterschiede in den Szenarien liegen vor allem in den dort jeweils eingesetzten energetischen Qualitäten der Bau- und Technikkomponenten. Liegt eine hohe Eingriffsempfindlichkeit vor, können die davon betroffenen Maßnahmen nicht oder nur in abgeänderter Form durchgeführt werden. Ein Monitoringsystem der Klimaschutzmaßnahmen ist ebenfalls auf eine derartige nach räumlichen und sonstigen Merkmalen (z.B. Eingriffsempfindlichkeit, Baualter, Gebäudetyp) differenzierte Typologie angewiesen.

Der Gebäudepark stellt insgesamt ein eher träges System dar, in dem sich neue Standards aufgrund der langen Nutzungsdauern der Bauteile und Komponenten nur langsam durchsetzen können. Für effektive Minderungspfade sind daher langfristige Orientierungen notwendig. Daher war es sinnvoll als Bezugsjahr für die energetischen Ziele Luxemburgs das Jahr 2050 zu wählen und Zwischenziele für 2030 und 2040 zu definieren.

Die Entwicklung in der Anlaufphase seit 1990 ist ebenfalls aufschlussreich. Es ist gut zu erkennen, dass in diesem Zeitraum kaum energetische Verbesserungen im Hinblick auf den Heizwärmebedarf im Bestand erzielt werden konnten, während durch den Neubau immer neue Energieverbraucher hinzukamen. Eine Trendwende ist erst ab dem Jahr 2000 - 2005 sichtbar. Erst dann gehen die Heizwärme-Bedarfswerte im Bestand allmählich zurück, was ab 2015 dann in allen Szenarien zu absinkenden Werten führt. Dieser Minderungspfad fällt dann in der Folge im Business-as-usual-Szenario nur schwach aus, während im Effizienz-Szenario und noch mehr im Effizienz-Plus-Szenario im Laufe der nächsten Jahrzehnte einen deutlichen Rückgang der Bedarfswerte zur Folge hat.

Business-as-usual-Szenario - Luxemburg - Kohortenmodell: Jahresheizwärmebedarf in GWh/a

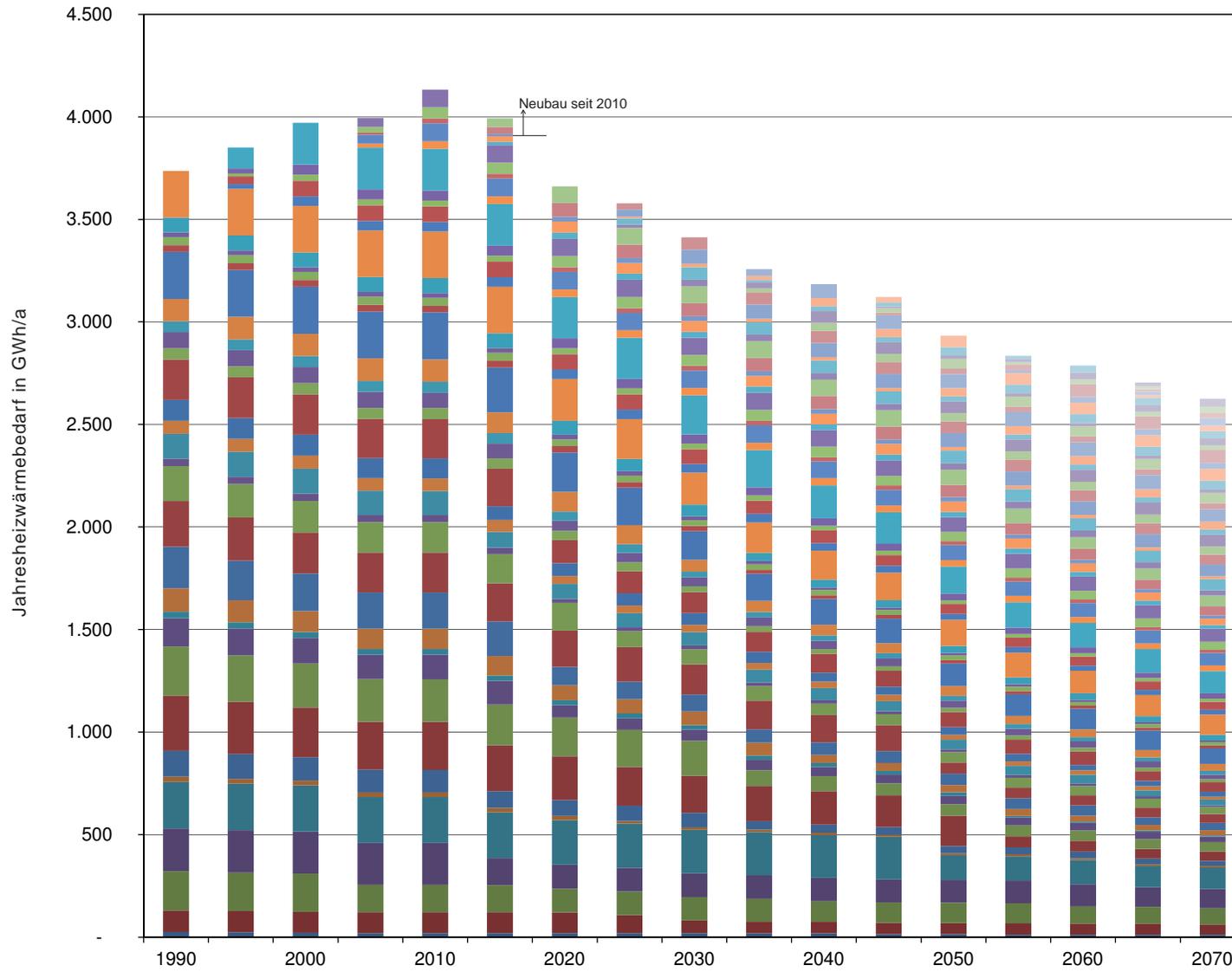


Abbildung 5.7  
Darstellung der Ergebnisse zum jährlichen Heizwärmebedarf des Kohortenmodells des Wohngebäudepark Luxemburgs im Business-as-usual-Szenario. Die Werte der insgesamt 70 Gebäudetypen sind aufeinander gestapelt und bilden damit in differenzierter Form die Gesamtentwicklung in 5-Jahres-Schritten im Zeitraum 1990 - 2070 ab.

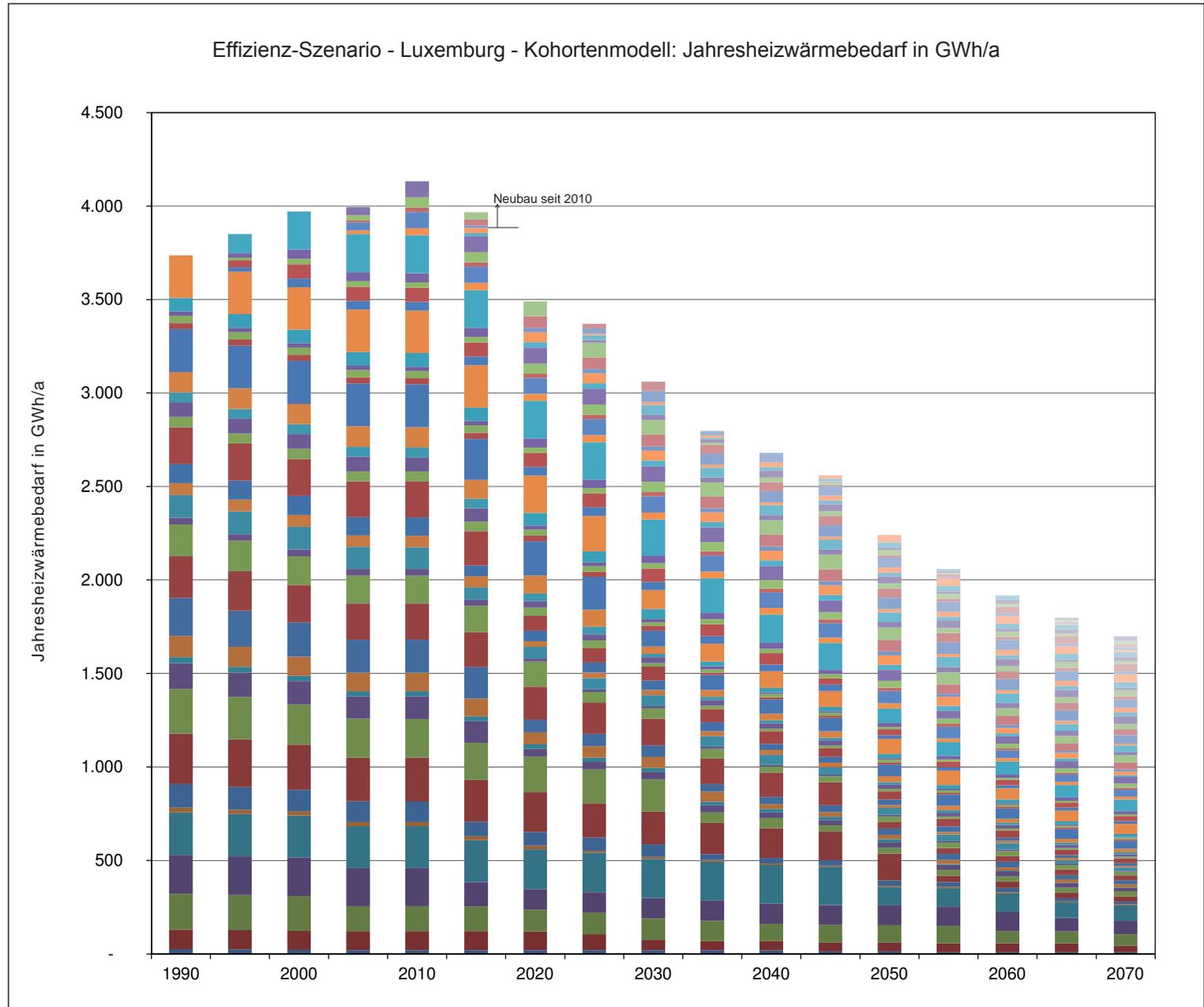
Oben sind in abgeschwächten Farbtönen die Neubauten seit 2010 aufgetragen.

Angabe der Werte in GWh/a.

Abbildung 5.8  
 Darstellung der Ergebnisse zum jährlichen Heizwärmebedarf des Kohortenmodells des Wohngebäudepark Luxemburgs im Effizienz-Szenario. Die Werte der insgesamt 70 Gebäudetypen sind aufeinander gestapelt und bilden damit in differenzierter Form die Gesamtentwicklung in 5-Jahres-Schritten im Zeitraum 1990 - 2070 ab.

Oben sind in abgeschwächten Farbtönen die Neubauten seit 2010 aufgetragen.

Angabe der Werte in GWh/a.



Effizienz-Plus-Szenario - Luxemburg - Kohortenmodell: Jahresheizwärmebedarf in GWh/a

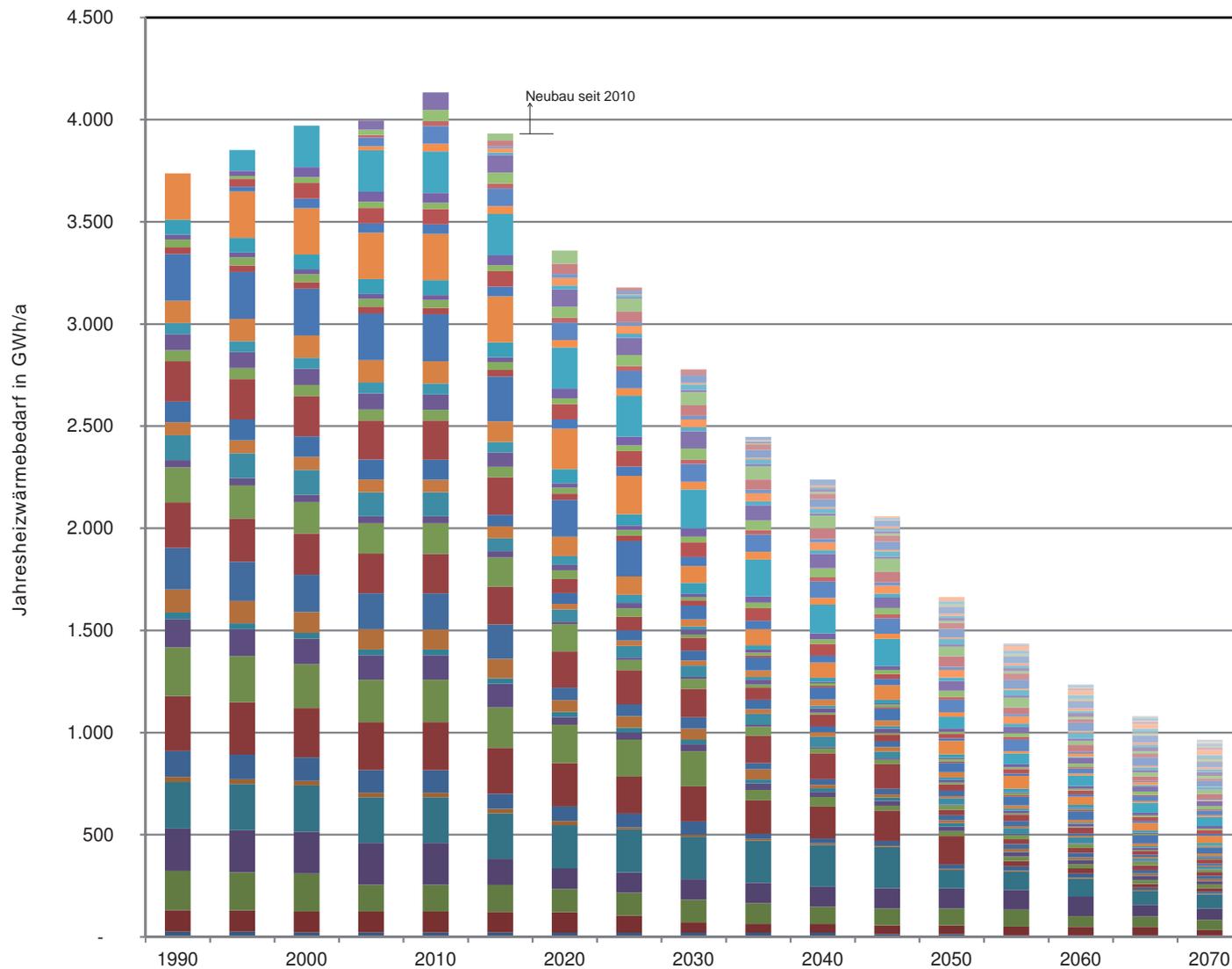


Abbildung 5.9  
Darstellung der Ergebnisse zum jährlichen Heizwärmebedarf des Kohortenmodells des Wohngebäudepark Luxemburgs im Effizienz-Plus Szenario. Die Werte der insgesamt 70 Gebäudetypen sind aufeinander gestapelt und bilden damit in differenzierter Form die Gesamtentwicklung in 5-Jahres-Schritten im Zeitraum 1990 - 2070 ab.

Oben sind in abgeschwächten Farbtönen die Neubauten seit 2010 aufgetragen.

Angabe der Werte in GWh/a.

## 6 Entwicklung Endenergiebedarf 2010 - 2070

An der Entwicklung des Endenergiebedarfs wird deutlich, welche Effizienzfortschritte beim Energieeinsatz insgesamt und in den verschiedenen Handlungsfeldern innerhalb des Betrachtungszeitraums bis 2050 bzw. 2070 erreicht werden können. Erkennbar ist zunächst, dass eine schnelle Verringerung des Endenergieeinsatzes bis 2020 nicht erwartet werden kann. Grund ist die große Trägheit des Gebäudeparks als Energiesystem. Somit kommt es darauf an, die sich bietenden Gelegenheiten konsequent für den Einsatz hoher Qualitäten zu nutzen, wie dies in den Effizienzscenarien der Fall ist. Auf längere Sicht ist dann sehr wohl eine durchgreifende Effizienzsteigerung im Wohngebäudepark erreichbar. Dies stellt im Übrigen auch die Voraussetzung für eine künftige Versorgung Luxemburgs mit erneuerbaren Energien dar. Der eher langsame Pro-

zess hilft, die dafür notwendige Umstellung der Energieversorgungssysteme ohne abrupte Systembrüche durchzuführen. Werden hingegen, wie im Business-as-usual-Szenario modelliert, nur mittlere Qualitäten gewählt, bleiben die Bedarfswerte auch längerfristig auf einem hohen Niveau. Sie stellen, weil dies zu spät – d.h., ab etwa 2030 – erkannt wird, dann ein bedeutendes Hemmnis für das Erreichen der energetischen Ziele Luxemburgs dar.

Von 1990 bis 2010 bleibt der gesamte Endenergieverbrauch mit ca. 6100 GWh/a nahezu konstant. Im Status-quo-Szenario steigen anschließend die Werte wegen der starken Zunahme der Wohnflächen kontinuierlich an. Im Business-as-usual-Szenario ergibt sich eine zwar stetige jedoch nur geringe Minderung der Bedarfswerte, die im Jahr 2030 bei 5090 GWh/a und im Jahr 2050 bei 4900 GWh/a zu liegen kommen. Nur in den Effizienzscenarien kann eine deutliche Reduktion der gesamten Endenergie erreicht werden. Die entsprechenden Kennwerte betragen im Effizienz-Szenario 4310 GWh/a (2030) und 3410 GWh/a (2050) sowie im Effizienz-Plus-Szenario 3740 GWh/a (2030) und 2220 GWh/a (2050).

- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

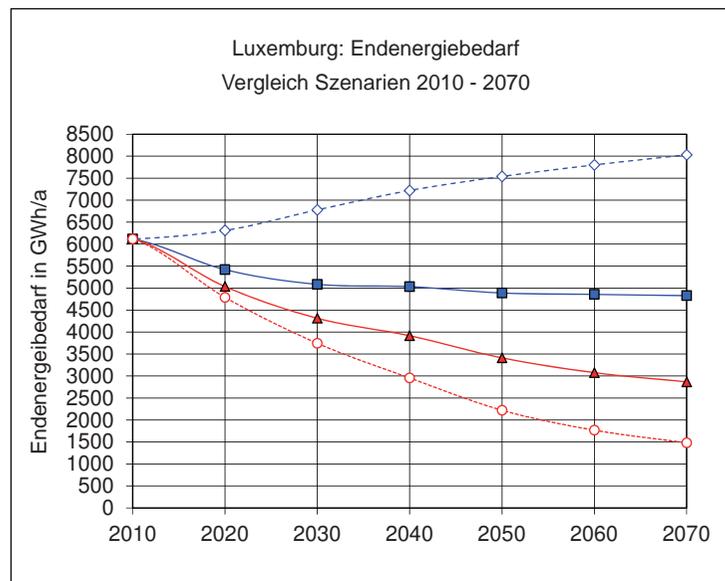


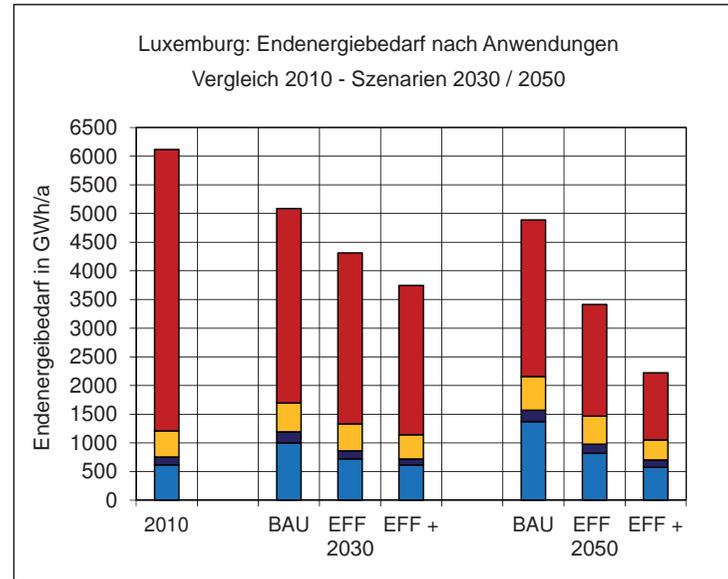
Abbildung 6.1:  
Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs in GWh/a in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

In Abbildung 6.2 ist der Endenergiebedarf nach Anwendungen im Jahr 2010 denjenigen im Jahr 2030 und 2050 gegenübergestellt. Im Ausgangszustand 2010 dominiert eindeutig der Raumwärmebedarf mit 79 % den Endenergiebedarf. Für die Verbesserung der Effizienz kommt es darauf an, sowohl im Bereich der Gebäudehülle und der Lüftungskonzepte als auch bei der Wärmeversorgung (Erzeugung, Speicherung, Verteilung) kombinierte Strategien im Gesamtbestand zu etablieren. Werden hierbei, wie dies im Business-as-usual-Szenario der Fall ist, nur mittlere Qualitäten eingesetzt, gelingt es kaum, eine spürbare Reduzierung des Endenergiebedarfs in diesem zen-

tralen Anwendungsfeld zu erreichen. Ausgehend von ca. 4900 GWh/a liegen die Bedarfswerte hier im Jahr 2030 bei 3390 GWh/a und im Jahr 2050 bei etwa 2730 GWh/a. Durch den Einsatz höherer Qualitäten wie im Effizienz-Szenario modelliert, sinken diese Werte bereits spürbar ab und betragen 2030 etwa 2980 GWh/a und im Jahr 2050 ca. 1950 GWh/a, was ca. 40 % des Wertes von 2010 entspricht. Erst unter den Bedingungen des Effizienz-Plus-Szenarios gelingt ein durchgreifender Minderungserfolg bei der Raumbeheizung des Gesamtbestandes. Die Werte sinken hier im Jahr 2030 auf 2600 GWh/a und im Jahr 2050 sogar auf 1170 GWh/a ab und betragen dann nur noch knapp ein Viertel des Ausgangswertes von 2010.

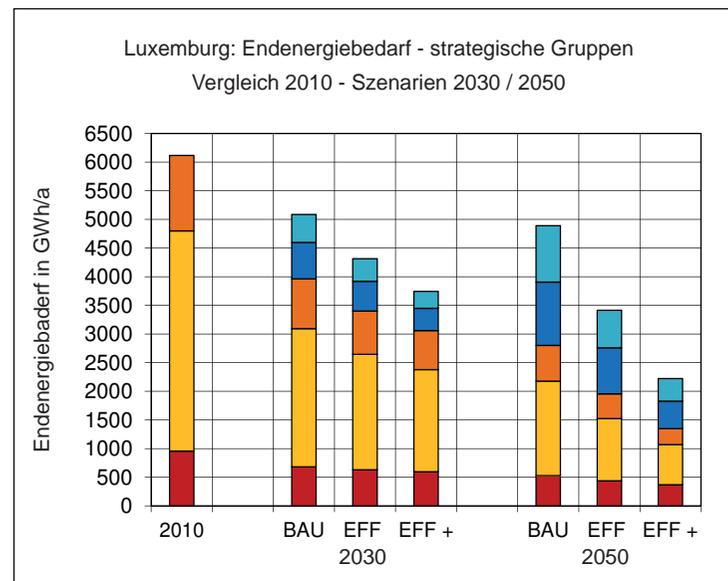
Für die Warmwasseranwendungen sind keine oder nur geringe Effizienzverbesserungen erzielbar. Das liegt einerseits an den Hygienebestimmungen (z.B. Schutz vor Legionellen), die hohe Betriebstemperaturen oder aufwändige Verteilsysteme erfordern und andererseits an den steigenden Komfortansprüchen der Nutzer. Informativ seien auch hier die Werte 2030 und 2050 genannt. Ausgehend vom Ausgangswert von ca. 460 GWh/a im Jahr 2010 steigen sie im Business-as-usual-Szenario auf 500 bzw. 580 GWh/a an; im Effizienz-Szenario liegen die Werte bei 470 und 490 GWh/a und schließlich im Effizienz-Plus-Szenario bei 420 und 350 GWh/a. Gerade im Bereich der Warmwasseranwendungen sind daher neue Effizienzstrategien (z.B. Duschwasser-Wärmerückgewinnung) von hohem Interesse. Diese kommen vor allem im Effizienz-Plus-Szenario zum Einsatz.

Bei den Stromanwendungen sind die Unterschiede zwischen den Szenarien besonders groß. Im Business-as-usual-Szenario steigen die Bedarfswerte von 870 GWh/a im Jahr 2010 auf 1400 GWh/a 2030 bzw. 1900 GWh/a im Jahr 2050 an. Hintergründe sind das Bevölkerungswachstum sowie neue Stromanwendungen in den Haushalten, die durch die zurückhaltenden Effizienzverbesserungen der Geräte und Ausstattungen nicht ausgeglichen werden können. In den Effizienz-Szenarien



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Warmwasser
- Raumwärme

Abbildung 6.2  
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den Hauptanwendungen in den Wohngebäuden. Vergleich der Werte 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).



- Neubau MFH ab 2010
- Neubau EFH ab 2010
- Bestand MFH
- Bestand EFH
- Bedingt sanierbarer Bestand

Abbildung 6.3  
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den strategischen Gruppen. Vergleich der Werte 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF +).

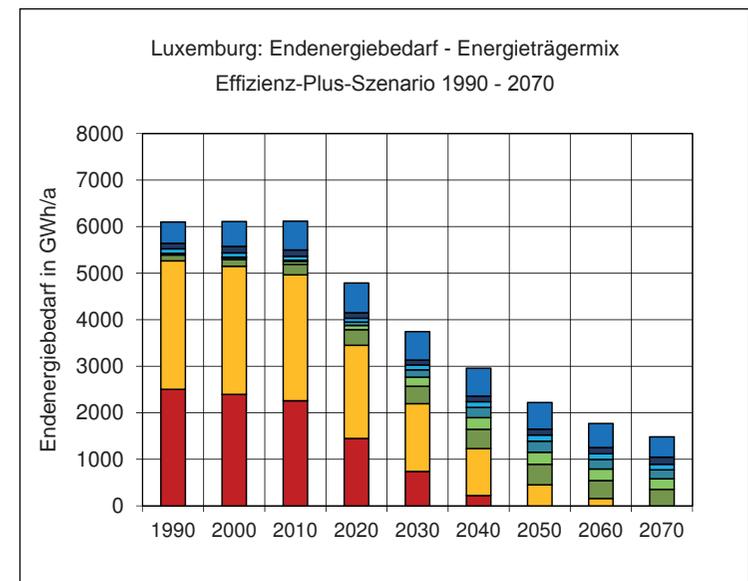
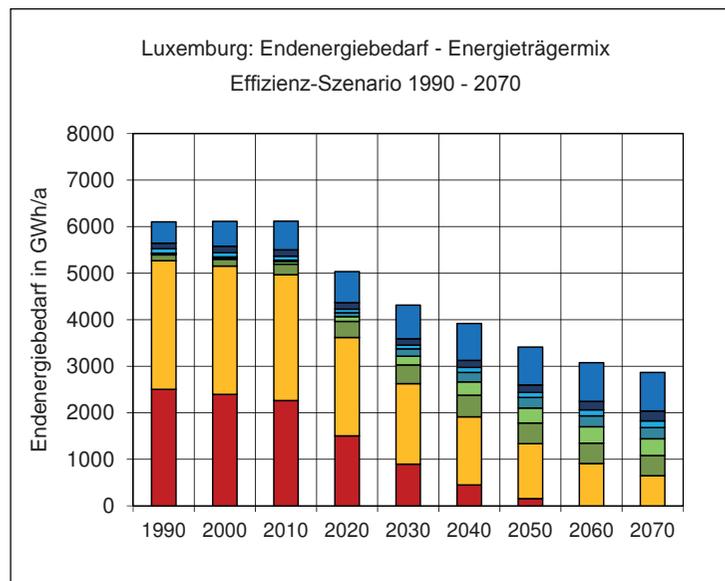
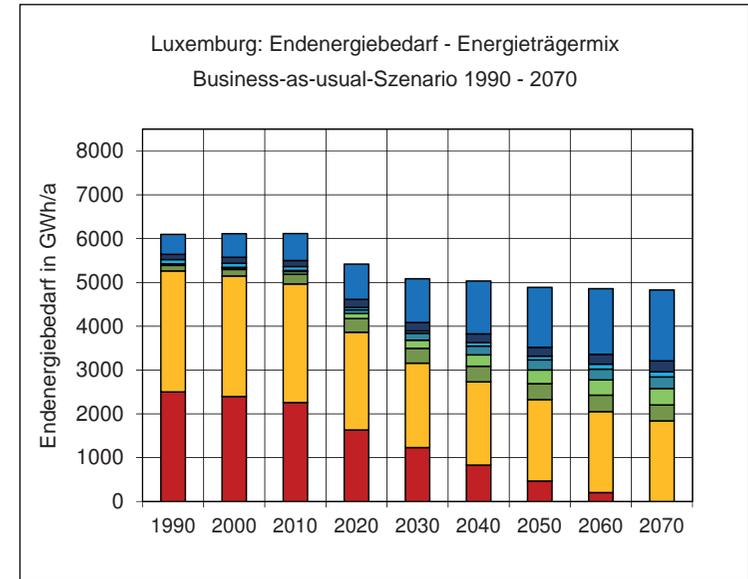
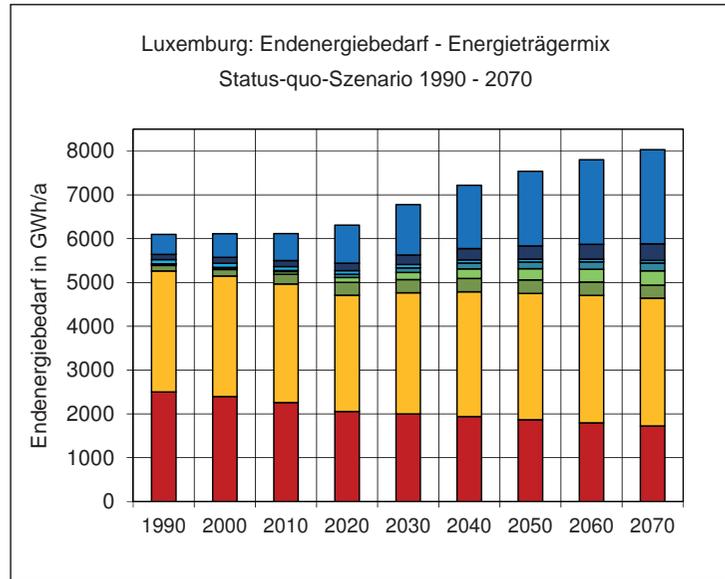
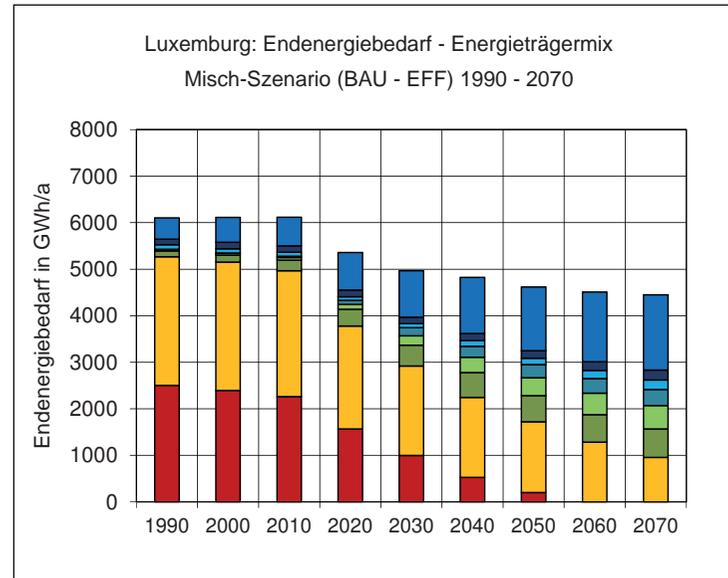


Abbildung 6.4 a - d  
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den Energieträgern der Versorgungssysteme im Zeitraum 1990 - 2070 für alle vier Hauptszenarien:  
a Status-quo-Szenario (links, oben)  
b Business-as-usual-Szenario (rechts, oben)  
c Effizienz-Szenario (links, unten)  
d Effizienz-Plus-Szenario (rechts, unten).  
Die Szenarien unterscheiden sich u.a. im Hinblick auf die Zeitpunkte des Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen, speziell Heizöl.

fällt der Anstieg Endenergiebedarf für Strom geringer aus. Dies gelingt vor allem durch Effizienzsteigerungen bei Haushaltsgeräten, Beleuchtung und Kleinanwendungen (z.B. Stand-by-Funktionen, Kommunikationselektronik) aber auch durch Verbesserung der Nutzungseffizienz (z.B. durch Bewegungsmelder, schaltbare Steckdosen und Zeitschaltuhren). Im Effizienz-Szenario liegen die Strombedarfswerte daher 2030 bei 1100 GWh/a und 2050 bei 1310 GWh/a. Bezieht man zusätzlich technologische Fortschritte mit ein, wie dies im Effizienz-Plus-Szenario der Fall ist, steigen die Strombedarfswerte nochmals weniger an. Sie betragen dann etwa 980 GWh/a im Jahr 2030 und 1070 GWh/a im Jahr 2050.

Hinsichtlich Komfort und Anwendungsumfang unterscheiden sich die Szenarien nicht untereinander, d.h. es wurden bei den Szenarien keine Suffizienzstrategien modelliert, auch wenn diese durchaus wertvolle Beiträge zur Reduzierung des Endenergiebedarfs leisten könnten (siehe hierzu weiterführende Hinweise im nächsten Unterabschnitt). Dies hat v.a. modelltechnische Gründe, um die Vergleichbarkeit der Effizienzstrategien zwischen den Szenarien sicherzustellen. In Abbildung 6.3 ist die Entwicklung des Endenergiebedarfs in Bezug auf die strategischen Typen dargestellt. Hier wird erkennbar, dass durch den Neubau ab 2010 in relevantem Umfang neue Endenergie benötigt wird. Im Status-quo-Szenario steigen daher die Werte trotz des allmählichen Abgangs von schwierig sanierbaren Bestandsgebäuden stetig an. Im Business-as-usual-Szenario, können die Bedarfswerte durch die energetische Sanierung des Bestandes und die allmähliche Umstellung der Heizsysteme von fossilen auf erneuerbare Systeme spürbar sinken. Dies gilt jedoch nicht für die Stromanwendungen. Die Gesamtreduktion fällt zu gering aus, um von einer Effizienzstrategie sprechen zu können. Im Effizienz-Szenario führt der Einsatz von hohen Qualitäten bei den Bau- und Technikkomponenten trotz des deutlichen Zuwachses der Wohnflächen zu einer deutlichen Abminderung der Wärmebedarfswerte. Hierbei spielt auch der Neubau eine entscheidende Rolle. Noch



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse
- Erdgas
- Heizöl

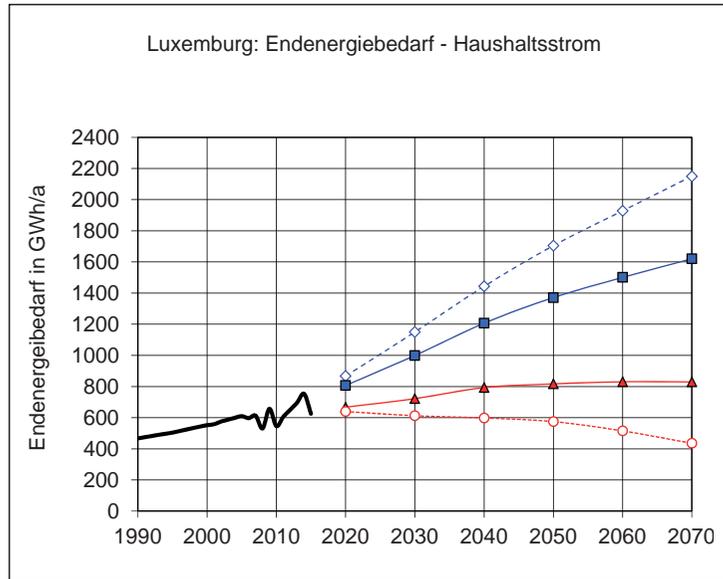
Abbildung 6.5  
Entwicklung des Endenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach den Energieträgern der Versorgungssysteme im Zeitraum 1990 - 2070 für das sog. Mischszenario. In diesem wird nur die Energieversorgung, wie im Effizienz-Szenario modelliert, während alles andere wie im Business-as-usual-Szenario angenommen wird.

deutlichere Effizienzerfolge bei den Wärmeanwendungen stellen sich ein, wenn man den technologischen Fortschritt mit einbezieht, wie dies im Effizienz-Plus-Szenario der Fall ist.

Betrachtet man nun die Aufteilung der Endenergiebeiträge getrennt für die Energieträger (Abb. 6.4 a-d) wird zusätzlich sichtbar, wie wichtig der Wandel der Strom- und Wärmeerzeugungsstruktur für den Erfolg der Effizienzstrategien insgesamt ist. Am besten wird dies am direkten Vergleich der Szenarien mit dem Status-quo-Szenario sichtbar: In diesem sind vor allem die Stromanwendungen für den Anstieg des Endenergiebedarfs verantwortlich. Antrieb ist vor allem das Bevölkerungswachstum. In den Effizienzszenarios gelingt es durch stromsparende Ausstattungen und den verstärkten Ausbau erneuerbarer Systeme, dass der Strombedarf spürbar geringer ansteigt. Nur im Effizienz-Plus-Szenario kann er in etwa konstant gehalten werden. Völlig anders gelagert ist die Situation bei den Wärmeanwendungen. Dort weisen alle brennstoffgestützten Systeme (Heizöl-, Erdgas- und Biomasseheizungen) hohe Umwand-

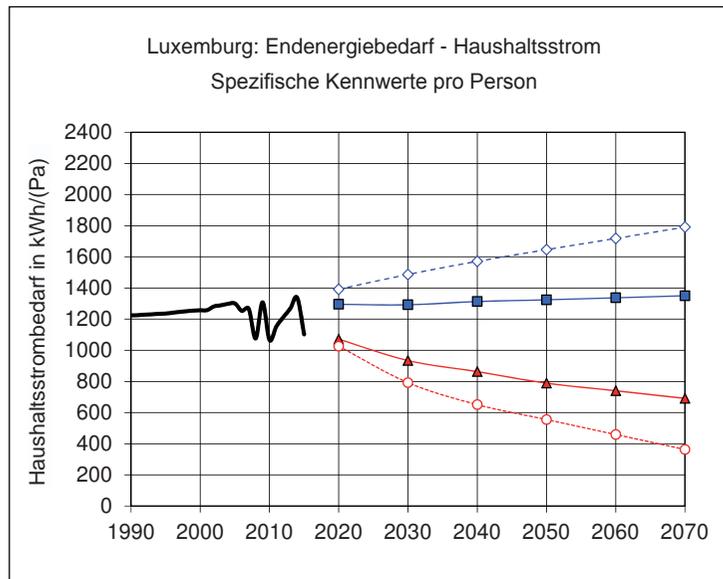
- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus
- IST - Entwicklung

Abbildung 6.6  
Entwicklung des Endenergiebedarfs für Haushaltsstrom in allen Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070) in den vier Hauptszenarien. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind die Verbrauchswerte aus den Jahren 2005 - 2014 aufgetragen. Angabe der Werte in GWh/a.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus
- IST - Entwicklung

Abbildung 6.7  
Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs für Haushaltsstrom pro Person in allen Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070). Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind die Verbrauchswerte aus den Jahren 2005 - 2014 aufgetragen. Angabe der Werte in kWh/(Pa).



lungsverluste auf. Der allmähliche Ausstieg aus den fossil gestützten Systemen führt daher neben dem hier entscheidenden Aspekt der Reduktion der Treibhausgase auch zu einem Absinken des relativen Endenergieeinsatzes je bereitgestellter Wärmeinheit. Die Szenarien unterscheiden sich hier deutlich im Hinblick auf den möglichen Zeitpunkt eines Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen (zunächst Heizöl, später dann auch Erdgas).

### Misch-Szenario

In einem speziellen Misch-Szenario (Abb. 6.5) wurde untersucht, wie sich der Endenergiebedarf entwickeln würden, wenn man die Gebäudequalität (Hülle, Lüftungskonzepte, Warmwasser- und Strom-Nutzenergiebedarf) wie im Business-as-usual-Szenario, die Versorgungsstruktur (Strom- und Wärmeversorgung) jedoch wie im Effizienz-Szenario modellieren würde. Das Ergebnis ist auf den ersten Blick überraschend, weil kaum Unterschiede zum Referenzfall (BAU) existieren (vgl. Abb. 6.4.b). Verantwortlich sind die hohen Nutzenergie-Bedarfswerte im Business-as-usual-Szenario, die durch eine effizientere Versorgungstechnik nicht ausgeglichen werden können.

Ein konsequenter Ausbau erneuerbarer Systeme ist aus technischen und wirtschaftlichen Gründen auf Effizienzsteigerungen der Gebäuden angewiesen. Einerseits ist hierbei die begrenzte Verfügbarkeit bestimmter Energieträger (z.B. Biomasse) zu beachten, andererseits ist ein wirtschaftlicher Betrieb und/oder eine leistbare Energieversorgung stark von den jährlichen Verbrauchswerten und dem zeitlichen Verlauf (Tages-Wochen- und Saisongang) abhängig. Bei Gebäuden mit geringem Heizbedarf ist sowohl die Eigendeckung als auch die jahreszeitliche Gleichmäßigkeit deutlich höher, als bei Gebäuden mittlerer Qualität. Als Ergebnis wird sichtbar, dass eine sinnvolle Effizienzstrategie alle Komponenten des Gesamtsystems umfassen sollte und ein Gegeneinander-Ausspielen von gebäudegebundenen Maßnahmen und den Strategien zur Verbesserung der Versorgungssysteme nicht zum Erfolg führt.

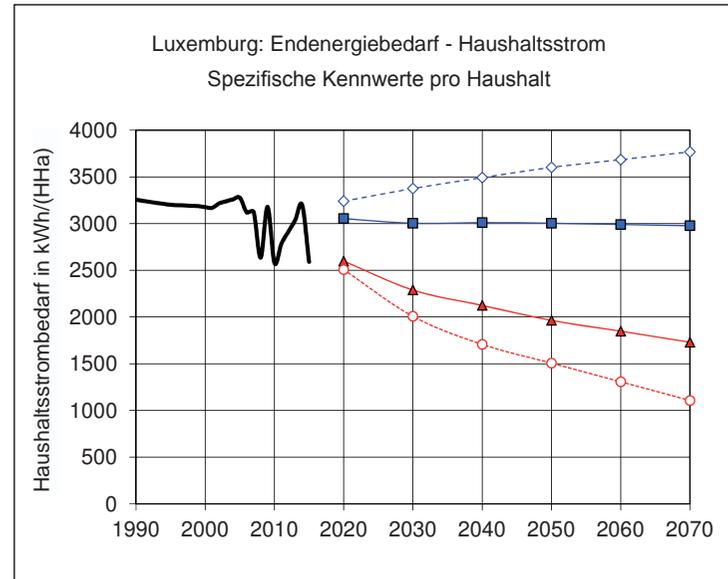
## Haushaltsstrombedarf

Der Haushaltsstrom ist der bedeutendste Teilbereich der Stromanwendungen in den Haushalten. Interessant ist der Vergleich mit der bisherigen Entwicklung, die gerade in den letzten Jahren extreme Schwankungen aufwies (Abb. 6.6). Nur im Effizienz-Plus-Szenario kann eine Reduzierung des Haushaltsstrombedarfs erreicht werden. Dort sinken die Bedarfswerte ausgehend von 615 GWh/a im Jahr 2010 bis 2030 auf etwa 610 GWh/a und bis 2050 auf etwa 575 GWh/a leicht ab. Schon im Effizienz-Szenario liegen diese Werte 2030 mit 720 GWh/a und 2050 mit 820 GWh/a spürbar höher. Im Business-as-usual-Szenario steigt mit ca. 1000 GWh/a im Jahr 2030 und ca. 1370 GWh/a im Jahr 2050 der Strombedarf dann deutlich an. Es handelt sich beim Haushaltsstrom daher um ein strategisch besonders wichtiges Handlungsfeld, das u.U. im Rahmen einer separaten Sonderstudie genauer betrachtet werden sollte.

Die Pro-Kopf-Werte (Abb. 6.7) steigen im Business-as-usual-Szenario aufgrund neuer Anwendungen im Vergleich zum Ausgangswert im Jahr 2010 mit etwa 1230 kWh/(Pa) bis 2030 auf 1290 kWh/(Pa) leicht an, während im Effizienz-Szenario eine Reduzierung auf 930 kWh/(Pa) und im Effizienz-Plus-Szenario sogar auf 790 kWh/(Pa) gelingt. Im Jahr 2050 liegt dieser Wert im Business-as-usual-Szenario nochmals höher bei 1320 kWh/(Pa), während er in den Effizienz-Szenarien mit ca. 790 bzw. 560 kWh/(Pa) deutlich weiter abgesunken ist. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den spezifischen Kennwerten je Haushalt (siehe Abb. 6.8).

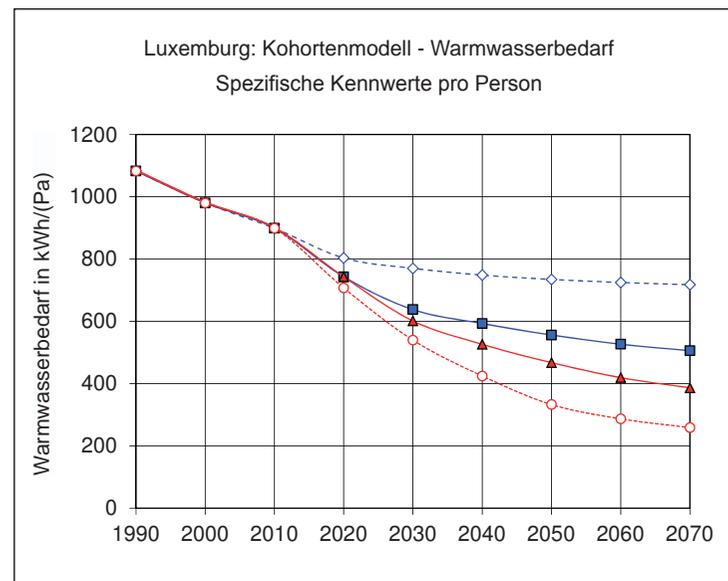
## Warmwasserbedarf

Der spezifische Warmwasserbedarf pro Person ist in Abbildung 6.9 aufgetragen. In diesem Anwendungsfeld sind die Unterschiede zwischen den Szenarien weniger ausgeprägt als im Bereich Raumwärme und Strom. Jedoch tragen auch die hier möglichen Effizienzverbesserungen zu der positiven Gesamtentwicklung in den Effizienzszenarioszenarien bei, die sich ja aus vielen kleinen Einzelbeiträgen zusammensetzt.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus
- IST - Entwicklung

Abbildung 6.8  
Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs für Haushaltsstrom pro Haushalt in allen Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070). Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind die Verbrauchswerte aus den Jahren 2005 - 2014 aufgetragen. Angabe der Werte in kWh/(HHa).



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 6.9  
Entwicklung des spezifischen Endenergiebedarfs für Warmwasser pro Person in den Wohngebäuden Luxemburgs (1990 - 2070). Angabe in kWh/(Pa).

## 7 Entwicklung Primärenergiebedarf 2010 - 2070

Im Primärenergiebedarf werden die gesamten Energieaufwendungen inklusive der vor- und nachgelagerten Energieketten (z.B. Exploration, Förderung, Transporte, Aufbereitung, Herstellung Kraftwerkpark bzw. Heizzentralen und Entsorgung) zusammengeführt. Erst dann ergibt sich ein zuverlässiger Maßstab für den energetischen Aufwand und seine Verbesserungen im Gesamtprozess hinsichtlich der Energieeffizienz sowie der Reduzierung der Umweltbelastungen (die allerdings je Energieträger unterschiedlich zu bewerten sind).

In Abbildung 7.1 ist die gesamte Primärenergie (fossiler, nuklearer und erneuerbarer Anteil) zusammengeführt und für die vier Hauptszenarien im Zeitverlauf dargestellt. Im Status-quo-Szenario findet eine starke Steigerung des Primärenergiebedarfs statt. Die Werte steigen in den Jahren 2010 bis 2050

von 8980 auf 12900 GWh/a um etwa 45 % an. Dass sie nicht noch weiter ansteigen liegt an den indirekten Effizienzverbesserungen durch Abgang und Ersatz durch deutlich effizientere Neubauten; ähnliches findet im Bereich der Warmwasser- und Stromanwendungen statt. Im Business-as-usual-Szenario ist kein durchgreifender Effizienzerfolg erkennbar. Die Werte sinken bis 2050 nur gering auf etwa 6650 GWh/a ab, was einer Reduktion von gerade einmal 25 % entspricht. Das EU Ziel (-27% bis 2030 ausgehend vom Wert 2005, der für die privaten Haushalte Luxemburgs 8980 GWh/a betrug) wird hier mit 7450 GWh/a (-17 %) deutlich verfehlt. Nach 2050 verbleibt darüber hinaus der Primärenergiebedarf auf diesem hohen Niveau. Im Effizienz-Szenario wird bereits eine deutliche Minderung erzielt. Diese liegt 2030 mit 5900 GWh/a (-34 %) ziemlich genau im Rahmen der EU-Beschlüsse. Auch danach sinken die Werte weiter ab. Die Reduktion beträgt 2050 mit etwa 4790 GWh/a dann -47 % und 2070 mit 4090 GWh/a sogar -54 %. Noch deutlicher fällt die Primärenergiereduktion im Effizienz-Plus-Szenario aus. Hier liegen die Werte mit 5500 GWh/a im Jahr 2030 (-39 %) und 4470 GWh/a im Jahr 2050 (-50%) sowie 3580 GWh/a im Jahr 2070 (-60%) nochmals niedriger. Nur in den Effizienzszenarioszenarien findet eine substantielle Verringerung des Primärenergieeinsatzes statt. Dies hat zudem den Vorteil, dass damit die Voraussetzungen für einen hohen Anteil erneuerbarer Energieträger geschaffen werden können.

Betrachtet man in Abbildung 7.2 die Pro-Kopf-Werte für die gesamte Primärenergie, wird hier im Vergleich zur Abbildung 7.1 der Einfluss des Bevölkerungszuwachses deutlich sichtbar. Hier sinken in allen Szenarien die Werte stetig ab, jedoch in stark unterschiedlicher Ausprägung. Interessant ist in diesem Zusammenhang der Bezug zu den Zielen der 2000-Watt-Gesellschaft, einem gut etablierten Effizienzkonzept aus der

- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

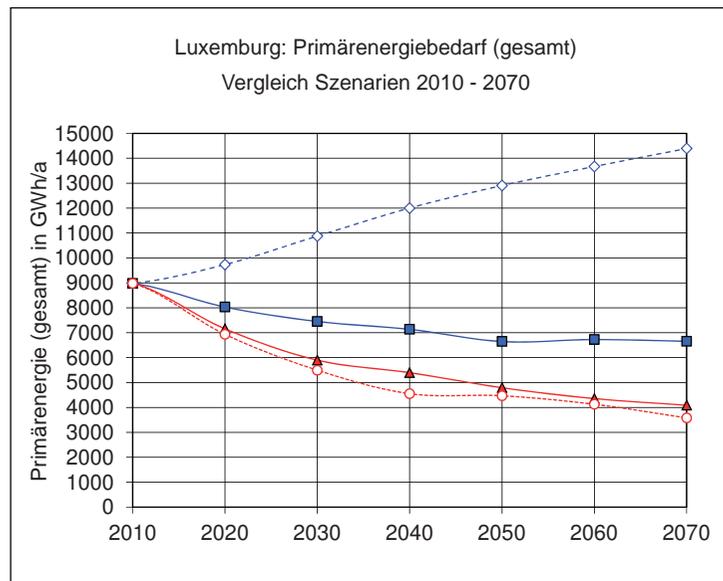


Abbildung 7.1  
Entwicklung des jährlichen Primärenergiebedarfs aller Wohngebäude Luxemburgs 2010 - 2070. Angabe in GWh/a.

Schweiz. Ordnet man aus Gründen der Vereinfachung den privaten Haushalten ein Viertel, d.h. 500 Watt als weltweit verträgliche Dauerleistung pro Person zu, ergibt sich ein Zielwert von 4380 kWh/(Pa). Dieser ist als rote Linie in Abbildung 7.2 eingetragen. Er wird in beiden Effizienzscenarien ziemlich exakt im Jahr 2060 erreicht. Im Business-as-usual-Szenario liegt dieses Ziel, wenn es überhaupt jemals erreicht werden kann, in zeitlich weiter Ferne.

In Abbildung 7.3 ist schließlich der Primärenergiebedarf differenziert nach den einzelnen Energieträgern für das Ausgangsjahr 2010 und als Vergleich zwischen den Szenarien für 2030 sowie 2050 dargestellt. Im Vergleich zur Auswertung der Endenergiebilanz (siehe Abb. 6.4) wird hier der spürbar höhere Primärenergieeinsatz für die Stromerzeugung sichtbar. Indirekt wird daran sichtbar, dass Wärme und Strom unterschiedliche energetische Wertigkeiten aufweisen. Dieser Effekt wird jedoch im Betrachtungszeitraum immer geringer, weil der Anteil der nicht brennstoffgestützten erneuerbaren Energieträger, wie Wasser- und Windkraft oder Photovoltaik immer mehr zunimmt. Weil diese gemäß der 100%-Methode ohne Wirkungsgradverluste gerechnet werden, sinkt entsprechend der Primärenergiebedarf auch wegen dieser definitorischen Festlegung ab.

Gerade in den Effizienzscenarien nähern sich Brennstoff- und Stromeinsatz immer stärker an. Daran wird die grundsätzliche Tendenz sichtbar, dass eine erneuerbare Energieversorgung viel weniger auf Brennstoffe gestützt ist, als die heutige. Das gilt sowohl für die Wärme- als auch die klassischen Stromanwendungen. Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass im Bereich der Mobilität neue Stromanwendungen durch Elektromobilität hinzukommen werden, die in der Summe dazu führen können, dass trotz Effizienzverbesserungen in allen Sektoren, am Ende der gesamte Strombedarf langfristig wieder ansteigt. Dieser Aspekt wird in Kapitel 10 nochmals aufgegriffen und weiter vertieft, während er in der Primärenergiebilanz des Kohortenmodells zunächst nicht berücksichtigt wurde.

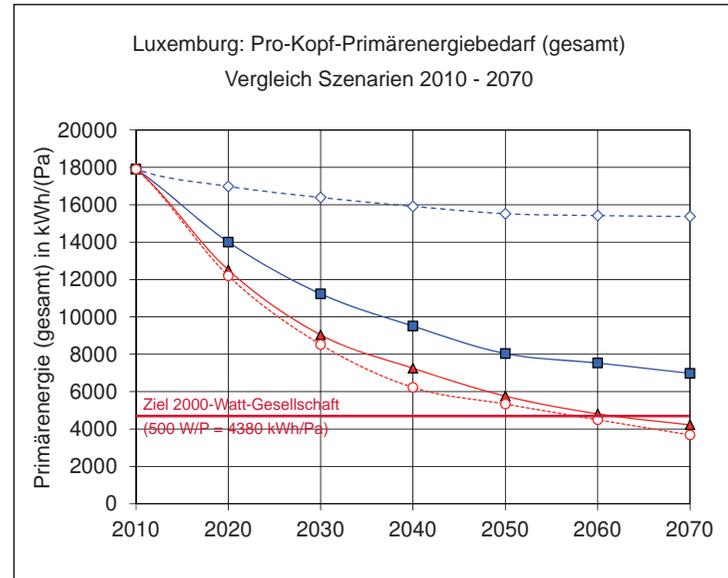


Abbildung 7.2 Entwicklung des Pro-Kopf-Primärenergiebedarfs in kWh/(Pa) in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070. Zum besseren Vergleich ist das Ziel der 2000-Watt-Gesellschaft für die privaten Haushalte (500 W/(Pa) bzw. 4380 kWh/(Pa) als rote Linie eingetragen. Dieses Ziel wird in den Effizienzscenarien etwa 2060 erreicht.

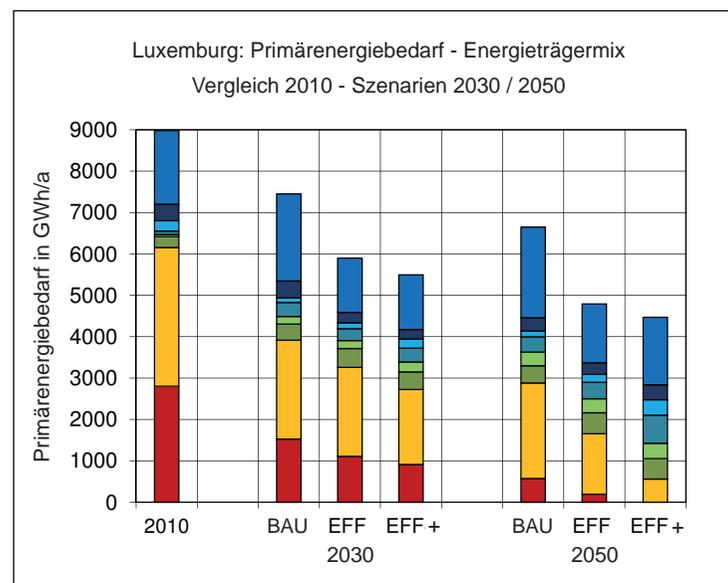


Abbildung 7.3 Entwicklung des Primärenergiebedarfs in GWh/a, differenziert nach Energieträgern in den Wohngebäuden. Vergleich der Werte 2010 mit denen der Jahre 2030 und 2050 im Business-as-usual- (BAU), im Effizienz- (EFF) und im Effizienz-Plus-Szenario (EFF+).

## 8 Entwicklung Treibhausgasemissionen 2010 - 2070

Der Klimaschutz stellt im Hinblick auf die Energiesysteme derzeit das gravierendste und drängendste Nachhaltigkeitsproblem dar und nicht die Ressourcenfrage. Von daher stellt die Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine Schlüsselfrage der Energiepolitik Luxemburgs dar. Für die Auswertung sind zusätzlich die Zielsetzungen der EU (Reduktion der nicht unter den Emissionshandel fallenden Verbraucher im Jahr 2030) und der Pariser Klimakonferenz (Einhaltung des 2-Grad Ziels, besser des 1,5-Grad Ziels) zu beachten. Leider ist die Zuordnung dieser Ziele zu bestimmten Sektoren oder Energiedienstleistungen nicht immer einfach. In dieser Untersuchung wird daher Bezug genommen zu einer Studie, die anhand eines Vergleichs verschiedener Gerechtigkeitsgrundsätze zulässige Pro-Kopf-Emissionen für das Jahr 2050 in Form von sog. „Zielfeldern“ bestimmt hat (Kern 2016).

Grundlage bildet das gerade noch zulässige Globalbudget von Treibhausgasemissionen im Zeitraum bis 2050, die mit dem 2-Grad-Ziel vereinbar sind. Das Zielfeld für die privaten Haushalte beträgt in allen mitteleuropäischen Staaten 100 – 500 kg/ (Pa) CO<sub>2</sub>-Äquivalente, und muss im Zeitraum 2045 – 2055 erreicht werden. Die Güte eines Klimaschutzkonzeptes bestimmt sich darüber, ob bzw. in welchem Bereich die Entwicklung der Pro-Kopf-Emissionen eines Minderungspfades in das Zielfeld „eintaucht“. Damit können unterschiedliche Konzepte und Maßnahmenbündel auf einfache und zugleich nachvollziehbare Art im Hinblick auf den Klimaschutz beurteilt werden.

In Abbildung 8.1 sind zunächst die gesamten CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der privaten Haushalte über den Zeitraum 1990-2070 aufgetragen. Die Verläufe ähneln sehr denen für die gesamte Primärenergie. Im Status-quo-Szenario steigen die Treibhausgasemissionen stetig an und sind im Jahr 2050 mit ca. 2630 kt/a um ca. 35% höher als 1990. Im Business-as-usual-Szenario sinken die Emissionen bis 2030 auf 1570 kt/a ab, was einer Reduktion um ca. 19% gegenüber dem Stand von 1990 bzw. um 15% gegenüber dem Stand von 2010 entspricht. Im Jahr 2050 liegt dieser Wert bei 1080 Kt/a und weist damit eine Reduktion um 45% bzw. 41% auf.

Im Effizienz-Szenario sinken die Treibhausgasemissionen viel deutlicher ab. Im Jahr 2030 betragen sie 1010 kt/a (Reduktion um 48% bzw. 45%) und im Jahr 2050 nur noch ca. 510 kt/a (Reduktion um 74% bzw. 72%). Im Effizienz-Plus-Szenario wird schließlich ein durchgreifendes Klimaschutzkonzept verwirklicht. Bereits im Jahr 2030 betragen die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen nur noch ca. 960 kt/a (Reduktion um 51% bzw. 48%) und sinken danach bis 2050 weiter auf etwa 290 kt/a (Reduktion um 85% bzw. 84%). Mit Ausnahme im Status-quo-Szenario sinken die Treibhausgasemissionen in allen Szenarien auch nach 2050 weiter ab.

- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

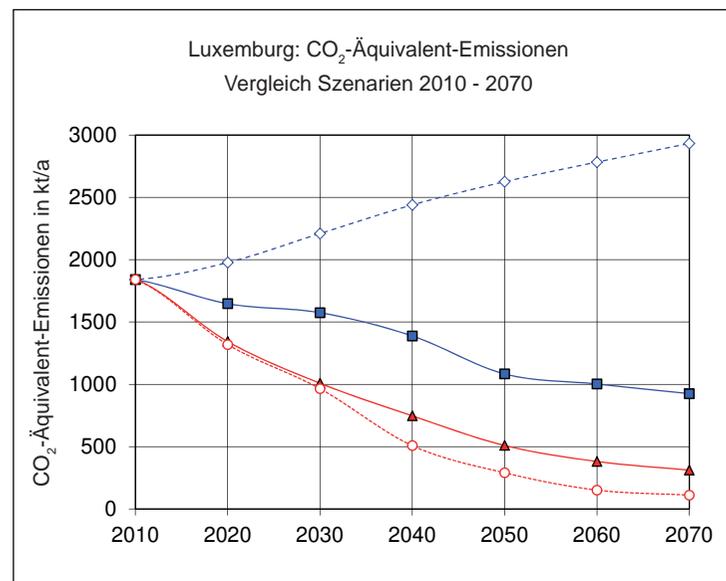
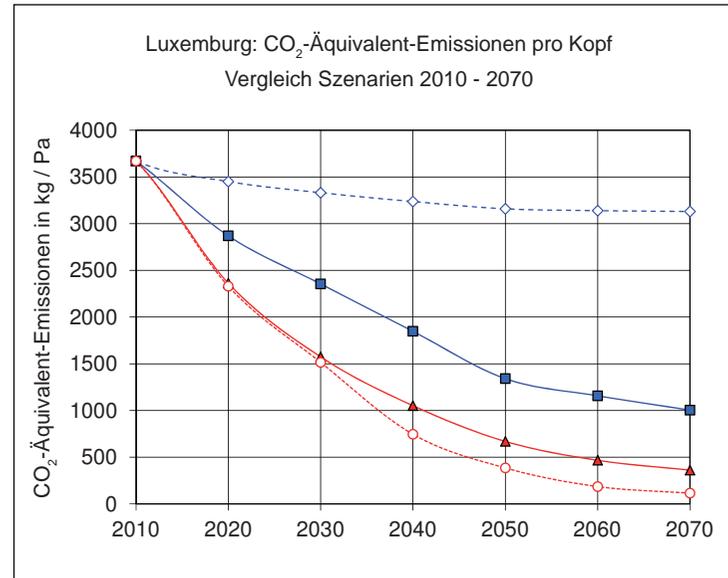


Abbildung 8.1  
Entwicklung der Treibhausgasemissionen in kt/a CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.

Im Hinblick auf die Pro-Kopf-Treibhausgas-Emissionen zeigt sich zwar in allen Szenarien eine Minderung (Abb. 8.2), im Status-quo-Szenario fällt diese jedoch nur sehr gering aus und bleibt auch im Business-as-usual-Szenario weit vom genannten Klimaschutzziel entfernt. Nur im Effizienz-Plus-Szenario wird 2050 mit 390 kg/(Pa) ein Wert erreicht, der mit dem 2-Grad-Ziel kompatibel ist. Im Effizienz-Szenario wird mit 670 kg/(Pa) der Zielwert von 500 kg/(Pa), der nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft in guter Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel steht, bereits um etwa 35 % überschritten.

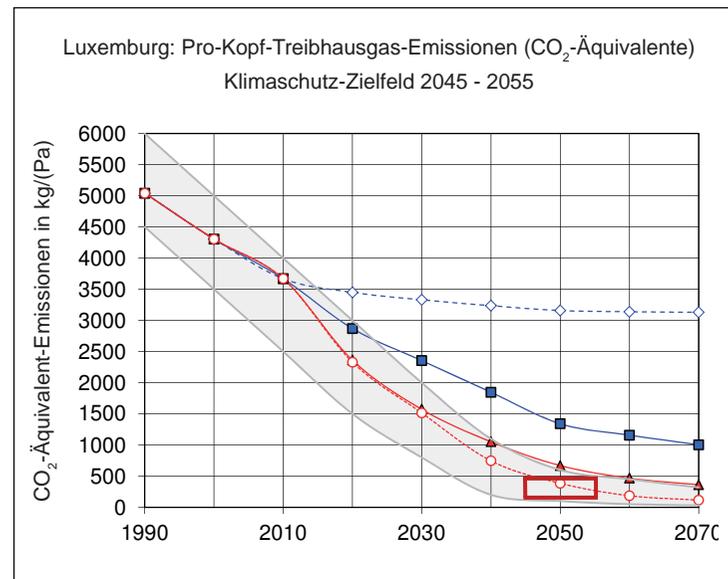
Die hier vorgenommene Beurteilung wird dann besser nachvollziehbar, wenn man die kombinierte Darstellungsform eines Klimaschutzkorridors mit Zielfeld (Kern 2016) wählt, wie dies in Abbildung 8.3 der Fall ist. Als Bezugsjahr ist das Jahr 1990, in dem die Rio-Konferenz stattgefunden hat, gewählt, weil sich die globalen und nationalen Klimaschutzpfade bzw. Minderungsziele in der Regel darauf beziehen. Nun ist klar zu erkennen, dass das Status-quo-Szenario bereits 2030 und das Business-as-usual-Szenario etwa 2040 aus dem grau markierten Klimaschutzkorridor austreten. Nur die beiden Effizienz-szenarien bleiben im Korridor und können daher auch als Klimaschutzszenarien bezeichnet werden. Während das Effizienz-Szenario jedoch nur knapp in das Zielfeld eintaucht (und damit gerade noch mit dem 2-Grad-Ziel in Übereinstimmung gebracht werden kann), kommt das Effizienz-Plus-Szenario im unteren Bereich des Zielfeldes zu liegen. Es kann von daher als vollwertiges Klimaschutzszenario eingestuft werden.

In Abbildung 8.4.a-d werden für alle vier Szenarien die Treibhausgasemissionen getrennt für die Energieträger ausgewiesen. Es ist besonders aufschlussreich zu sehen, wie sich hier, vor allem unter den gewählten Randbedingungen in den beiden Effizienz-szenarien, die Effizienzstrategie und der daran gekoppelten Ausbau der erneuerbaren Energiesysteme gegenseitig stützen und erst in Kombination zu einer deutlichen Reduktion der energiebedingten Klimagasemissionen führen.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 8.2  
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg/(Pa) CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus
- Klimaschutz-Korridor
- Klimaschutz-Zielfeld

Abbildung 8.3  
Entwicklung der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen in kg/(Pa) CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070 und deren Bezug zum sog. Klimaschutz-Zielfeld 2045 - 2055, wie in (Kern 2016) entwickelt. Nur die Effizienz-szenarien stehen in Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Ziel der Pariser Klimakonferenz.

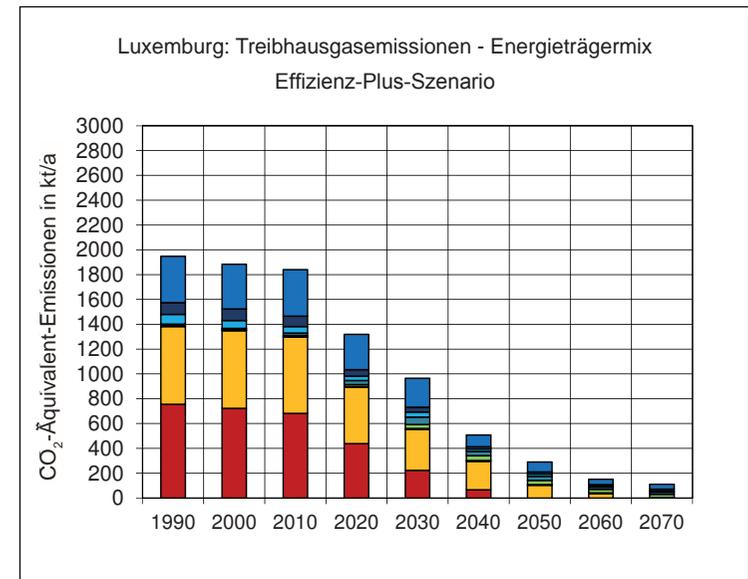
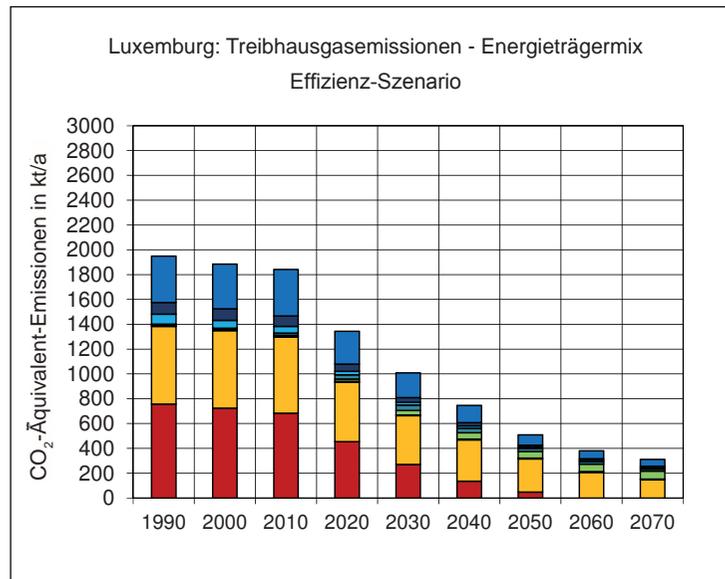
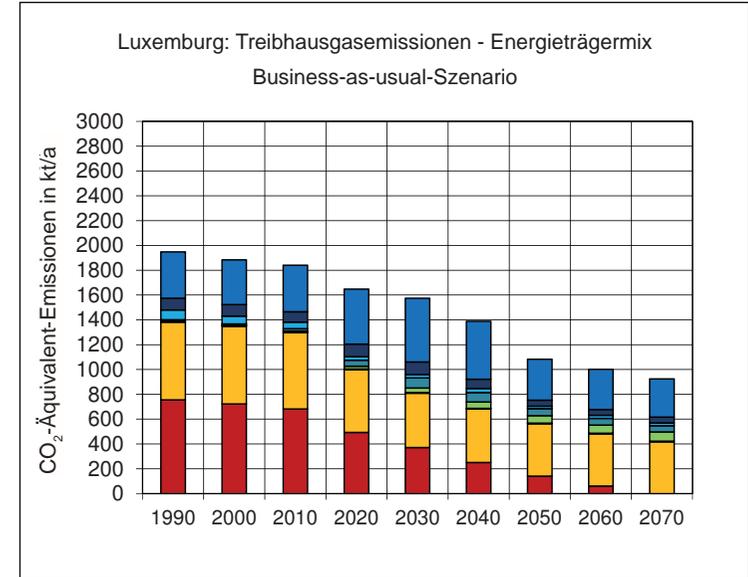
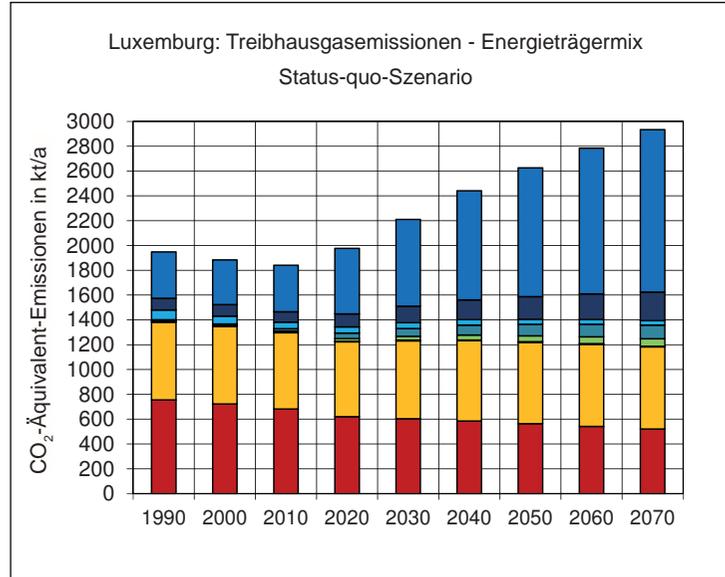


Abbildung 8.4 a - d  
Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen) in kt/a differenziert nach den Energieträgern der Versorgungssysteme im Zeitraum 1990 - 2070 für alle vier Hauptszenarien:  
a Status-quo-Szenario (links, oben)  
b Business-as-usual-Szenario (rechts, oben)  
c Effizienz-Szenario (links, unten)  
d Effizienz-Plus-Szenario (rechts, unten).  
Die Szenarien unterscheiden sich u.a. im Hinblick auf die Zeitpunkte des Ausstiegs aus den fossilen Heizsystemen, speziell Heizöl.

Im Effizienz-Plus-Szenario können bis 2070 die Treibhausgasemissionen bis auf einen nahezu vernachlässigbaren Restbetrag fast gänzlich zurückgefahren werden. Hier spielt dann auch das Thema der Stromeffizienz und die weitgehend erneuerbare Stromerzeugung eine große Rolle.

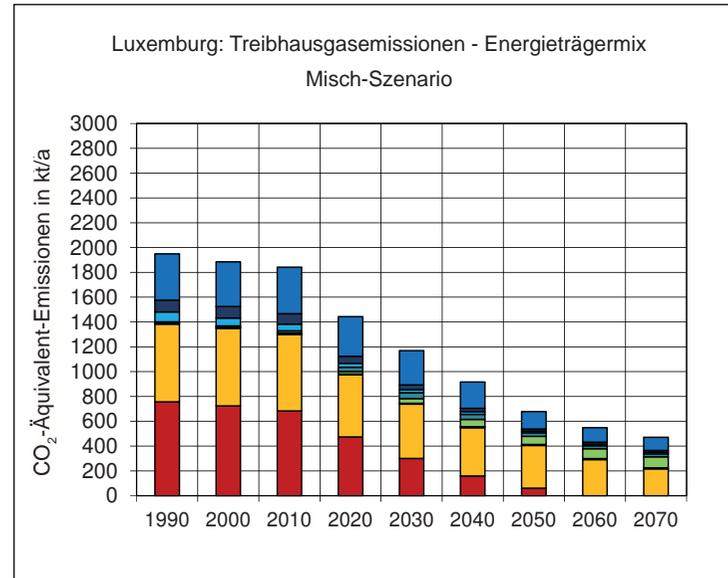
Im Gegenzug wird deutlich, dass die fehlenden Effizienzerfolge im Business-as-usual-Szenario dazu führen, dass insbesondere Erdgas als fossiler Energieträger zur Wärmeversorgung im System verbleibt. Zugleich führt die fehlende Stromeffizienz in den Haushalten und die auch nach 2030 noch immer vorhandene fossile Stromerzeugung dazu, dass mittel- und langfristig ein substantielles Absinken der Treibhausgasemissionen verhindert wird.

Für die Klimaschutzstrategie ist von daher der Ausstieg aus der fossilen Strom- und Wärmeerzeugung in Kombination mit den Effizienzsteigerungen der Gebäude und ihrer Stromanwendungen der Schlüssel zum Erfolg.

### Misch-Szenario

Im Hinblick auf Klimaschutzstrategien ist häufig eine Haltung verbreitet, die die wirksamen Maßnahmen nicht als UND- sondern als ODER-Verkäufungen interpretiert. Gemäß dieser Vorstellung kann ein wirksamer Klimaschutz sich entweder auf die gebäudebezogenen oder auf die versorgungsseitigen Maßnahmen stützen. Dies kann entweder generell oder von Fall zu Fall gelten. Oftmals wird auch versucht, bestimmte Einzelmaßnahmen, z.B. einen fehlenden Wärmeschutz an Gebäudefassaden durch den Einsatz der Kraft-Wärmekopplung oder den Einsatz erneuerbarer Energien auszugleichen.

In einem speziellen Misch-Szenario wurde daher zusätzlich untersucht, wie sich der Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen entwickeln würden, wenn man die Gebäudequalität (Hülle, Lüftungskonzepte, Warmwasser- und Strom-Nutzenergiebedarf) wie im Business-as-usual-Szenario, die Ver-



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse
- Erdgas
- Heizöl

Abbildung 8.5 Entwicklung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen) in kt/a, differenziert nach Energieträgern in den Wohngebäuden für das sog. Misch-Szenario. In diesem werden die Gebäude mit deren energetischen Eigenschaften wie im Business-as-usual-Szenario, die Versorgungssysteme jedoch wie im Effizienz-Szenario modelliert.

sorgungsstruktur (Strom- und Wärmeversorgung) jedoch wie im Effizienz-Szenario modellieren würde (Abb. 8.5).

Die resultierenden Treibhausgasemissionen im Misch-Szenario liegen mit ca. 1170 Kt/a im Jahr 2030 und 680 Kt/a im Jahr 2050 ungefähr in der Mitte zwischen den Werten im Business-as-usual-Szenario (Abb. 8.4.b) und denen im Effizienz-Szenario (vgl. Abb. 8.4.c). Als personenbezogener Kennwert im Jahr 2050 ergeben sich ca. 890 kg/(Pa), womit das Zielfeld deutlich verfehlt wird. Die Erklärung hierfür liegt vor allem in den hohen Nutzenergie-Bedarfswerten im Business-as-usual-Szenario, die durch eine effizientere bzw. stärker auf erneuerbare Energieträger gestützte Versorgungstechnik nicht ausgeglichen werden können.

Als Fazit aus der Analyse der Ergebnisse des Misch-Szenarios lässt sich formulieren: Es kommt somit darauf an, die wirksamen Klimaschutzstrategien nicht gegeneinander auszuspielen, sondern sie sinnvoll miteinander zu kombinieren.

## 9 Strategische Fragen und Analysen

Zum Schluss sollen die Ergebnisse aus einer übergeordneten Sicht bewertet werden.

### Überbrückung der Winterlücke

Sofern die langfristigen Ziele der EU und Luxemburgs verwirklicht werden, wird das künftige Energiesystem Luxemburgs eine gänzlich andere Struktur aufweisen als heute. Eine erneuerbare Stromversorgung wird in Nord- und Mitteleuropa im Sommer tendenziell Überschüsse produzieren, während im Winter eine Energielücke existiert, die mit speicherbaren erneuerbaren Energieträgern geschlossen werden muss (Abb. 9.1). Um die sog. Winterlücke möglichst klein zu halten, ist es notwendig, dass die Gebäude speziell im Kernwinter wenig Energie benötigen. Das ist nur mit einer konsequenten Effizienz-

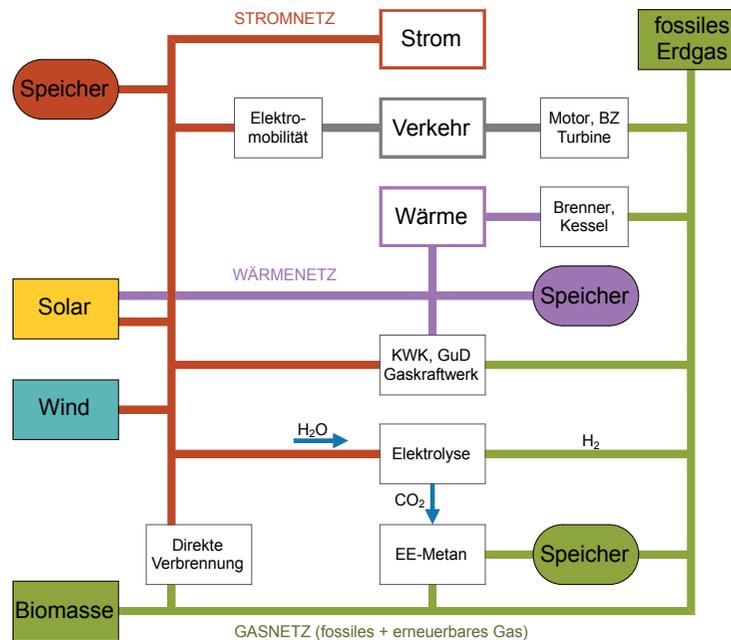
enzstrategie möglich, die alle Strom- und Wärmeanwendungen umfasst. Wenn noch zusätzliche Stromverbraucher hinzukommen (z.B. Elektromobilität) wird die Frage der Stabilität der Stromversorgung noch anspruchsvoller. Von daher stellt sich die Frage, wie die erneuerbare Energieversorgung und -erzeugung künftig stärker sektorenübergreifend organisiert werden kann und welche Rolle hier Speicher auf verschiedenen Zeitebenen (Kurzzeit, Langzeit) spielen werden. Die Energiesysteme in den Wohngebäuden können dazu einen gewissen, jedoch nicht den entscheidenden Beitrag leisten (siehe Untersuchung im folgenden Abschnitt 10).

### Effizienzfaktoren

Der Erfolg der Effizienzstrategien in den Wohngebäuden lassen sich übersichtlich über sog. Effizienzfaktoren abbilden. Dabei wird das Status-quo-Szenario als Bezugsgröße mit einem durchgängig vorgegebenen Faktor 1,0 gewählt. Es beruht auf der fiktiven Annahme, dass die Qualität der energetisch relevanten Bau- und Technikkomponenten nach 2010 konstant gehalten wird. Man kann sich das so vorstellen, dass bei Instandsetzungs- und Erneuerungsarbeiten das jeweils vorhandene System zwar ausgewechselt wird, jedoch in seinen energetischen Eigenschaften unverändert bleibt. Im Vergleich zu diesem Szenario können nun die Effizienzfortschritte in den anderen Szenarien sehr einfach ermittelt werden. Für diesen Vergleich wurde die gesamte Primärenergie gewählt, weil sie als Indikator für den Einsatz energetischer Ressourcen steht.

In Abbildung 9.2 wird erkennbar, dass im Business-as-usual-Szenario die Effizienzverbesserungen nur mäßig ausfallen. Im Jahr 2050 lässt sich unter seinen Randbedingungen gerade einmal ein Faktor von 1,9 realisieren. Im Effizienz-Szenario liegt der Effizienzfaktor im Jahr 2050 bereits bei 2,7 und im Ef-

Abbildung 9.1  
Schemadarstellung zur „Power to Gas“-Strategie. Abgeändert nach (Sterner et al. 2011) S. 19.



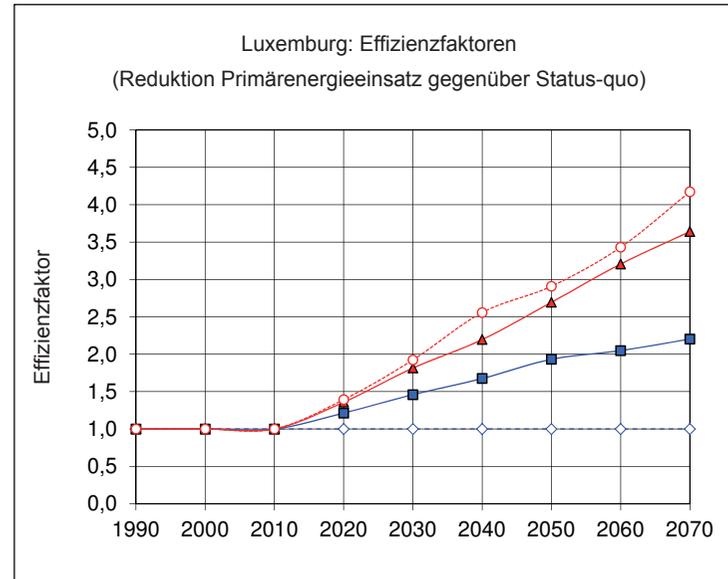
Effizienz-Plus-Szenario sogar bei 2,9 und steigt dort bis 2070 auf 4,2 an. Hier wird deutlich, dass eine längerfristige Effizienzstrategie auf jeden Fall die künftigen wirtschaftlich interessanten Technologieverbesserungen miteinbeziehen sollte. Von daher wird hier vorgeschlagen, spätestens im Jahr 2030 die Zielvorgaben des Effizienz-Plus-Szenarios umzusetzen.

### Dekarbonisierungsfaktoren

Noch deutlicher fallen die Unterschiede aus, wenn man die Minderungserfolge bei den Treibhausgasemissionen betrachtet. Diese lassen sich, bei einer analogen Systematik, wie bei den Effizienzfaktoren, als sog. Dekarbonisierungsfaktoren darstellen. Dieser Faktor gibt an, in welchem Ausmaß die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen in den Szenarien im Vergleich zu einer Status-quo-Entwicklung abgesenkt werden konnten.

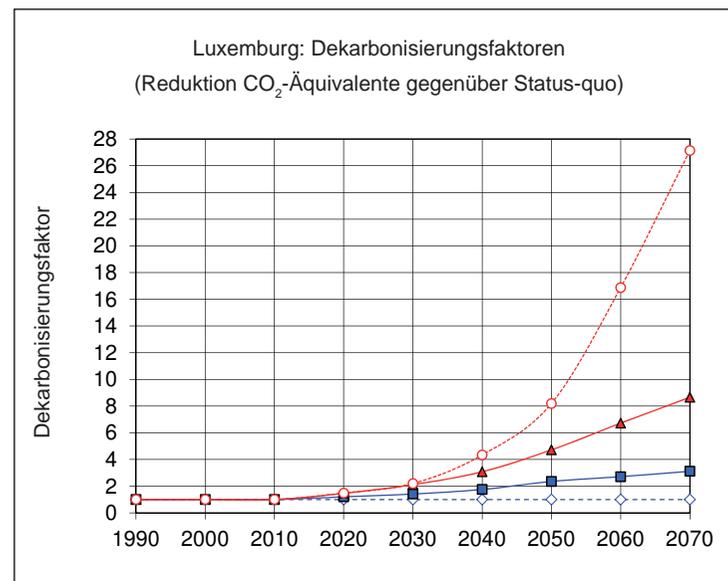
Im Business-as-usual-Szenario können bis ins Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen nur um einen Faktor von 2,4 reduziert werden. Damit kann hier nicht von einem Klimaschutzpfad gesprochen werden. Im Effizienz-Szenario wird 2050 ein Dekarbonisierungsfaktor von 4,7 und 2070 von 8,7 erreicht. Das Effizienz-Plus-Szenario steht für eine Entwicklung, in dem die Treibhausgasemissionen bis 2050 um einen Faktor 8,2 und bis 2070 um einen Faktor 27 reduziert werden können. Damit hat man das Nullemissionsziel fast erreicht. Die verbleibenden minimalen CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen sind dann vernachlässigbar gering.

Hier wird nochmals deutlich, dass das Effizienz-Szenario Übergangsweise bis etwa 2030 verfolgt werden kann, es jedoch danach geboten erscheint, die nochmals verbesserten energetischen Qualitäten, wie sie im Effizienz-Plus-Szenario beschrieben sind, als neuen Standard festzulegen. Dann tritt, das zeigen die Dekarbonisierungsfaktoren auf, ein selbstverstärkender Effekt ein, der durch den somit möglichen Ausstieg aus den fossilen Energiesystemen, den Weg hin zu einer Energieversorgung ohne Klimagasemissionen eröffnet.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 9.2 Darstellung der primärenergetischen Effizienzverbesserungen in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 2010 - 2070 in Form von sog. Effizienzfaktoren.



- ◇- Status quo
- Business-as-usual
- ▲- Effizienz
- Effizienz-Plus

Abbildung 9.3 Reduzierungserfolge bei den Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) in den vier Hauptszenarien im Zeitraum 1990 - 2070. Darstellung in Form der sog. Dekarbonisierungsfaktoren.

## 10 Ausbau Photovoltaikerzeugung und Elektromobilität

Im Hauptteil dieser Studie wird analysiert, wie sich die Energiebedarfe und die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des Wohngebäudeparks für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom in den vier Hauptszenarien bis 2070 entwickeln werden. Die Stromerzeugung durch gebäudeintegrierte PV-Anlagen wird dabei nicht gesondert betrachtet, da vereinfachend davon ausgegangen wird, dass die gesamte PV-Stromerzeugung auch künftig in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird und so den Luxemburger Strommix um erneuerbare Anteile ergänzt. Gebäudeintegrierte PV-Anlagen werden bei dieser Art der Bilanzierung nicht als Teil der Gebäudeenergiebilanz bewertet, sondern als dezentraler Teil des luxemburgischen Kraftwerk-parks. Der Ausbau von PV-Anlagen spiegelt sich bei dieser Betrachtung nur in Form verbesserter Primärenergiefaktoren bzw. CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen des Strommixes, nicht jedoch in der Bewertung der Einzelgebäude wider.

Für die Zukunft ist absehbar, dass sich diese Art der Betrachtung zunehmend verändern wird. In einem zunehmenden Anteil der Gebäude mit PV-Anlage werden deren Erträge zumindest teilweise im Gebäude selbst genutzt. Treiber dieser Entwicklung sind tarifliche Aspekte, sinkende Preise für Batteriespeicher, der Wunsch nach größtmöglicher Autonomie in Sachen Energie und – bislang erst in wenigen Fällen – der Wunsch nach Nutzung der Erträge der gebäudeintegrierten PV zum Laden des eigenen Elektroautos.

Um dieser Entwicklung Rechnung zu tragen wird im folgenden Kapitel die Bilanzgrenze in zweierlei Hinsicht ausgeweitet: Bedarfsseitig wird zusätzlich zu den o.g. Anwendungsarten der Strombedarf von Elektroautos mit bilanziert, die in oder an Wohngebäuden beladen werden. Erzeugungsseitig wird zusätzlich die Stromerzeugung gebäudeintegrierter PV-Anlagen

berücksichtigt, die Gesamt-Erzeugung der PV-Systeme wird in einen eigengenutzten Anteil (für Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom sowie für E-Mobilität) und einen ins Netz eingespeisten Anteil differenziert.

Bei der Abschätzung der zusätzlich berücksichtigten Bilanzanteile wird wie folgt vorgegangen:

- **Schritt 1:** Abschätzung des zusätzlichen Strombedarfs des Wohngebäudeparks durch das Beladen von Elektroautos (Abschnitt 10.1)
- **Schritt 2:** Potenzialabschätzung und Ausbauszenarien für wohngebäudeintegrierte PV (Abschnitt 10.2)
- **Schritt 3:** Abschätzung des Anteils des im Gebäude selbst genutzten PV-Strom und des Anteils, der ins Netz eingespeist wird – unter Berücksichtigung des Bedarfs durch Elektromobilität (Abschnitt 10.3)

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieser Teil der Studie mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet ist, als der Hauptteil, in dem nach der bislang üblichen Bilanzierungsgrenze vorgegangen wurde. Die Ergebnisse sind daher nur als grobe Abschätzungen zu verstehen.

### 10.1 Abschätzung des zusätzlichen Strombedarfs des Wohngebäudeparks durch das Beladen von Elektroautos

Zur Quantifizierung des Einflusses der Beladung von Elektroautos auf den Strombedarf des Wohngebäudeparks müssen Annahmen für die folgenden Haupteinflussgrößen getroffen werden:

## Bevölkerungsentwicklung

Wie in der gesamten Studie wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber und Statec unterstellt, dass die Bevölkerung Luxemburgs von etwa 567.000 Einwohner im Jahr 2015 auf etwa 1.051.000 Einwohner im Jahr 2050 und etwa 1.219.000 Einwohner im Jahr 2070 ansteigt – siehe Abbildung 2.3 und 2.4 in diesem Bericht.

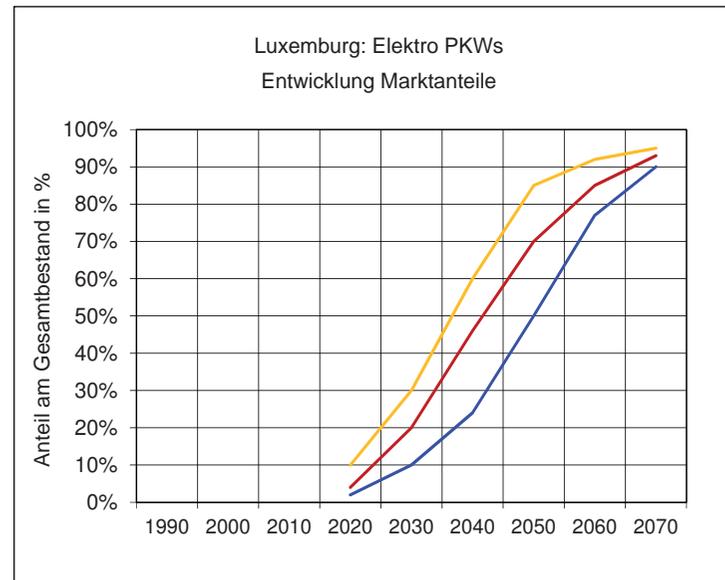
## Entwicklung des Gesamt-PKW-Bestandes

Luxemburg verfügt aktuell mit 660 PKW/1000 Einwohner im Europäischen Vergleich über eine der höchsten Dichten an PKW (VCÖ 2014). Eine Publikation des Statec nennt für 2012 einen Wert von 666 PKW/1000 Einwohner (Hansen 2012). Für die zukünftige Entwicklung wurde von einer konstanten PKW-Dichte ausgegangen. Der Gesamtbestand an PKW stiege damit mit der oben beschriebenen Bevölkerungsentwicklung von derzeit 371.000 auf 693.000 im Jahr 2050.

## Entwicklung des Marktanteils von Elektroautos am Gesamtbestand

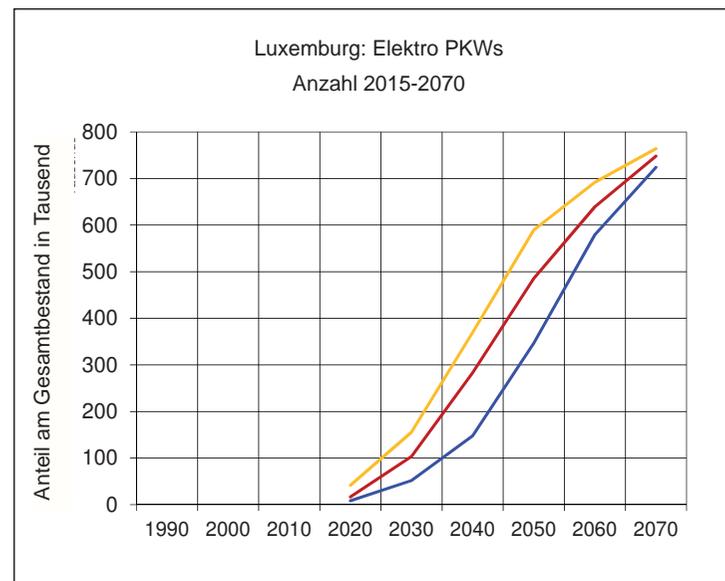
Im dritten nationalen Energieeffizienz-Aktionsplan Luxemburg (NEEAP) wurde ein Marktanteil der Elektro-PKW von 10% am Gesamt-PKW-Bestand als Zielwert für das Jahr 2020 definiert (MdE 2014). Wie in nahezu allen europäischen Ländern verläuft die Markteinführung von Elektro-PKW jedoch bislang deutlich langsamer, als vor Jahren angenommen.

Die Zulassungszahlen der vergangenen Jahre lagen in Luxemburg zwischen 31 im Jahr 2011 und 301 im Jahr 2014. 2015 und 2016 gingen die Zahlen der Neuzulassungen auf 71 bzw. 136 zurück, 2017 wurden bislang 216 Elektro-PKW neu registriert (EAFO 2017). Aus den genannten Zulassungszahlen kann der Bestand an Elektro-PKW auf etwa derzeit 950 geschätzt werden. Dies entspricht einem derzeitigen Anteil von 0,26% am Gesamtbestand. Im Jahr 2015 waren etwa 600 Elektro-PKW zugelassen, dies entspricht einem Marktanteil von etwa 0,16%. Auch wenn die Ladeinfrastruktur in Luxemburg in den



— Ausbaupfad hoch  
— Ausbaupfad mittel  
— Ausbaupfad langsam

Abbildung 10.1  
Annahmen zur zeitlichen Entwicklung des Marktanteils von Elektro-PKW in Luxemburg in Form von drei Ausbaupfaden.



— Ausbaupfad hoch  
— Ausbaupfad mittel  
— Ausbaupfad langsam

Abbildung 10.2  
Annahmen zur zeitlichen Entwicklung der Stückzahl von Elektro-PKW in Luxemburg in Form von drei Ausbaupfaden.

vergangenen Jahren sehr schnell ausgebaut wurde, ist das Erreichen des im NEEAP für 2020 anvisierten Zielwerts von 10% des Gesamt-PKW-Bestandes angesichts der bisherigen Marktentwicklung sehr unwahrscheinlich. 10% Anteil am Gesamtbestand des Jahres 2020 entspräche ca. 41.750 Elektro-PKW. Um diesen Wert zu erreichen, müssten 2018 bis 2020 durchschnittlich mehr als 13.000 Elektro-PKW verkauft werden und damit etwa 80 mal mehr, als im Mittel der vergangenen 7 Jahre. Angesichts der Unsicherheit der weiteren Marktentwicklung werden für die Studie drei Ausbaupfade (langsam, mittel und hoch) definiert, in denen die prozentualen Anteile der Elektro-PKW am Gesamtbestand unterschiedlich schnell ansteigen. Der Ausbaupfad „hoch“ wird so definiert, dass die Zielmarke von 10% Marktanteil in 2020 erreicht wird.

Wie aus Abbildung 10.1 zu entnehmen, differieren die Annahmen für die Marktanteile für die Jahre 2020 bis 2050 deutlich um sich gegen Ende des Betrachtungszeitraum im Jahr 2070 einer nahezu 100%-Deckung anzunähern. Die Geschwindigkeit der Markteinführung ist nur bedingt durch Maßnahmen in Luxemburg steuerbar, da sie sehr stark davon abhängt, wie schnell große Anbieter massentaugliche Modelle anbieten. Dies wiederum hängt stark davon ab, wie sich die politischen Randbedingungen in wichtigen Märkten und Produktionsstandorten wie China, den USA und Europa (v.A. Deutschland und Frankreich) entwickeln. Die wichtigste in Luxemburg steuerbare Voraussetzung für eine schnelle Markteinführung der Elektromobilität – der Aufbau einer geeigneten Ladeinfrastruktur – kommt gut voran. In Abbildung 10.2 sind die Absolutzahlen der Elektroautos in den drei Ausbau-Szenarien dargestellt. Hier differieren die Annahmen für die Gesamtzahl der zugelassenen Elektro-PKW in den drei Ausbaupfaden deutlich. So liegen die Stückzahlen für das Jahr 2020 zwischen 8.300 und 41.700 Elektro-PKW, für das Jahre 2030 zwischen 52.000 und 155.000 und für 2050 zwischen 347.000 und 590.000 Elektro-PKW.

### **Durchschnittliche jährliche Fahrleistung pro PKW**

Die derzeitige durchschnittliche Fahrleistung von PKW in Luxemburg wurde anhand von drei Quellen abgeschätzt. Eine Veröffentlichung des Österreichischen Verkehrsclubs VCÖ nennt einen Wert von mit 12.560 km/a (VCÖ 2017). Eine Studie des Statec nennt eine durchschnittliche Fahrleistung von 8.535 km/a pro PKW als Durchschnittswert (Hansen 2012).

In einer Studie für das Ministerium für nachhaltige Entwicklung und Infrastrukturen wird die Gesamt-Fahrleistung der PKW inländischer Fahrzeughalter mit 4,792 Mrd km/a angegeben. Bei einem Fahrzeugbestand von etwa 370.000 PKW entspricht dies einer durchschnittlichen Fahrleistung von 12.916 km/a pro PKW (Ewringmann 2017). Auf Basis der in den drei Quellen genannten Werte wird in dieser Studie für 2015 eine durchschnittliche Fahrleistung von 11.337 km/a pro PKW angenommen.

Für die Zukunft wird angenommen, dass diese Fahrleistung unverändert bleibt, da sowohl Indikatoren vorhanden sind, die ein Sinken der Fahrleistung erwarten lassen (zunehmender Anteil städtischer Bevölkerung mit der Möglichkeit höherer ÖPNV-Anteile, steigender Anteil an Flugreisen an den Gesamt-Urlaubsreisen) als auch solcher, die ein Ansteigen der mittleren Fahrleistung nahelegen (zunehmende Entfernung von PKW-Pendlern zu ihrem Arbeitsplatz).

### **Durchschnittlicher Strombedarf pro 100 km Fahrleistung**

Der durchschnittliche reale Strombedarf der Elektro-PKW wurde im Mix der derzeit zugelassenen Elektro-PKW mit 22 kWh/100 km angenommen. Dieser Wert liegt deutlich höher als der von den Herstellern angegebene Normverbrauch (NEFZ), da dieser ähnlich wie bei PKW mit Verbrennungsmotoren unter zu optimistischen Randbedingungen ermittelt wird und Stromverbräuche für Heizen, Ladeverluste, Kühlen der Batterien, Licht, Lüftung etc. überhaupt nicht berücksichtigt. In einer Schweizer Studie wird daher zur Berechnung realistischerer CO<sub>2</sub>-Emissi-

onswerte der Norm-Verbrauch mit einem Faktor von 1,7 multipliziert (VCS 2017). Die Normverbräuche heutiger Modelle liegen zwischen knapp 10 und knapp über 20 kWh/100 km. Heute übliche Elektro-PKW (Nissan Leaf, Renault Zoe, BMW i3) liegen bei etwa 12-14 kWh/100km. Aus diesem mittleren Normverbrauch kann unter Annahme des Aufschlagfaktors von 1,7 der mittlere reale Stromverbrauch der heutigen Elektro-PKW-Flotte auf etwa 22 kWh/100km geschätzt werden.

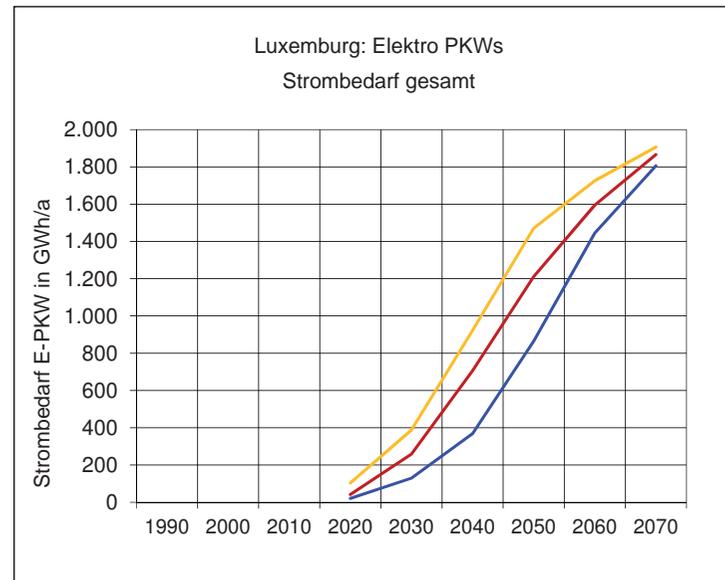
In Zukunft sind einerseits Effizienzfortschritte zu erwarten, etwa durch Entwicklung von leichteren, speziell für E-Autos konzipierten Karosserien. Diesem Trend dürfte jedoch eine Tendenz zu immer mehr Elektroautos „normaler Größe“ entgegenwirken. Der durchschnittliche Stromverbrauch der zukünftigen Elektro-PKW-Flotte wurde daher unverändert mit 22 kWh je 100 km Fahrleistung angenommen.

#### Anteil der PKW, die im/am Wohngebäude geladen werden

Der Anteil der Elektro-PKW, die im/am Wohngebäude geladen werden, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber auf derzeit 75% geschätzt. Es ist zu erwarten, dass sich dieser Anteil mit dem Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur und der Ladeinfrastruktur an Nicht-Wohngebäuden (d.h. am Arbeitsplatz) reduziert. Für 2050 wurde ein Anteil von 54% für die Ladung im/am Wohngebäude angenommen. Gerade für die Zukunft sind solche Werte nur erreichbar, wenn in Wohngebäuden entsprechend hohe Leistungen verfügbar sind.

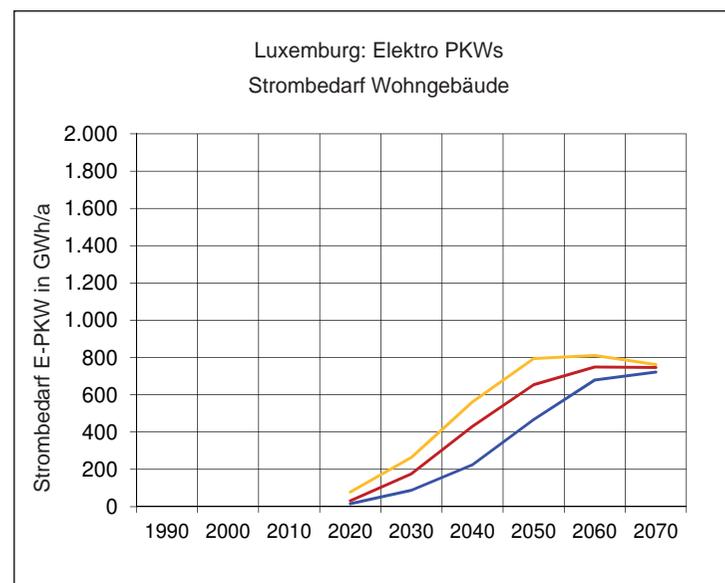
#### Anteil der Elektro-PKW, die tagsüber in oder an Wohngebäuden aufgeladen werden

Für die Abschätzung des Anteils des am Wohngebäude erzeugten PV-Stroms, der zur Beladung von Elektroautos genutzt wird, muss der Anteil der Ladevorgänge im/am Wohngebäude geschätzt werden, der tagsüber durchgeführt wird. Nur für diesen Anteil der Beladung kann (ohne Nutzung stationärer Batterien) PV-Strom vom eigenen Wohnhausdach verwendet werden.



— Ausbaupfad hoch  
— Ausbaupfad mittel  
— Ausbaupfad langsam

Abbildung 10.3  
Zeitliche Entwicklung des gesamten Strombedarfs von Elektro-PKW in Luxemburg.



— Ausbaupfad hoch  
— Ausbaupfad mittel  
— Ausbaupfad langsam

Abbildung 10.4  
Zeitliche Entwicklung des Strombedarfs für Elektro-PKW in Luxemburg durch Ladestationen in Wohngebäuden.

Der Anteil der „Tag-Lader“, d.h. der Elektroautobesitzer, die ihren PKW tagsüber zu Hause laden, wurde mit 30% angenommen. Für 70% der „zu-Hause-Lader“ wurde dementsprechend angenommen, dass die Beladung in der Nacht stattfindet. Für die Zukunft wurde angenommen, dass der Anteil der „Tag-Lader“ auf 42% im Jahr 2050 ansteigt, da unterstellt wurde, dass immer mehr Personen den am Wohngebäude selbst erzeugten PV-Strom zum Laden nutzen wollen.

#### **Anteil der tagsüber zu Hause in EFH und MFH geladenen Elektro-PKW**

Da der wohnflächenspezifische PV-Stromertrag in Mehrfamilienhäusern, aufgrund der kleineren verfügbaren Dachfläche pro Person, geringer ausfällt, als in Einfamilienhäusern, wurden die Anteile der PKW, die in EFH und MFH geladen werden, geschätzt. Der Anteil der Elektro-PKW, die an EFH geladen werden wurde für 2015 auf 70% geschätzt. Für 2050 wurde ein Wert von 42% angenommen.

#### **Ergebnisse Strombedarf für Ladung von Elektro-PKW in Luxemburg**

Auf Basis der o.g. Annahmen zur Marktentwicklung ergeben sich die in Abbildung 10.3 dargestellten Werte des Strombedarfs für Elektro-PKW in Luxemburg. Der Gesamt-Strombedarf der Elektro-PKW in Luxemburg entwickelt sich je nach Ausbaupfad von etwa 2,5 GWh/a im Jahr 2015 auf Werte zwischen 21 und 104 GWh/a im Jahr 2020, zwischen 129 und 388 GWh/a im Jahr 2030 und zwischen 865 und 1.471 GWh/a im Jahr 2050. Nur ein Teil dieses Strombedarfs wird durch Ladestationen an Wohngebäuden gedeckt, der andere Teil erfolgt über Ladestationen am Arbeitsplatz oder im öffentlichen Raum.

Anhand der dargestellten Randbedingungen und Annahmen kann nun der Anteil des Strombedarfs von Elektro-PKW, der in/an Wohngebäuden gedeckt wird, abgeschätzt werden. Er entwickelt sich je nach Ausbaupfad von etwa 1,8 GWh/a im Jahr 2015 auf Werte zwischen 16 und 78 GWh/a im Jahr 2020, zwi-

schen 88 und 264 GWh/a im Jahr 2030 und zwischen 467 und 794 GWh/a im Jahr 2050.

#### **10.2 Potenzialabschätzung und Ausbauszenarien für wohngebäudeintegrierte Photovoltaik**

Bei der Abschätzung des Potenzials für wohngebäudeintegrierte PV-Anlagen wurde wie folgt vorgegangen:

- Abschätzung des Potenzials PV-gereigneter Dachflächen auf der Basis der im Kohortenmodell bis 2070 hinterlegten Dachflächen.
- Abschätzung der Dachflächen für Solarthermieanlagen.
- Abschätzung des theoretischen PV-Stromerzeugungspotenzials.
- Status Quo-Analyse der PV-Erzeugung auf Wohngebäuden.
- Definition von vier PV-Ausbaupfaden.
- Gegenüberstellung des Strombedarfs der Gebäude ohne und mit E-Mobilität mit der PV-Stromerzeugung für die vier Ausbaupfade.

#### **Potenziale Solardächer zur Erzeugung von PV-Strom**

Um die Dachflächenpotentiale zur Nutzung aktiver Solartechniken (z.B. thermische Solaranlagen und Photovoltaik) zu bestimmen, wurden für alle Gebäudemodelle die Flächen von Flachdächern sowie von Dächern, die Richtung Süden, Westen oder Osten ausgerichtet sind, bestimmt. Dabei wurde berücksichtigt, dass durch geforderte Randabstände, Kamine, Gauen, Dachflächenfenster nicht die reinen Dachflächen, sondern nur Teilbereiche zur Verfügung stehen. Teilweise schränken auch die räumlichen Randbedingungen (z.B. Verschattung durch Bäume und Nachbarbebauung) die Einsatzmöglichkeiten für eine aktive Solarnutzung ein. Generell wurden nur 80 % der geometrisch ermittelten Dächflächen jeweils ohne Dachüberstände angesetzt.

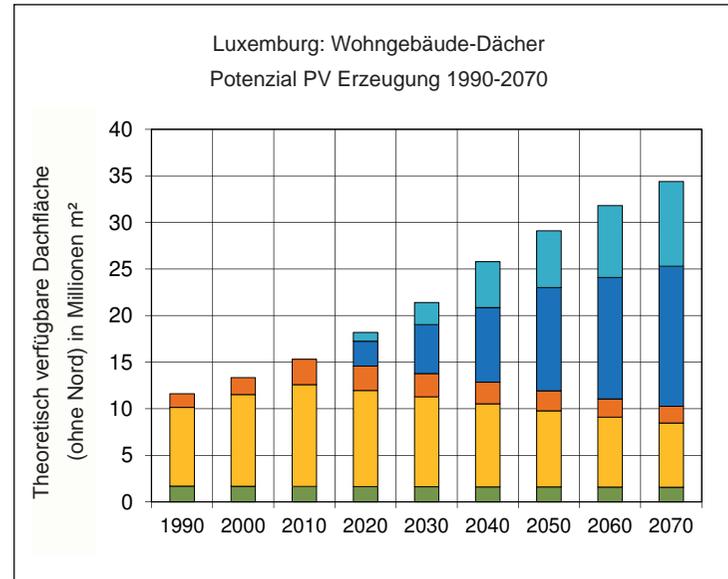
Ganz bewusst werden die Fassaden nicht mitbetrachtet. Hier liegen im Einzelfall sehr viele Beschränkungen vor (z.B. Fenster- und Balkonanordnungen, Fassadenversprünge und -gliederungen) und eine Verschattung stellt eher den Regel- als den Ausnahmefall dar. Daher stellen die Südfassaden eine „Flächenreserve“ für die Fälle dar, die als mindernde Faktoren bei den Dächern nicht berücksichtigt wurden.

In Abbildung 10.5 wird die Entwicklung des Dachflächenpotenzials aller Wohngebäude Luxemburgs im Zeitraum 2010 - 2070 dargestellt. Vor allem die Dächer der Ein- und Zweifamilienhäuser haben große Bedeutung für die Energieproduktion von Solarstrom bzw. Solarwärme. Dies gilt sowohl im Bestand als auch im Neubau. Gründe hierfür sind das im Vergleich zu Mehrfamilienhäusern günstige Verhältnis von Dach- zu Wohnfläche und der hohe Anteil zwischen 70% (2015) und 50% (2070) der Einfamilien, Doppel- und Reihenhäuser an der Gesamtwohnfläche.

Bei den Dachflächen wird der bedingt sanierbare Bestand nicht berücksichtigt, weil davon ausgegangen wird, dass speziell bei denkmalgeschützten Gebäuden eine Integration von thermischen Solaranlagen oder Photovoltaikmodulen aus gestalterischen Gründen schwierig oder ausgeschlossen ist.

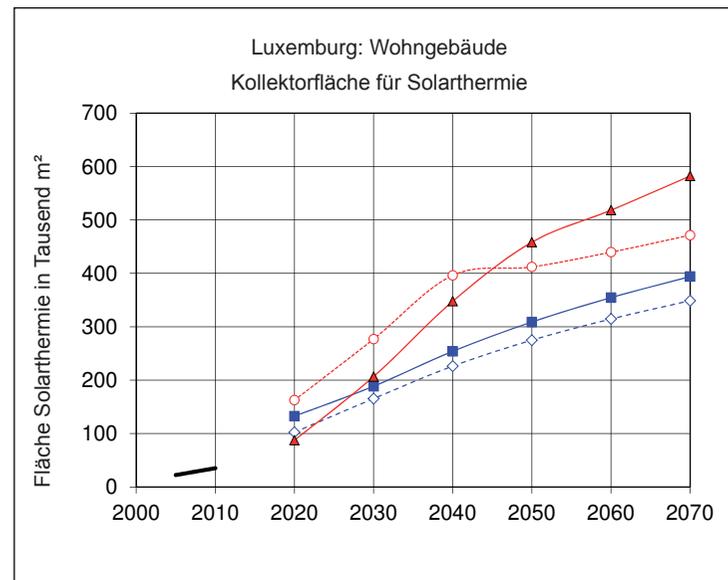
### Dachflächenabschätzung Solarthermie

Ferner ist zu berücksichtigen, dass ein bestimmter Flächenanteil für thermische Solaranlagen genutzt wird. Die Dachflächen, welche für die Solarthermie benötigt werden, sind je nach Szenario unterschiedlich. Aus den im Kohortenmodell dieser Studie berechneten Endenergieeinsparungen durch Solarthermie wird mit einem mittleren spezifischen Kollektorsertrag von 350 kWh/m<sup>2</sup> Kollektorfläche und Jahr die gesamte benötigte Kollektorfläche berechnet. Die installierte Kollektorfläche wird laut EurObserv'ER Solar Thermal Barometer (EurObserv'ER 2016b) für das Jahr 2015 mit 55.600 m<sup>2</sup> angenommen. Die vorliegende Studie geht im Effizienz-Szenario von grob 63.000 m<sup>2</sup> aus.



- Neubau MFH
- Neubau EFH
- Sanierung MFH
- Sanierung EFH
- Bedingt Sanierbar

Abbildung 10.5  
Zeitliche Entwicklung der für die PV-Erzeugung geeigneten Dachflächen auf Wohnhäusern in Luxemburg. Darstellung der Potenziale, getrennt nach strategischen Typen. Angabe der Werte in Mio. m<sup>2</sup>.



- ◇ Status quo
- Business-as-usual
- ▲ Effizienz
- Effizienz-Plus
- Bestand

Abbildung 10.6  
Zeitlichen Entwicklung der Kollektorfläche für Solarthermie auf den Wohngebäuden in den vier Hauptszenarien. Angabe der Werte in Tsd. m<sup>2</sup>.

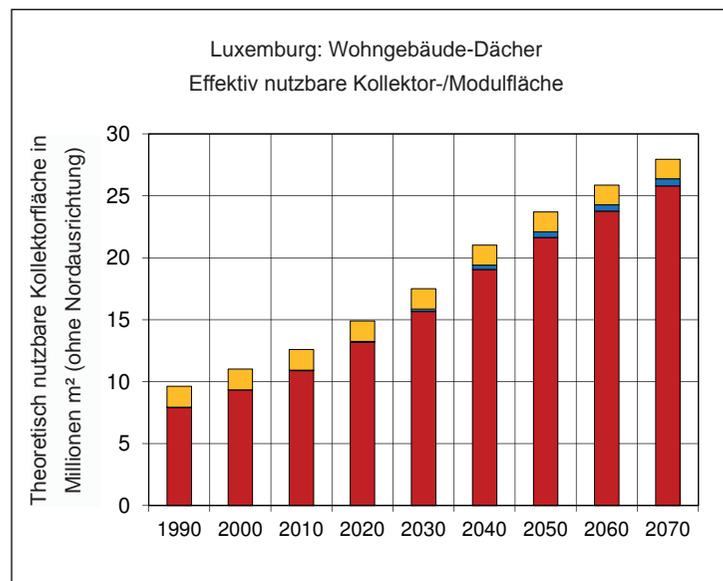
	obere Abschätzung	mittlere Abschätzung	untere Abschätzung
Süd	160	120	80
Ost / West	120	90	60
Horizontal	120	90	60

Tabelle 10.1  
PV-Ertrag pro Quadratmeter  
Kollektorfläche als Grundlage für  
Potentialabschätzungen.

Die Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien 2016 (Schön et al. 2016) geht für 2020 von einem Potenzial von 136.000 m<sup>2</sup> aus und für 2030 von 362.000 m<sup>2</sup>. In der vorliegenden Studie wird dieses Potenzial für 2030 nach der Bottom-up-Berechnung auch im ambitionierten Effizienz-Plus-Szenario mit 277.000 m<sup>2</sup> nicht erreicht. Derzeit sind ca. 0,5 % der Dachflächen mit Süd-, West- und Ostausrichtung mit solarthermischen Anlagen bedeckt. 2070 werden bei linearer Fortschreibung ca. 2% der süd-ost- und westorientierten Dachflächen mit Solarthermie bedeckt sein. Diese Fläche steht demnach nicht für PV-Anlagen zur Verfügung.

- Bedingt sanierbar
- Solarthermie (Effizienz)
- PV-Modulfläche

Abbildung 10.7  
Theoretisch nutzbare Dachflächen  
für aktive Solarnutzungen (Solar-  
thermie, PV) auf allen Wohngebäu-  
den Luxemburgs (1990 - 2070).  
Die Flächen auf den Wohnbauten  
des bedingt sanierbaren Bestands  
sind gesondert ausgewiesen und  
werden bei der Ermittlung des PV-  
Strom-Erzeugungspotenzials nicht  
berücksichtigt. . Angabe der Werte  
in Mio. m<sup>2</sup>.



### Abschätzung des theoretischen (bzw. oberen) Potenzials der PV-Erzeugung

Die Abschätzung erfolgt mit ca. 1100 kWh/m<sup>2</sup>a Globalstrahlung auf die Horizontale. Die untere Abschätzung deckt sich in etwa mit der Umrechnung in (Kessler et al. 2011) und wird zur vereinfachten Betrachtung herangezogen. Dies berücksichtigt auch Verschattung der Module durch die Umgebung. Daraus ergeben sich orientierungsabhängige Erträge je Quadratmeter Kollektorfläche gemäß Tabelle 10.1. Diese sind auf der sicheren Seite abgeschätzt, d.h. sie können im Einzelfall durchaus höher liegen (z.B. bei leistungsfähigen Modulen und geringer Verschattung). Die Erfahrung zeigt jedoch andererseits, dass in der gebauten Wirklichkeit immer wieder mindernde Faktoren eine Rolle spielen (z.B. besondere Dachformen, Verschattung durch Bäume und Nachbarbebauung oder eigene Bauteile). Daher ist hier eine konservative Abschätzung angebracht.

Es wird vereinfacht zur Potenzialabschätzung davon ausgegangen, dass ca. 20% weniger Kollektorfläche als Dachflächen installiert werden. Diese Abzugsflächen werden z.B. für geforderte Randabstände, Dachaufbauten, Profile der Module und ähnliches benötigt.

Bei den folgenden Berechnungen werden die Dachflächen im bedingt sanierbaren Bestand nicht mehr berücksichtigt, da er teilweise unter Denkmalschutz steht oder aus gestalterischen Gründen nicht zur Aufnahme von PV-Anlagen oder Solarthermie geeignet ist (auch wenn dies im Einzelfall anders sein sollte kann damit ein Ausgleich für ähnlich gelagerte Fälle im voll sanierbaren Bestand hergestellt werden).

Gemäß diesen Randbedingungen lässt sich nun der theoretisch mögliche Stromertrag auf den Dachflächen aller Wohngebäude Luxemburgs kalkulieren. In Abbildung 10.8 ist dies zunächst differenziert nach den strategischen Gruppen für die mittleren Erträge gemäß Tabelle 10.1 aufgetragen.

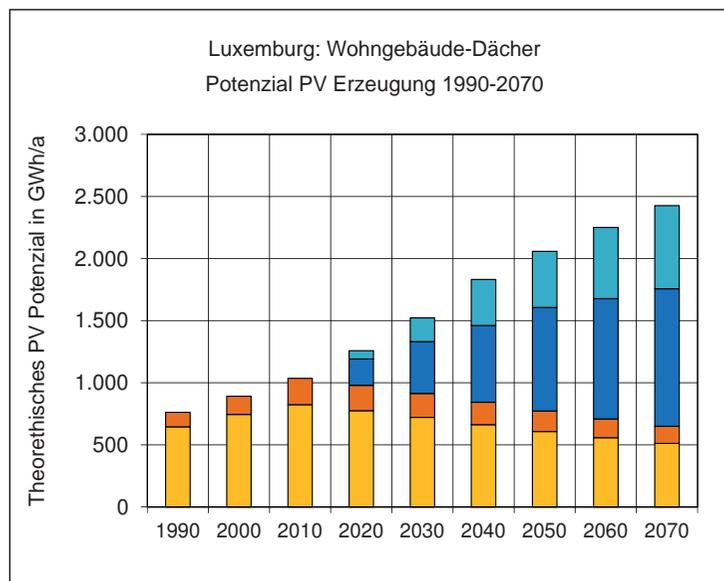
In Abbildung 10.9 ist die gesamte Bandbreite, definiert über die obere, mittlere und untere Ertragsabschätzung gemäß Tabelle 10.1, für alle Dächer der Wohngebäude in Luxemburg dargestellt.

### Bisherige Entwicklung der PV-Erzeugung

In Luxemburg wurden im Jahr 2015 laut Energiestatistik (Stattec 2017) 103 GWh PV-Strom erzeugt. Dies erfolgt über Freianlagen und auf Gebäuden, vor allem solchen mit Wohnnutzung. Seit 2005 zeigt sich dies, beginnend mit 17,7 GWh/a als stetige Entwicklung, die jedoch nicht gänzlich gleichmäßig verläuft. Die kumulierte PV-Leistung stieg im selben Zeitraum von 21,2 auf 125 MWp an. Durch das Verhältnis der kumulierten Leistung in Luxemburg insgesamt zu der kumulierten Leistung der PV-Anlagen der Wohngebäude kann der mittlere jährliche Zubau abgeschätzt werden. Im Zeitraum 2013 bis 2015 lässt sich so ein Wert von 40 % ermitteln, der beim Ausbau der Photovoltaik auf die Wohngebäude entfällt. Als weiterer Kennwert ergibt sich ein mittlerer spezifischer Ertrag von 806 kWh/kWp für alle Wohngebäude.

Aufbauend auf der Entwicklung der vergangenen Jahre können vier Ausbaupfade definiert werden, die sich durch verschiedene Ausbauraten voneinander unterscheiden:

- Der untere Ausbaupfad entspricht mit 5,6 MWp pro Jahr den Wachstumsraten in den Jahren 2015 und 2016.
- Der mittlere Ausbaupfad entspricht mit 8,8 MWp pro Jahr dem realen Ausbau im Jahr 2013.
- Der hohe Ausbaupfad geht von 12 MWp Zubau pro Jahr aus.
- Der maximale Ausbaupfad basiert auf der Annahme einer konstanten jährlichen Steigerung auf 20MWp. Gemäß einer Studie des Fraunhofer-Instituts (Schön et al. 2016) ist ein jährliches Potenzial auf Freiflächen von 30 MWp vorstellbar. Daraus wird geschlossen, dass auf Wohngebäuden wenigstens 2/3-tel dieses Wertes als jährlicher Zubau realisierbar wäre.



■ Neubau MFH  
■ Neubau EFH  
■ Sanierung MFH  
■ Sanierung EFH

Abbildung 10.8  
Theoretisches Potential der PV-Stromerzeugung auf den Dächern der Wohngebäude in Luxemburg unter der Annahme der mittleren Abschätzung gemäß Tabelle 10.1. Angabe der Werte in GWh/a.

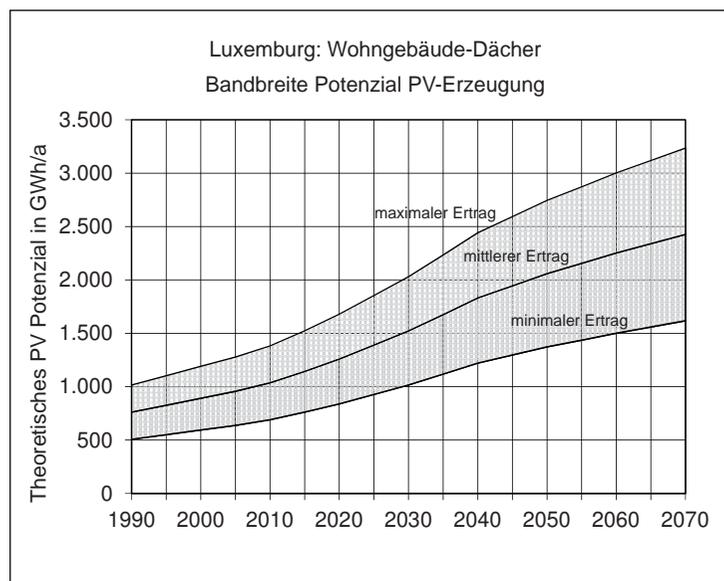
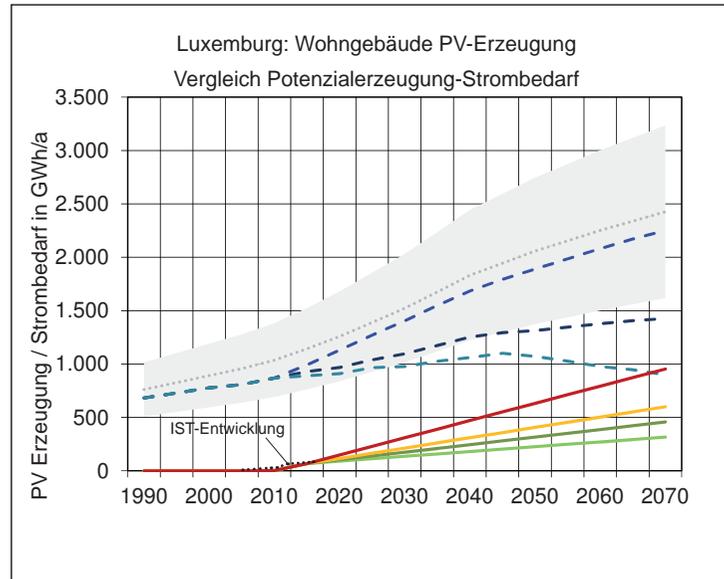


Abbildung 10.9  
Bandbreite des theoretisch möglichen Potenzials der PV-Stromerzeugung auf den Wohngebäuden Luxemburgs gemäß der oberen, mittleren und unteren Ertragswerte in Tabelle 10.1. Angabe der Werte in GWh/a.

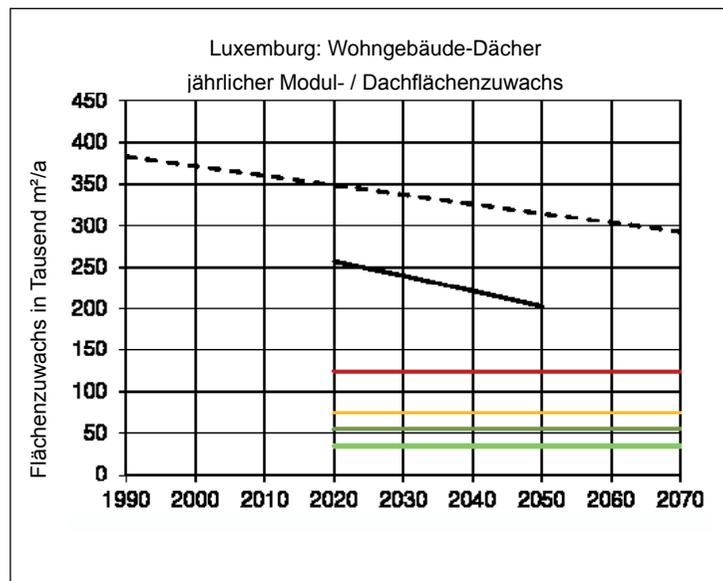
- Bandbreite PV Erzeugung
- Strombedarf WG inkl. HHS
- Business as usual
- Effizienz
- Effizienz Plus
- PV Erzeugung, +20MWp/a
- PV Erzeugung, +12MWp/a
- PV Erzeugung, +8,8MWp/a
- PV Erzeugung, +5,6MWp/a

Abbildung 10.10  
Potenzial der PV-Erzeugung in Form von Ausbaupfaden und Gegenüberstellung mit dem Haushaltsstrombedarf (HHS) in den verschiedenen Szenarien. Angabe der Werte in GWh/a.



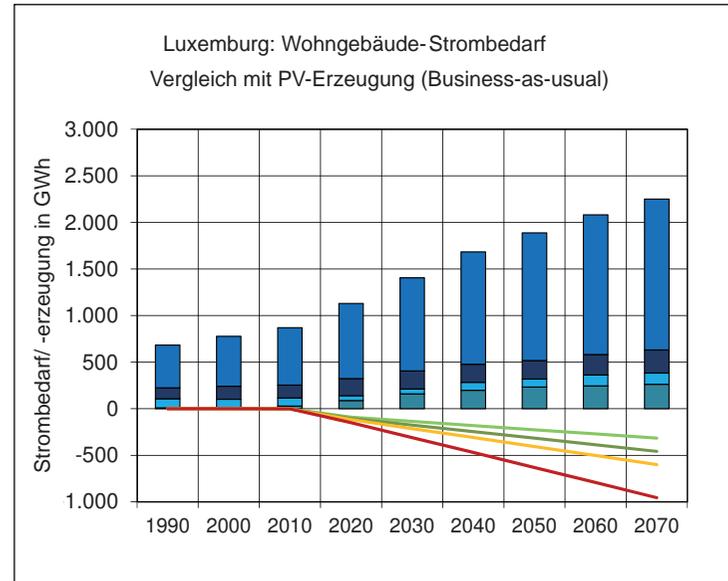
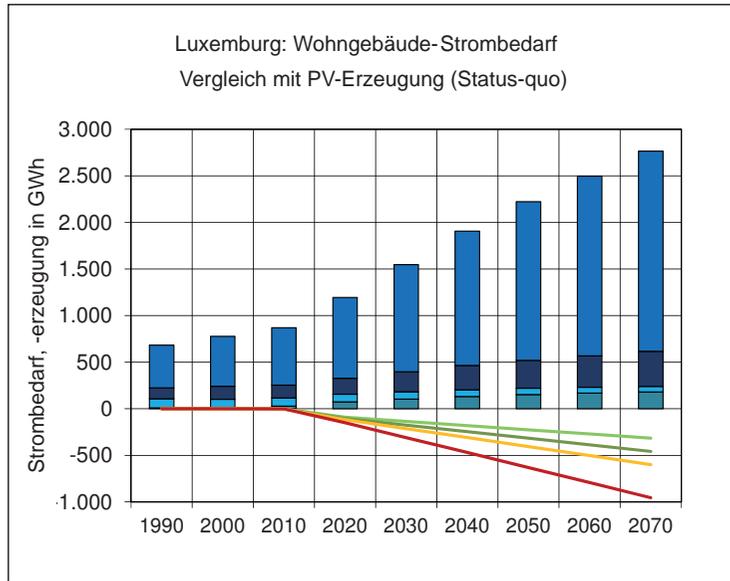
- PV Erzeugung, +20MWp/a
- PV Erzeugung, +12MWp/a
- PV Erzeugung, +8,8MWp/a
- PV Erzeugung, +5,6MWp/a
- Nutzbare sanierte Dachfläche pro Jahr
- Trendlinie zusätzliche Dachfläche Neubau

Abbildung 10.11  
Zuwachs an PV-Modulflächen je nach Ausbaupfad und Vergleich mit den theoretisch nutzbaren Dachflächen auf allen Wohngebäuden Luxemburgs. Angabe der Werte in Tausend m<sup>2</sup>.



In Abbildung 10.10 wird das Potenzial der PV-Erzeugung in verschiedenen Entwicklungsszenarien dargestellt. Die schwarz gepunktete Linie von 2005 bis 2015 stellt die bisherige Entwicklung der PV-Erzeugung auf Wohngebäuden 2005 - 2015 dar. Die daran anschließenden durchgezogenen Linien beschreiben die vier verschiedenen Ausbaupfade. Die gestrichelten Linien im oberen Bereich der Grafik stellen den Strombedarf der Wohngebäude inklusive Haushaltsstrom für die Szenarien Business-as-usual, Effizienz und Effizienz-Plus dar. Man erkennt, dass die Gesamterzeugung im schnellsten PV-Ausbaupfad (Zubau 20 MWp pro Jahr) dem Gesamt-Strombedarf inkl. Haushaltsstrom im Effizienz-Plus-Szenario im Jahr 2070 über die Jahresbilanz entspricht. Die grau-gepunktete Linie stellt das theoretische PV-Potenzial der Dachflächen bei mittleren Erträgen dar, der grau hinterlegte Bereich die Bandbreite zwischen oberer und unterer Abschätzung der flächenspezifischen Erträgen gemäß Tabelle 10.1. Das theoretische PV-Potenzial bei mittleren Erträgen liegt demnach jahresbilanziell höher, als der Strombedarf im Business-as-usual-Szenario. In keinem der PV-Ausbaupfade wird das theoretische Potenzial auch nur annähernd ausgeschöpft.

Dies wird auch in Abbildung 10.11 deutlich. Schon alleine der Dachflächenzuwachs im Neubau würde genügen, um den Flächenbedarf aller Ausbaupfade abzudecken. Der jährliche Zuwachs an Modulflächen in den verschiedenen PV-Ausbaupfaden ist hier im Vergleich zum Dachflächenzuwachs im Neubau und zur jährlich zu sanierenden Dachfläche dargestellt. Die Nutzungsdauer der Dächer wurde mit durchschnittlich 40 Jahren angenommen, beim Flachdach beträgt sie nur 30 Jahre, jedoch 50 Jahre beim Steildach. Dies ergibt eine Sanierungsrate der Dächer von durchschnittlich 2,5%. Im Jahr 2050 sind bei dieser Annahme dann alle Dächer einmal saniert worden und, wenn diese konsequent mit PV-Modulen ausgestattet werden, wäre im Bestand 2050 die maximal mögliche Kollektorfläche erreicht. Die benötigten Dachflächen liegen auch im höchsten Ausbaupfad weit unter den verfügbaren Dachflä-



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- PV Erzeugung + 5,6MWp/a
- PV Erzeugung + 8,8MWp/a
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Erzeugung +20MWp/a

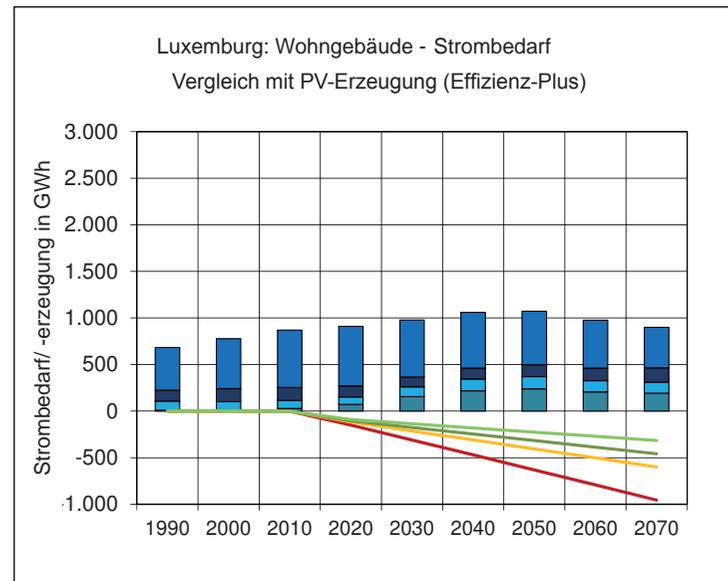
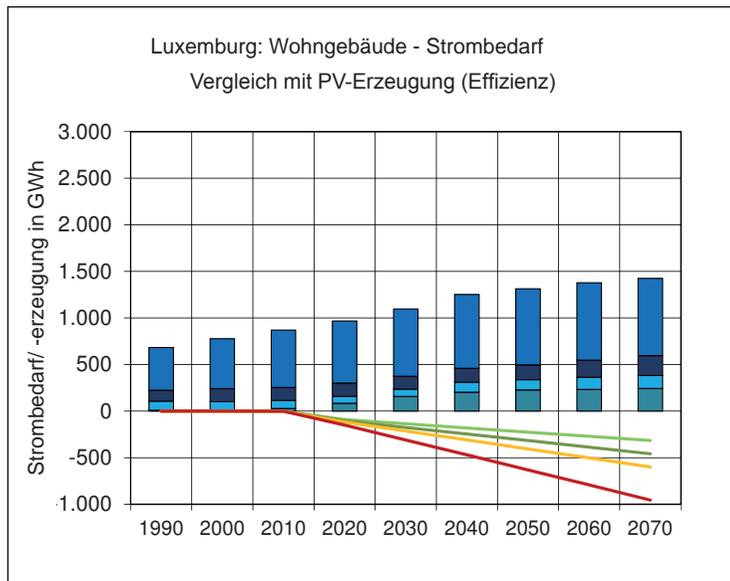
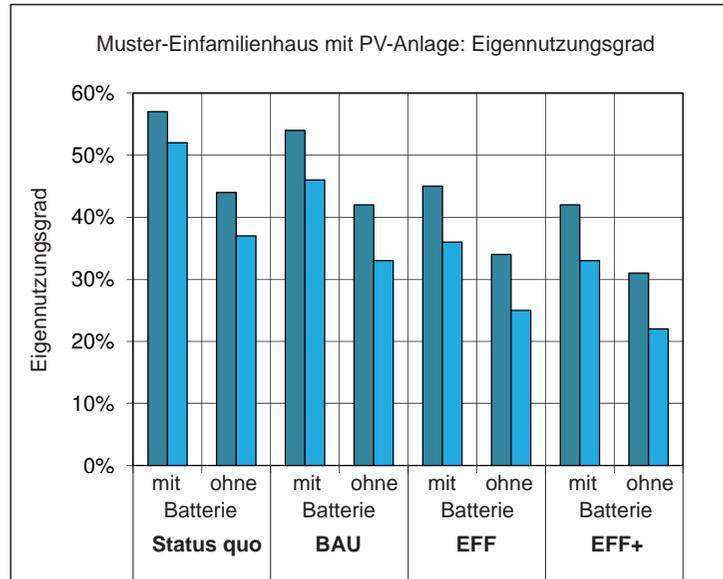


Abbildung 10.12  
Gegenüberstellung des Strombedarfs der privaten Haushalte (Haushaltsstrom, Hilfsstrom, Heizung, Warmwasser) in den vier Hauptszenarien und des PV-Ertrags gemäß den vier verschiedenen Ausbaupfaden. Angabe der Werte in GWh/a.

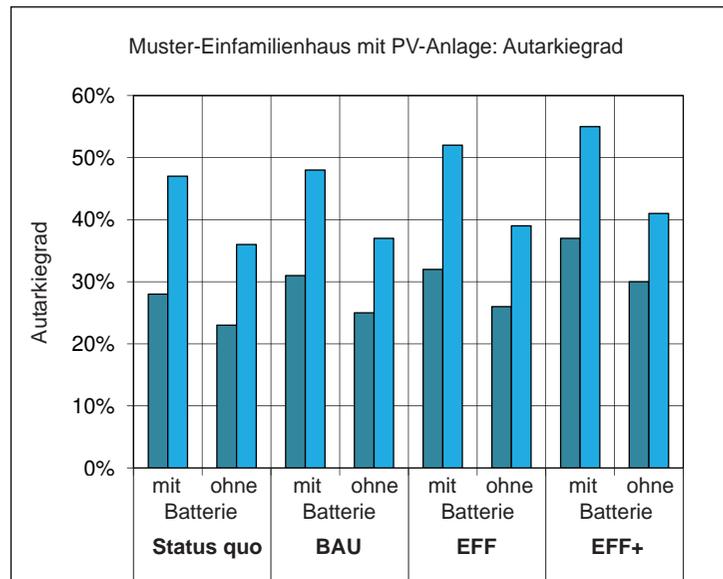
mit Wärmepumpe  
ohne Wärmepumpe

Abbildung 10.13  
Eigennutzungsgrad der PV-  
Erzeugung eines Modell-Einfamilienhauses unter verschiedenen  
Randbedingungen. Die südorientierte Dachfläche ist vollständig mit  
PV-Modulen belegt. Der Dämmstandard und das Lüftungskonzept  
werden szenarioabhängig variiert (siehe Werte in Tab. 4.4 - 4.6 für  
das Jahr 2020). Zudem ergeben sich weitere Varianten durch das  
Vorhandensein einer Wärmepumpenheizung bzw. einer Batterie.



mit Wärmepumpe  
ohne Wärmepumpe

Abbildung 10.14  
Autarkiegrad der PV-Erzeugung eines Modell-Einfamilienhauses unter  
verschiedenen Randbedingungen. Die südorientierte Dachfläche ist  
vollständig mit PV-Modulen belegt. Der Dämmstandard und das Lüf-  
tungskonzept werden szenarioabhängig variiert (siehe Werte in Tab.  
4.4 - 4.6 für das Jahr 2020). Zudem ergeben sich weitere Varianten  
durch das Vorhandensein einer Wärmepumpenheizung bzw. einer  
Batterie.



chen im Neubau. Dies bedeutet, dass das Dachflächenpotenzial in jedem Falle ausreichend ist, um auch bei einer hohen Zuwachsrates die PV-Module auf den Wohngebäuden unterzubringen. Jedoch unterscheidet sich das Zubauvolumen zwischen den Ausbaupfaden deutlich. Für die untere Entwicklung müssten jährlich ca. 35.000 m<sup>2</sup> Modulfläche installiert werden, für die obere Entwicklung hingegen etwa 125.000 m<sup>2</sup>.

Abbildung 10.12 zeigt für alle vier Hauptszenarien in welchem Verhältnis der Strombedarf und die PV-Erzeugung über den Betrachtungszeitraum 1990 - 2070 zueinander stehen. Daran wird vor allem deutlich, wie wichtig eine hohe Stromeffizienz für höhere Deckungsraten ist. Nur unter den Randbedingungen des Effizienz-Plus-Szenarios kann die PV-Stromproduktion jahresbilanziell in die Nähe des Strombedarfs geführt werden kann. Wenn man das Ziel einer vollständigen Energieversorgung mit erneuerbaren Energien anstrebt, ist gerade bei den Stromanwendungen die Energieeffizienz der Haushaltsgeräte und sonstigen Stromverbraucher besonders wichtig.

In Abbildung 10.15 ist nun abschließend für das Effizienz-Szenario der gesamte Strombedarf der privaten Haushalte inklusive Elektromobilität (mittlerer Ausbaupfad) dem Stromertrag der PV-Erzeugung gemäß dem mittleren Ausbaupfad gegenübergestellt.

### 10.3 Abschätzung des eigengenutzten PV-Stroms – unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität

#### Eigennutzungsanteil und Autarkiegrad ohne E-Mobilität

Für die Effizienzszenarios wird nun abschließend genauer analysiert, welchen Beitrag die Photovoltaik zur Deckung des Strombedarfs in den privaten Haushalten leisten kann. Erst in einem zweiten Schritt wird abgeschätzt, inwieweit der Eigennutzungsanteil durch die Integration der Elektromobilität (z.B. durch gebäudeintegrierte Ladestationen) beeinflusst wird. Bei

der Photovoltaiknutzung wird normalerweise der erzeugte Strom zunächst direkt in den Wohngebäuden genutzt und nur die Überschüsse ins Netz eingepieist. Daher ist von Interesse, wie hoch der Eigennutzungsanteil unter verschiedenen Randbedingungen ist. Er hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab (vgl. Lichtmeß 2015):

- Größe, Orientierung und Ausrichtung der PV-Anlage
- Effizienz der technischen Anlagen (z.B. Geräte, Beleuchtung, Pumpen)
- Vorhandensein einer Lüftungsanlage und deren Stromeffizienz und Betriebsweise
- Speichermöglichkeit des PV-Stroms (z.B. Batteriesystem)
- Nutzerverhalten und Belegung

Bei einer stromgestützten Wärmeversorgung (z.B. Wärmepumpe) kommen folgende Punkte hinzu:

- Wärmebedarf des Gebäudes inkl. Verteilverluste
- Temperaturniveau des Wärmeübergabesystems
- Effizienz und Betriebsweise der Wärmeerzeugung
- Wärmequelle und deren Erschließung
- Belegung und daraus resultierender Warmwasserbedarf
- Vorhandensein einer thermischen Solaranlage

Die Eigenverbrauchsquote ist als Quotient aus der direkt vor Ort genutzten Energie ( $E_{PV,EV}$  wird nicht ins öffentliche Netz eingespeist) und der gesamten Energie ( $E_{PV,tot}$ ) die von der PV-Anlage geliefert wird. Im Gegensatz dazu wird beim Solaren Deckungsgrad oder auch Autarkiegrad die selbst genutzte Energie ( $E_{PV,EV}$ ) der PV-Anlage dividiert durch den gesamten Energiebedarf des Verbrauchers ( $E_{tot}$ ).

Der Eigenverbrauchsanteil und der solare Deckungsgrad wird mit dem EIV-eigenen online-tool SUSI, (EIV 2017) für ein Einfamilienhaus für verschiedene Szenarien abgeschätzt. Variiert wurden die energetische Gebäudequalität, der Haushalts- und Hilfsstrombedarf sowie der Strombedarf des Wärmeversorgungssystems (Wärmepumpe bzw. Heizkessel).

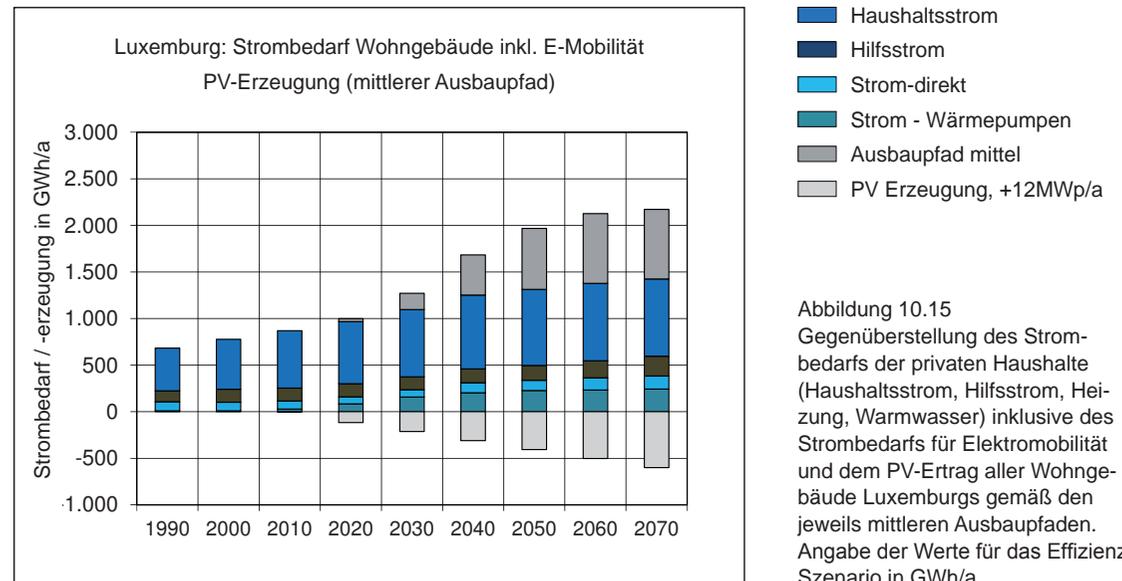


Abbildung 10.15  
Gegenüberstellung des Strombedarfs der privaten Haushalte (Haushaltsstrom, Hilfsstrom, Heizung, Warmwasser) inklusive des Strombedarfs für Elektromobilität und dem PV-Ertrag aller Wohngebäude Luxemburgs gemäß den jeweils mittleren Ausbaupfaden. Angabe der Werte für das Effizienz-Szenario in GWh/a.

Außerdem wurden Varianten mit und ohne Batteriespeicher berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 10.13 und 10.14 dargestellt. Die Werte liegen für die untersuchten Einfamilienhäuser unter den Randbedingungen des Effizienz-Szenarios zwischen 27 und 52 % und im Effizienz-Plus-Szenario zwischen 30 und 55 %. In Mehrfamilienhäusern liegen die Autarkiegrade geringer, weil die spezifischen Dachflächen pro Person bzw. pro Nutzflächeneinheit niedriger ausfallen. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde der Eigennutzungsgrad im Mittel von EFH und MFH mit etwa 30% angenommen.

### Erhöhung des Eigennutzungsgrades durch E-Mobilität

In Wohngebäuden mit PV-Anlage kann der Eigennutzungsgrad des PV-Stroms erhöht werden, wenn dieser zusätzlich zu den Anwendungen Haushaltsstrom, Hilfs- und Alltagsstrom, Heizung und Warmwasser auch zur Ladung von Elektro-PKW genutzt werden kann. Die Höhe des Eigennutzungsgrades und das Ausmaß der Steigerung dieses Eigennutzungsgrades hängt von einer Reihe von Faktoren ab, u.a.:

- Bereich mit Datenlücken
- Datenpunkt mit Elektroauto (14.07.)

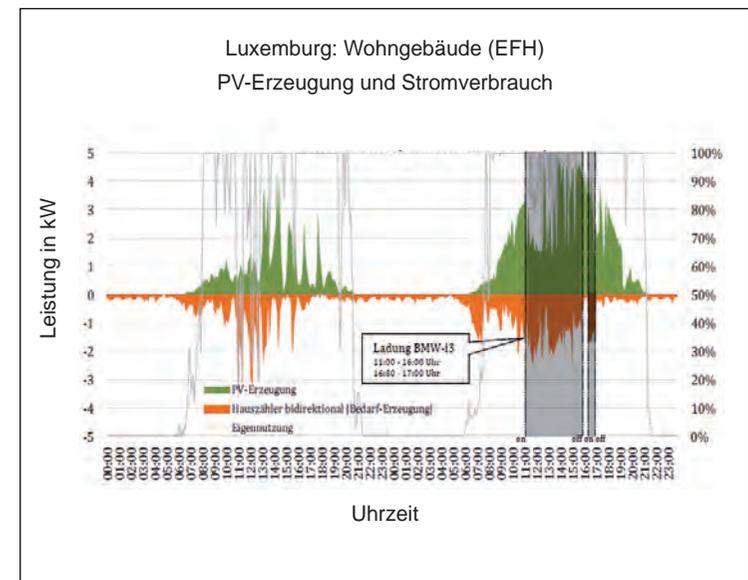
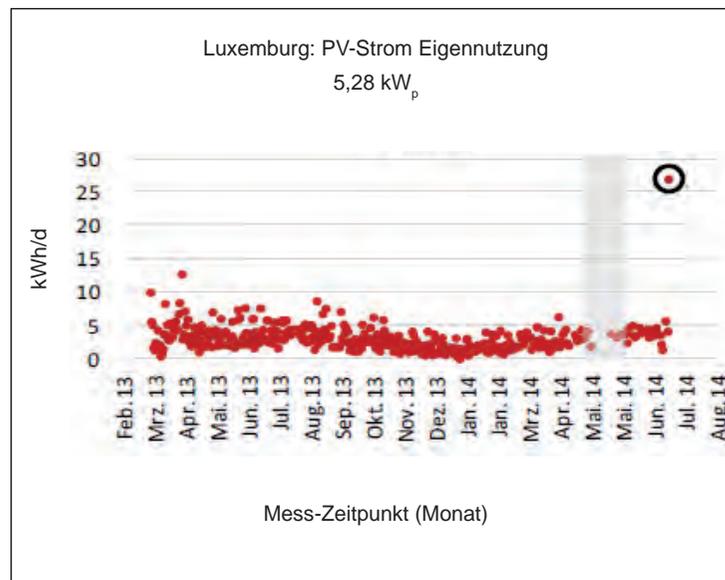
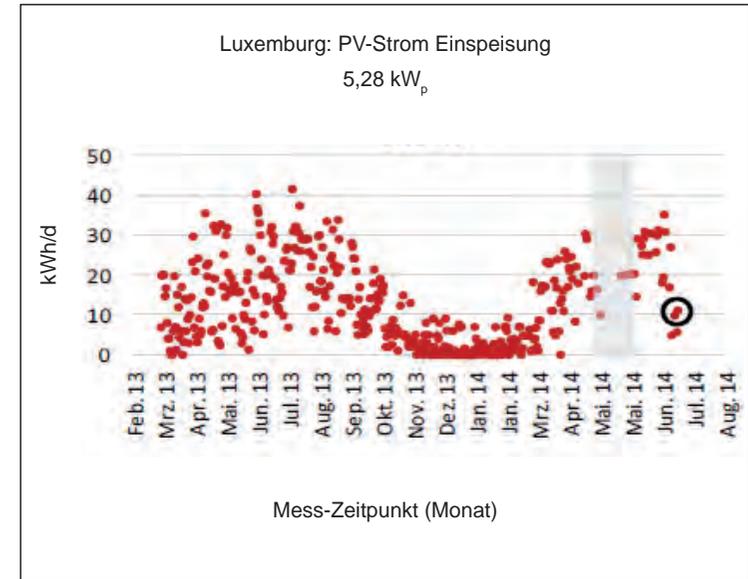
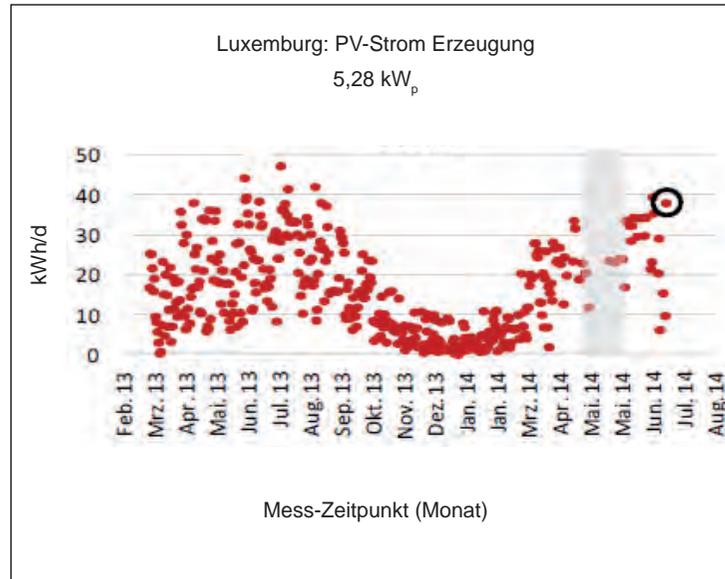
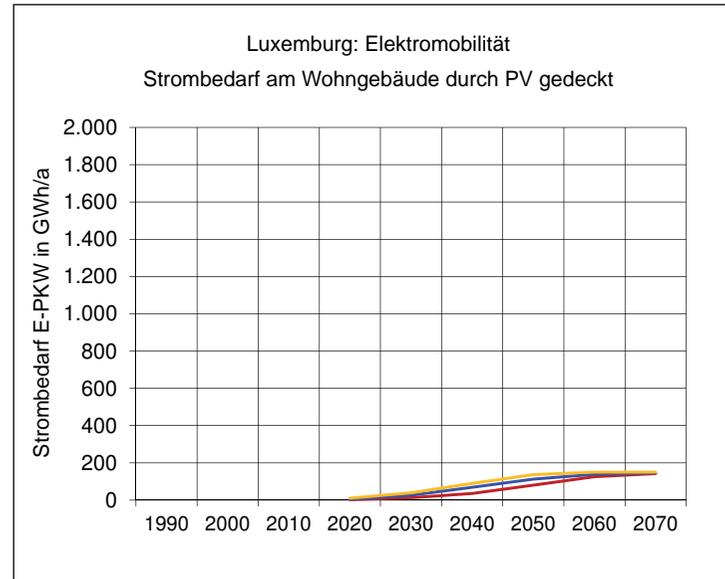


Abb. 10.16 a-d  
Gemeinsame Darstellung von PV-Stromerzeugung, Einspeisung ins Netz und Eigennutzung mit/ ohne Elektro-PKW für ein typisches Einfamilienhaus mit einer PV-Anlage mit 5,28 kW<sub>p</sub>. Unten rechts ist zur näheren Erläuterung die PV-Erzeugung und der Strombedarf der Beladung des Elektro-PKW an einem Sommertag in hoher zeitlicher Auflösung aufgetragen. Quelle: (Lichtmeß 2017).

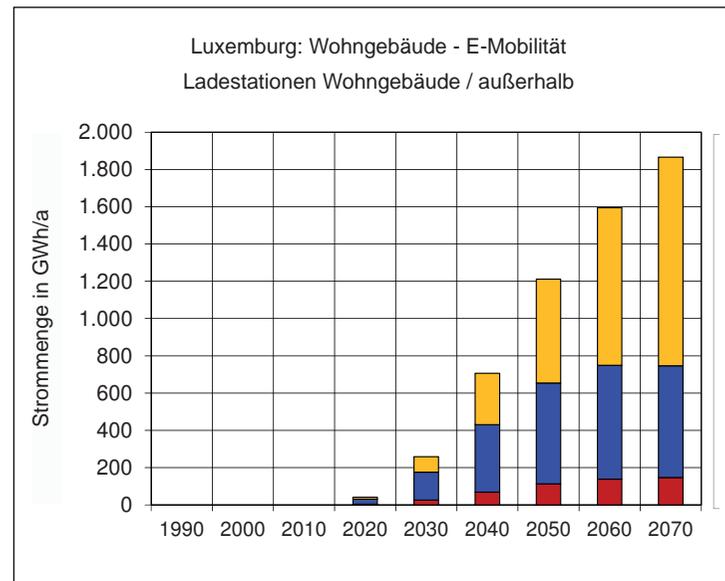
- Höhe des Haushaltsstrombedarfs
- Höhe des Hilfs- und Allgenerstrombedarfs
- Art des Wärmeversorgungssystems, z.B. elektrische Wärmepumpe oder Heizkessel (fossil/Biomasse)
- Höhe der Stromerzeugung durch die gebäudeintegrierte PV-Anlage
- Zeitpunkt der Beladung (Tag/Nacht)

Um die Erhöhung des Eigennutzungsgrades zu prüfen, wurden detaillierte Berechnungen auf Basis von Messungen des Beladevorgangs eines Elektro-PKW an einem Einfamilienhaus mit PV-Anlage (5,28 kWp) durchgeführt (Lichtmeß 2017). Diese Berechnungen zeigen, dass im konkreten Fall das Fahrzeug (ein BMW i3) zwischen 11:00 und 16:00 sowie zwischen 16:30 und 17:00 bei Sonnenschein geladen wurde. Die Batterie wurde in diesen 5,5 Stunden von etwa 20% auf 70% der Kapazität geladen, dies entspricht ca. 11 kWh (siehe Abb. 10.14). In den drei Grafiken sind die Tageswerte der PV-Stromerzeugung, der Einspeisung sowie der Eigennutzung aufgetragen. Die Werte für den Tag, an dem der Elektro-PKW geladen wurde, sind eingekreist. Wie zu erkennen, war die Erzeugung am betreffenden Tag mit etwa 37 kWh recht hoch. Durch die zusätzliche Beladung des Elektro-PKW ist die Eigennutzung mit etwa 26 kWh deutlich höher als in den sonstigen Tagen während die Netzeinspeisung mit etwa 10 kWh deutlich geringer ausfällt. Die Messung zeigt, dass die zusätzliche Ladung von Elektro-PKW an sonnigen Sommertagen zu deutlichen Erhöhungen des Eigennutzungsgrades führt. Um den Einfluss der zusätzlichen Ladung des Elektro-PKW auf den Jahres-Eigennutzungsgrad zu ermitteln, wurden aufbauend auf den o.g. Messergebnissen Jahressimulationen für ein 200 m<sup>2</sup> großes Einfamilienhaus mit einer 5,28 kWp-PV-Anlage durchgeführt (Lichtmeß 2017a). Berechnet wurden Varianten mit Gas- und mit Wärmepumpenheizung sowie Varianten mit einem Haushaltsstrombedarf von 3.500 bzw. 2000 kWh/a. Für alle Varianten wurde der Eigennutzungsgrad zunächst ohne Beladung des Elektro-PKW und danach mit Beladung ermittelt.



- Ausbaupfad hoch
- Ausbaupfad mittel
- Ausbaupfad langsam

Abb. 10.17  
Zeitliche Entwicklung des Strombedarfs für Elektro-PKW, der durch PV-Strom von Wohngebäuden in Luxemburg gedeckt werden kann. Angabe in GWh/a. Vergleiche Strombedarf gesamt (Abb. 10.3) und Strombedarf Wohngebäude (Abb. 10.4).

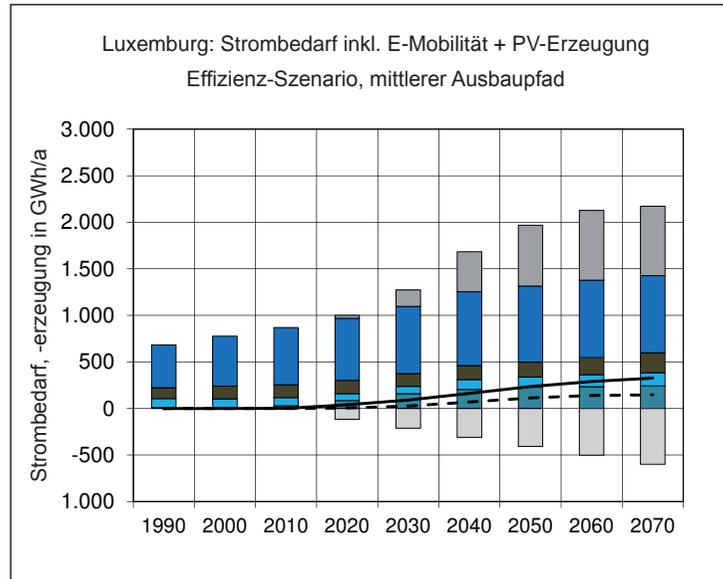


- Ladung nicht am Gebäude
- Ladung am Gebäude (Netz)
- Ladung durch PV am Gebäude

Abb. 10.18  
Strombedarf für Elektro-PKW in Luxemburg gemäß mittleren Ausbaupfad und seine Verteilung auf verschiedene Ladestandorte. Angabe in GWh/a.

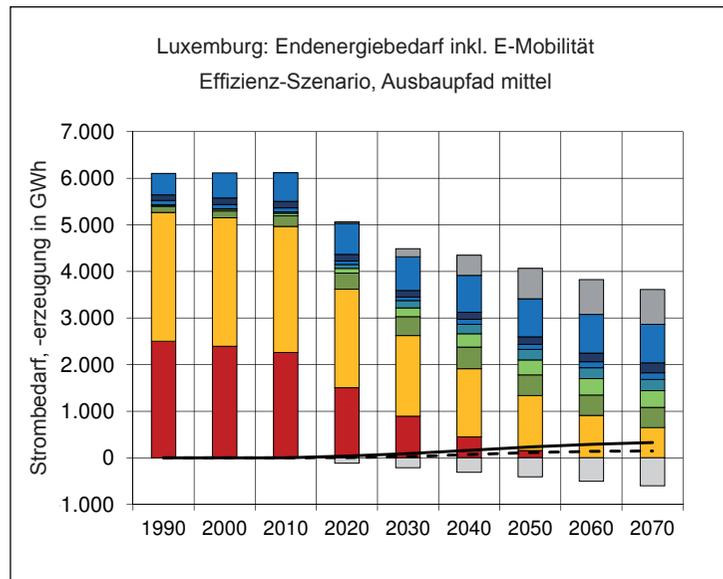
- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- - - PV Eigenverbrauch, Mobilität

Abbildung 10.19  
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV-Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Szenario.



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse
- Erdgas
- Heizöl
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- - - PV Eigenverbrauch, Mobilität

Abbildung 10.20  
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität im Effizienz-Szenario 1990 - 2070



Die Modellrechnungen zeigen, dass „Tag-Lader“ (230 V, einphasig, 10A Absicherung) einen merklichen Anteil des Jahres-Strombedarfs des Elektro-PKW über die PV-Anlage decken können. Der eigengenutzte Anteil des PV-Stroms erhöhte sich im Mittel der untersuchten Varianten um etwa 1.400 kWh/a, der Eigendeckungsanteil stieg um etwa 25%. In Mehrfamilienhäusern steht pro Elektroauto wegen der vergleichsweise kleineren verfügbaren Dachfläche nur ein geringerer PV-Stromanteil zur Ladung zur Verfügung. Dieser wurde auf 500 kWh/a pro Elektro-PKW geschätzt.

Da nur ein Teil der Ladung an den Wohngebäuden tagsüber, und damit in Zeiten mit PV-Stromerzeugung der wohngebäudeintegrierten PV-Anlagen erfolgt, ist der Anteil des Strombedarfs der „zu-Hause-Lader“, der durch PV-Strom gedeckt werden kann, nur relativ gering. Er steigt von etwa 0,2 GWh/a im Jahr 2015 auf 2 bis 10 GWh/a im Jahr 2020, 13 bis 39 GWh/a im Jahr 2030 und auf 81 bis 137 GWh/a im Jahr 2050 (Abb. 10.17). Wie Abbildung 10.18 zeigt, wird der überwiegende Anteil des Strombedarfs der Elektro-PKW aus Netzstrom in/an Wohngebäuden bzw. an Bürogebäuden oder öffentlichen Lade-stationen bezogen.

Unter den o.g. Annahmen ist der Anteil des an Wohngebäuden bezogenen PV-Stroms zur Beladung von Elektro-PKW relativ gering. Dies unterstreicht die Bedeutung einer guten öffentlichen Ladeinfrastruktur und des Ausbaus von PV-Anlagen auf den Dächern von Bürogebäuden und an anderen Arbeitsplätzen, in die die Arbeitnehmer mit dem Privat-PKW fahren.

### Gegenüberstellung der Erzeugung/Bedarfe inkl. E-Mobilität und Eigennutzung

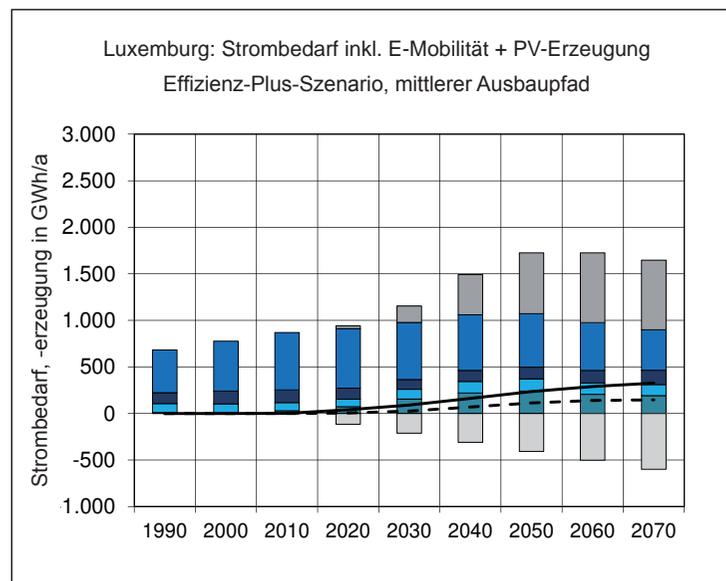
Bis hierher wurde der eigennutzbare Strom aus der PV-Erzeugung welcher für die E-Mobilität verwendet werden kann, hergeleitet. In Abbildung 10.19 erkennt man den Strombedarf im Effizienz-Szenario, also einem Szenario mit stark reduziertem Stromverbrauch und – mit negativem Vorzeichen dargestellt –

den PV-Ertrag beim 12 MWp p.a. PV-Ausbaupfad. Zusätzlich sind die Abschätzungen für den Eigennutzungsanteil des PV-Stroms aufgetragen: Die gestrichelte Linie beschreibt den Anteil, der im Gebäude für die Anwendungen Heizung, Warmwasser, Hilfs- und Haushaltsstrom, der Bereich zwischen gestrichelter und durchgezogener Linie beschreibt den Teil des PV-Stroms, der zusätzlich zur Beladung von Elektro-PKW in/an Wohngebäuden genutzt werden kann.

Es ist gut zu erkennen, dass perspektivisch im Wohngebäudepark nur ein relativ geringer Anteil des Gesamt-Strombedarfs inkl. E-Mobilität durch PV-Strom gedeckt werden, so dass auch in Zukunft der Großteil des Gesamt-Strombedarfs aus dem Netz bezogen werden muss. Dies gilt schon in der dargestellten Jahresbilanz und noch stärker in Zeiten hohen Bedarfs mit niedriger PV-Erzeugung, wie etwa an trüben Wintertagen.

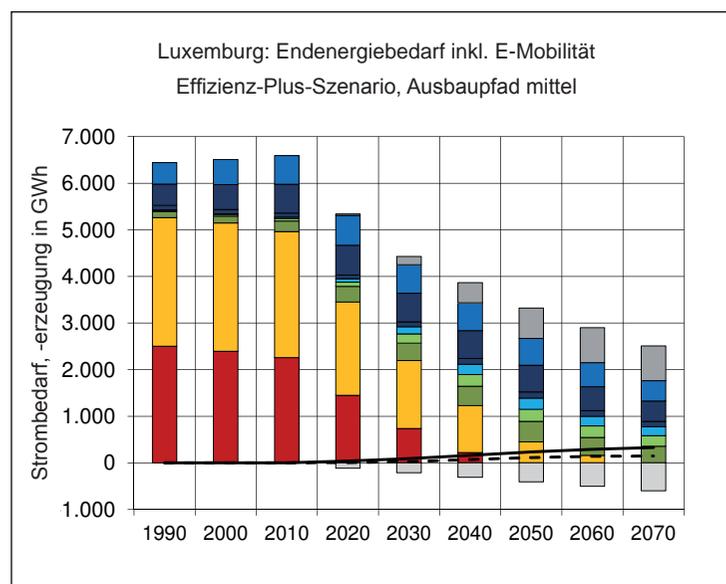
In Abbildung 10.20 ist die Stromerzeugung und der Strombedarf im Effizienz-Szenario mit dem 12 MWp p.a. PV-Ausbaupfad dargestellt, sowie der Eigenverbrauch und der gesamte Endenergiebedarf aller Energieträger. Wie zu erwarten, verringert sich der Anteil des eigengenutzten PV-Stroms nochmals, wenn er nicht nur dem Strombedarf, sondern dem Bedarf aller Energieträger gegenübergestellt wird.

Nachdem das Effizienz-Szenario aus Klimaschutzsicht nicht vollumfänglich mit den Anforderungen des 2-Grad-Ziels übereinstimmt, wurden die Kalkulationen zusätzlich für das Effizienz-Plus-Szenario durchgeführt, das gerade im Bereich der Stromnutzungen von einer viel höheren Stromeffizienz in den Wohngebäuden ausgeht (Abb. 10.21 und 10.22). Der durch PV-Erzeugung an Wohngebäuden erzielbare Anteil steigt dadurch sowohl aus Perspektive der Gesamtbilanz, als auch im Hinblick auf den eigengenutzten Anteil spürbar an. Daher ist es auch aus der Sicht der PV-Erzeugung und der Elektromobilität empfehlenswert ab etwa 2030 die Gesamtanforderungen am Niveau des Effizienz-Plus-Szenarios auszurichten.



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- - - PV Eigenverbrauch Mobilität

Abbildung 10.21  
Entwicklung des Strombedarfs der privaten Haushalte, differenziert nach Nutzungen und unter Einbeziehung der Elektromobilität. Zusätzlich sind die PV-Erzeugung, die PV- Eigennutzung (E-Mobilität) und der PV Eigenverbrauch (sämtliche Stromnutzungen) aufgetragen. Die Werte gelten für das Effizienz-Plus-Szenario.



- Haushaltsstrom
- Hilfsstrom
- Strom-direkt
- Strom - Wärmepumpen
- Fern-/Nahwärme
- Biomasse
- Erdgas
- Heizöl
- Ausbaupfad E-Mobilität, mittel
- PV Erzeugung +12MWp/a
- PV Eigennutzung, gesamt
- - - PV Eigenverbrauch, Mobilität

Abbildung 10.22  
Endenergiebedarf Wohngebäude mit Einbeziehung der PV-Erzeugung und des Strombedarfs für Elektromobilität 1990 - 2070 im Effizienz-Plus-Szenario.

Tabelle 10.2  
 Strombedarf nach Anwendungen  
 im Effizienz-Szenario und Vergleich  
 mit Erzeugung und Eigenverbrauch  
 der PV-Erzeugung gemäß dem  
 mittleren Ausbaupfad (12 MWp  
 p.a.) im Zeitraum 2000 - 2050.  
 Angabe der Werte in GWh/a.

Jahr	2000	2010	2020	2030	2040	2050
Haushaltsstrom	536	616	667	722	793	817
Hilfsstrom	139	138	143	138	149	160
Strom direktelektrisch	93	87	74	79	108	109
Strom WP	9	29	84	157	203	228
PV-Erzeugung (12 MWp p.a.)	0	2	149	310	471	632
Eigenverbrauchsanteil im Gebäude (ohne E-Mobilität)	0	1	35	64	93	122

In Tabelle 10.2 sind nun abschließend die gezeigten Ergebnisse, bezogen auf das Effizienz-Szenario nochmals detailliert als Werte in GWh/a zusammengestellt. Auch hier wird nochmals deutlich, dass ausgehend von hohen Bedarfswerten, die im Betrachtungszeitraum durch die neue Anwendungen (Kleinelektronik, Kommunikationselektronik, Heizsysteme, Elektromobilität) sogar noch ansteigen ein Ausbau der PV-Erzeugung gegenübersteht, der diesen Effekt nicht gänzlich ausgleichen kann. Das gilt umso mehr, wenn hier anstelle der gesamten PV-Erzeugung nur der durch PV abgedeckte Eigennutzungsanteil betrachtet wird.

Insofern kommt es darauf an, dass die Elektromobilität in das gesamte Energiesystem integriert wird, das künftig viel stärker auf Stromnutzungen aufbauen wird, als dies heute der Fall ist.

## 11 Literatur

- (AGEB 2017) Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. 2017. <http://www.ag-energiebilanzen.de/>.
- (C&C 2000) Meyer, Aubrey: „Contraction & Convergence. The Global Solution to Climate Change.“ Green Books für The Schumacher Society, Bristol, 2000.
- (Denkmalschutzbehörde Luxemburg) Service des sites et monuments nationaux (SSMN), Luxemburg, E-Mail vom 01.05.2016.
- (EAFO 2017 ) European alternative fuels observatory – Luxemburg: <http://www.eafo.eu/content/luxembourg>. Abruf am 14.09.2017.
- (EIV 2016 ) Ploss, Martin; Hatt, Tobias et al.: Modellvorhaben „KliNaWo“ Klimagerechter Nachhaltiger Wohnbau – Zwischenbericht Jänner 2017, Energieinstitut Vorarlberg, Dornbirn 2017.
- (EIV 2017) Energieinstitut Vorarlberg (Hrsg.): SUSI, Strom-Unabhängigkeits-Simulation. [www.energieinstitut.at](http://www.energieinstitut.at). 2017.
- (Energiekonzept 2010) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin, September 2010.
- (EurObserv'ER. 2016b). „Solar Thermal Barometer“. <https://www.eurobserv-er.org/pdf/solar-thermal-and-csp-barometer-2016-en/>. Abruf am 01.09.2017
- (European Commission 2010) European Commission: Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on energy performance of buildings; European Commission, EU, 2010.
- (European Commission 2012) European Commission: „Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supporting Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings; Official Journal of the European Union, EU, 2012.
- (EUROSTAT 2014) Eurostat: Hauptszenario-Bevölkerung am 1. Januar nach Alter und Geschlecht. 2014. [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=proj\\_13npms&lang=de](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=proj_13npms&lang=de). Abruf am: 16.09.2016.
- (ewi/prognos 2005) Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln (Hrsg.): „Energiebericht IV“, Oldenburg Industrieverlag, München, 2005.
- (ewi/gws/prognos 2014) Schlesinger, Michael et al.: „Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose“; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.); Eigenverlag, Basel, Köln, Osnabrück, 2014.
- (Ewringmann 2017) Ewringmann, D.: Ermittlung und Bewertung der positiven und negativen Wirkungen des Treibstoffverkaufs unter besonderer Berücksichtigung negativer externer Umwelt- und Gesundheitseffekte – Status quo und maßnahmeninduzierte Veränderungen; Kurzfassung; Bericht für das Ministerium für nachhaltige Entwicklung und Infrastrukturen des Großherzogtums Luxemburg. 2017.
- (Frondel et al. 2006) Frondel, Manuel et al.: „Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für das Jahr 2005“, Forschungsprojekt Nr. 15/06 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Eigenverlag, Berlin, 2006.
- (Hansen 2009) Hansen, Patrick: „Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Wohngebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale bis 2030.“, Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, Jülich, 2009.
- (Hansen 2012) Hansen, Frank „Le Luxembourg 1960 - 2010 – caractéristiques du parc automobile de 1962 a 2012“; Statec, Luxemburg, 2012. <http://www.statistiques.public.lu/catalogue-publications/luxembourg/2012/PDF-17-12.pdf>. Abruf am: 28.08.2017.
- (IWU 2003) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze“, Eigenverlag, Darmstadt, 2003.
- (IWU 2003a) Born, Rolf; Großklos, Marc und Loga, Tobias; Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie; Studie im Auftrag des Impulsprogramms Hessen“. Eigenverlag, Wiesbaden und Darmstadt, 2003.
- (IWU 2012) Institut Wohnen und Umwelt (Hrsg.): „Standardnutzungsbedingungen für LEG-Jahresverfahren“, Excel-Datei >leg-standardnutzung<, Download unter: [www.iwu.de](http://www.iwu.de). Abruf am: 05.10.2012.
- (Kah et. al 2005) Kah, Oliver; Pfluger, Rainer; Feist, Wolfgang: „Luftwechselraten in bewohnten, sehr luftdichten Gebäuden mit kontrollierter Wohnungslüftung“, IEA SHC TASK 38 / ECBCS ANNEX 38, 2995. Download unter: [www.passiv.de](http://www.passiv.de).
- (Kern 2016) Kern, Michaela: Die Konsequenzen des 2°-Ziels auf die energetischen Anforderungen an Wohngebäude, Eigenverlag, München, 2016.

(Kessler et al. 2011) Kessler, S.; Sieber, W.; Groß, A; Schedler, B; u.a.: „Schritt für Schritt zur Energieautonomie in Vorarlberg – Maßnahmenplan bis 2020 Schlussbericht“. 101 enkeltaugliche Maßnahmen. Bregenz: Vorarlberger Landesregierung. 2011.

(Kleemann et a. 2000) Kleemann, Martin; u.a.: „Die Entwicklung des Energiebedarfs zur Wärmebereitstellung in Gebäuden“, Bremer Institut (Hrsg.), Eigenverlag, Bremen, 2000.

(Klobasa et al. 2016) Klobasa, Marian; Steinbach, Jan; Pudlik, Martin: „Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und der effizienten Fernwärme und Fernkälteversorgung.“ Ministerium für Wirtschaft Luxemburg (Hrsg.), (KWK-Studie), Eigenverlag, 2016.

(Klobasa 2017) Klobasa, Marian: persönliche Mitteilung per E-Mail.

(LEG Energiepass Heizung-Warmwasser) Loga, Tobias; Imkeller-Benjes, Ullrich: „LEG-Energiepass Heizung-Warmwasser“, Eigenverlag, Darmstadt, 1997, Download unter: [www.iwu.de](http://www.iwu.de). Abruf am: 05.10.2012.

(Lichtmeß 2015) Lichtmeß, Markus: „Vereinfachte Bestimmung der Eigenstromnutzung von PV-Anlagen in einer Monatsbilanz“. EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen. Luxemburg. 2015. <http://www.enob.info/de/publikationen/publikation/details/vereinfachte-bestimmung-der-eigenstromnutzung-von-pv-anlagen/>.

(Lichtmeß 2017) Lichtmeß, Markus: Strombilanz BMW i3; Messergebnisse der Beladung an einem EFH mit PV-Anlage; persönliche Mitteilung an die Autoren, August 2017.

(Lichtmeß 2017a) M. Lichtmeß: Auswertung zur Eigenstromnutzung von PV-Strom bei Einbeziehung von Elektroautos; Goblet Lavendier et Associés, 10.08.2017, Version 2.

(MdE 2014) Ministère de l'Économie, „Dritter Nationaler Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg“, NEEAP. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/3e\\_plan\\_national\\_daction\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/3e_plan_national_daction_en.pdf). Abruf am: 27.09.2017.

(MdE 2014a) . Ministère de l'Économie (Herausgeber): „Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz für neue und bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude“; Luxemburg, April 2014.

(MdE 2017) Ministère de l'Économie, „Vierter Nationaler Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg“, NEEAP. <https://www.gouvernement.lu/7180112/vierter-nationaler-energieeffizienzaktionsplan-luxembourg.pdf>. Abruf am: 27.09.2017.

(Meinshausen et al.) Meinshausen, Malte; u.a.: „Greenhouse-gas-emission targets for limiting global warming to 2°C“, Nature, Vol. 458, 30. April 2009, doi: 10.1038/nature 08017.

(Miara et al. 2011) Miara, M.; u.a.: „Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb“, Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (Hrsg.), Eigenverlag, Freiburg, 2011.

(Nitsch et al. 2012) Nitsch, Joachim; u.a.: „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, Eigenverlag, 2012. [http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal\\_2012\\_1/leitstudie2011\\_bf.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf). Abruf am: 27.09.2017.

(Nitsch 2013) Nitsch, Joachim: „Szenario 2013 – eine Weiterentwicklung des Leitszenarios 2001“, Arbeitspapier 2013.

(Peper/ Feist 2008) Peper, Soren; Feist, Wolfgang: „Gebäudesanierung >Passivhaus im Bestand< in Ludwigshafen-Mundenheim“, Passivhaus-Institut (Hrsg.), Eigenverlag, Darmstadt, 2008.

(Peper et al. 2009) Peper, Sorgen; u.a.: „Sanierung mit Passivhauskomponenten – Messtechnische Untersuchung und Auswertung Tevesstraße Frankfurt am Main“, Passivhaus Institut (Hrsg.), Eigenverlag, Darmstadt, 2008, 2009.

(PHPP 2007) Autorenteam des Passivhausinstituts: „Passivhaus-Projektierungs-Paket“, Eigenverlag, Darmstadt, 2007, Bezug über: [www.passiv.de](http://www.passiv.de).

(PHPP) Autorenteam des Passivhausinstituts: „Passivhaus-Projektierungs-Paket“, Version 7 (2012), Eigenverlag, Darmstadt, 2012, Bezug über: [www.passiv.de](http://www.passiv.de).

(PHPP V9) Autorenteam des Passivhausinstituts: „Passivhaus-Projektierungs-Paket“, Version 9 (2015), Eigenverlag, Darmstadt, 2015, Bezug über: [www.passiv.de](http://www.passiv.de).

(Ploss 2015) Ploss, Martin; Jung, Patrick: „Strategiepapier zur energetischen Sanierung des luxemburgischen Gebäudebestands“. Interne Veröffentlichung, 2015.

(Ploss 2017): Ploss, Martin: „Kosten und Wirtschaftlichkeit von Sanierungen auf Passivhausniveau“, in: IBO (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie (Hrsg.): Passivhaus Bauteilkatalog Sanierung, Birkhäuser Verlag, 2017.

(Reiß/ Erhorn/ Ohl 2001) Reiß, J.; Erhorn, H.; Ohl, J.: „Klassifizierung des Nutzerverhaltens bei der Fensterlüftung“. HLH 52 (2001), Heft 8, S. 22-26.

(RGD 2016) Règlement grand-ducal du 23 juillet modifiant 1. Le règlement grand-ducal modifié du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments; Amtsblatt des Großherzogtums Luxemburg A-No. 146, Luxemburg 1. August 2016.

(Schön et al 2016) Schön, Michael; Reitze, Felix und Ragwitz, Mario: „Wissenschaftliche Beratung zu Fragen der Energiestrategie Luxemburgs mit besonderem Fokus auf Erneuerbare Energien: Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien 2016“. Karlsruhe: IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien und Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fh-ISI). 2016.

(Schröder et. al 2012) Schröder, Franz; u.a.: „Spezifischer Heizenergieverbrauch und Temperaturverteilungen in Mehrfamilienhäusern – Rückwirkung des Sanierungsstandes auf das Nutzerverhalten“, HLH Bd. 61 (2010), Nr. 11, S. 22-25.

(STATEC 2014) STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien): Haas, Tom; STATEC (Hrsg.): „Baseline macro-économique de long terme. PIB Emploi et Population à l'horizon 2030“. 21.07.2014.

(STATEC 2015) STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien): „A4302 Final energy consumption according to the different uses and energy forms 2000 - 2014“, 2015. <http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx>.

(STATEC 2016) (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsministerium): persönliche Mitteilung von Herrn Trauffler, E-mail vom 14.09.2016.

STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien) „B1501 Conditions de logement des ménages privés 1960-2001; Recensement de la population“, 2005. [http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=12841&IF\\_Language=eng&MainTheme=2&FldrName=1&RFPPath=70](http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=12841&IF_Language=eng&MainTheme=2&FldrName=1&RFPPath=70). Abruf am: 30.08.2017.

STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien) „B1508 Private households living in conventional dwellings by main source of heating, main type of fuel and type of ownership 2001; Census data“, 2003. [http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=12847&IF\\_Language=eng&MainTheme=2&FldrName=1&RFPPath=70](http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=12847&IF_Language=eng&MainTheme=2&FldrName=1&RFPPath=70). Abruf am: 30.08.2017.

STATEC (Nationales Institut für Statistik und Wirtschaftsstudien) RP2001 “Résultats du Recensement de la population 2011“, 2011. <http://www.statistiques.public.lu/fr/population-emploi/rp2011/index.html>. Abruf am: 30.08.2017.

(Stern et al. 2011) Stern, Michael; Jentsch, Mareike; Holzhammer, Uwe: “Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes“, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)

(Hrsg.), Internet-Publikation, [http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/sonstiges/Greenpeace\\_Energy\\_Gutachten\\_Windgas\\_Fraunhofer\\_Stern.pdf](http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/sonstiges/Greenpeace_Energy_Gutachten_Windgas_Fraunhofer_Stern.pdf). Abruf am: 10.12.2012.

(UN 2015) United Nations, Department of Economic and Social Affairs: “Population Division. World Population Prospects- the 2015 Revision” 2015. <https://esa.un.org/unpd/wpp/DataQuery/>, Abruf am 16.09.2016.

(UN Census Bureau) UN Census Bureau: <https://www.census.gov/population/international/data/idb/region.php?N=%20Results%20T=13&A=separate&RT=0&Y=2020,2025,2030,2035,2040,2045,2050&R=-1&C=LU>. Abruf am 16.09.2016.

(Vallentin 2011) Vallentin, Rainer: „Energieeffizienter Städtebau mit Passivhäusern. Begründung belastbarer Klimaschutzstandards im Wohnungsbau“, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2011.

(Vallentin 2012) Vallentin, Rainer: „Nachhaltige Energieversorgung – Lösungsansätze für den Sektor der privaten Haushalte in Deutschland bis 2050“, In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Protokollband kostengünstige Passivhäuser Nr. 46, „Nachhaltige Energieversorgung mit Passivhäusern“, Eigenverlag, Darmstadt, 2012, S. 9-98.

(VCÖ 2014) Verkehrsclub Österreich: Österreich hat im EU-Vergleich viele Autos, aber niedrige Fahrleistung; 19.05.2014, <https://www.vcoe.at/news/details/vcoe-oesterreich-hat-im-eu-vergleich-viele-autos-aber-niedrige-fahrleistung>, Abruf am: 28.08.2017.

(VCS 2017) Verkehrsclub Schweiz (VCS): Auto-Umweltliste – der Ratgeber für den umweltbewussten Autokauf; Ausgabe März 2017.

(WBGU 2009) Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: „Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz“, Eigenverlag, Berlin, 2009.



# **Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie**

## **Weiterreichende Strategieansätze und Maßnahmen**

Luxemburg, Juli 2017

## **Kontakt Daten zum Bericht**

Organisation:           Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg  
                              Ministère de l'Économie  
                              Direction générale de l'Energie

Postanschrift:           19-21, boulevard Royal, L-2449 Luxembourg

Fax:                       +352 247-84311

Der vorliegende Bericht entstand unter Mitwirkung von Architekt Dipl.-Ing. Martin Ploss sowie myenergy.

Ein besonderer Dank gilt allen am Einführungsworkshop sowie an den thematischen Workshops teilhabenden Institutionen und Personen, ohne welche dieses Dokument in der vorliegenden Form nicht hätte erarbeitet werden können.

Abkürzungsverzeichnis.....	5
Anlass, Zielsetzung, Vorgehensweise und Struktur des Dokuments.....	6
a. Anlass.....	6
b. Zielsetzung und Vorgehensweise .....	7
c. Interaktion mit der Weiterentwicklung der Förderprogramme .....	8
d. Struktur des Dokuments .....	9
1 Status Quo Analyse.....	10
1.1 Nationaler Gebäudebestand.....	10
1.2 Zusammenfassung der Status Quo Analyse.....	12
2 Leitlinien der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie.....	14
2.1 Priorität auf hocheffiziente Renovierung .....	14
2.2 Finanzierbarkeit energetischer Renovierungsmaßnahmen.....	15
2.3 Abstimmung der Ziele der Energiepolitik und des Denkmalschutzes.....	16
2.4 Berücksichtigung von Aspekten des nachhaltigen Bauens und der Kreislaufwirtschaft.....	17
3 Analyse der aktuellen Herausforderungen und Hemmnisse der energetischen Gebäuderenovierung in Luxemburg .....	18
3.1 Baukulturelle Herausforderungen .....	18
3.2 Rechtliche Hemmnisse.....	19
3.3 Hemmnisse im Bereich der Motivation der Eigentümer .....	19
3.4 Finanzielle Hemmnisse .....	21
3.5 Hemmnisse aus Sicht des Bausektors .....	22
3.6 Hemmnisse aus Sicht der Gemeinden .....	22
4 Maßnahmenkatalog zum Umgang mit den Herausforderungen und dem Abbau der aktuellen Hemmnisse .....	24
4.1 Maßnahmen zum Umgang mit baukulturellen Herausforderungen .....	24

4.2	Maßnahmen zum Abbau rechtlicher Hemmnisse .....	25
4.3	Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen im Bereich der Motivation der Eigentümer .....	26
4.4	Maßnahmen zum Abbau finanzieller Hemmnisse.....	28
4.5	Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen aus Sicht des Bausektors .....	30
4.6	Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen aus Sicht der Gemeinden .....	31
5	Perspektiven der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie .....	33
5.1	Szenarienstudie .....	33
5.2	„Forschung & Entwicklung“, Umsetzung sowie Analyse von Pilotprojekten .....	34
5.3	Auswirkungen auf den Bausektor .....	35
5.4	Überprüfung der Umsetzung durch Monitoring-programm.....	35
6	Quellen.....	37

# Abkürzungsverzeichnis

CdM	Chambre des Métiers
CNCD	Conseil National pour la Construction Durable
FdA	Fédération des Artisans
FNR	Fonds National de la Recherche
IFSB	Institut de Formation Sectoriel du Bâtiment
LIST	Luxembourg Institute of Science and Technology
MDDI	Ministère du Développement durable et des Infrastructures
MINECO	Ministère de l'Économie
MLog	Ministère du Logement
OAI	Ordre des Architectes et Ingénieurs-Conseils
SNHBM	Société Nationale des Habitations à Bon Marché
SSMN	Service des Sites et Monuments Nationaux
SYVICOL	Syndicat des Villes et Communes Luxembourgeoises
TIR	Third Industrial Revolution

# Anlass, Zielsetzung, Vorgehensweise und Struktur des Dokuments

## a. Anlass

Die EU-Kommission hat in ihrem „Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen und CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft bis 2050“ Pfade beschrieben, auf denen das EU-Ziel einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 bis 95% erreicht werden kann [1]. Angesichts des Anteils des Gebäudesektors von 41% am Gesamt-Endenergiebedarf der EU [2] kommt der Effizienzsteigerung in Gebäuden eine wichtige Bedeutung zu.

Da die Potenziale der energetischen Gebäuderenovierung in Europa bislang nur zu geringen Teilen ausgeschöpft werden, hat die EU-Kommission in der Richtlinie 2012/27/EU vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG (im Weiteren EED) festgelegt, dass die Mitgliedsstaaten langfristige Strategien erarbeiten sollen, in denen beschrieben wird, wie die Einsparpotenziale im Gebäudebestand ausgeschöpft werden können indem Investitionen in die Renovierung von privaten und öffentlichen Wohn- und Nichtwohngebäuden mobilisiert werden [3].

Die nationalen Gebäuderenovierungsstrategien sollen veröffentlicht und der EU-Kommission vorgelegt werden, sowie alle drei Jahre fortgeschrieben werden.

Im Dezember 2014 hat Luxemburg seine nationale Gebäuderenovierungsstrategie gemäß Artikel 4 EED notifiziert [4]. Diese wurde im Rahmen einer Bewertung der Europäischen Kommission als „almost fully compliant“ bezeichnet [5]. In der Bewertung wurde vor allem die detaillierte Übersicht über den Gebäudepark sowie die nationalen Informations- und Fortbildungsprogramme als Stärken gelobt.

Im Hinblick auf das bedeutende Potential zur Energieeinsparung im Gebäudebestand und dessen Stellenwert in der Luxemburger Energiepolitik wurde in der nationalen Gebäuderenovierungsstrategie im Dezember 2014 die Implementierung einer nationalen Initiative zur energetischen Renovierung angekündigt, mittels welcher gemeinsam mit den betroffenen Akteuren des Bausektors die Strategie der energetischen Renovierung für Luxemburg weiterentwickelt werden soll. Das vorliegende Dokument ist eine Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie und wurde im Rahmen der Initiative zur energetischen Renovierung ausgearbeitet. Es baut auf der nationalen Gebäuderenovierungsstrategie auf, ergänzt diese und entwickelt sie weiter.

Der Schwerpunkt des Dokuments liegt auf dem Wohnbau, wegen der Vorreiterrolle der öffentlichen Hand werden auch öffentliche Gebäude mit betrachtet.

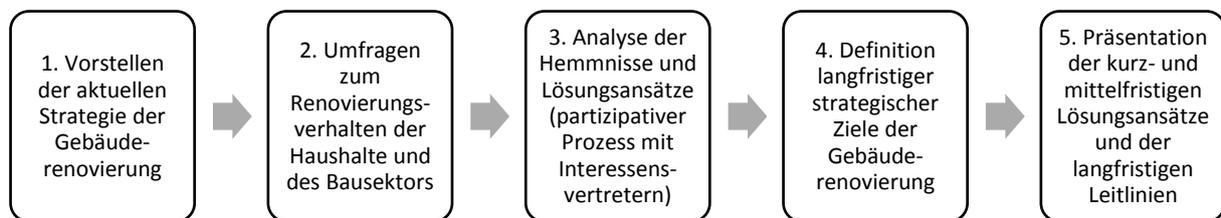
## b. Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieses Dokuments ist es

- den aktuellen Stand der zur Weiterentwicklung der nationalen Renovierungsstrategie notwendigen Informationen in einem Dokument zusammenzufassen;
- Leitlinien für weiterreichende Strategieansätze zu formulieren;
- einen Maßnahmenplan auf der Grundlage der aktuellen Hürden zu erarbeiten.

### Vorgehensweise der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie

Das Ministerium für Wirtschaft hat im Mai 2015 in Zusammenarbeit mit myenergy und Dipl.-Ing. Martin Ploss die nationale Initiative zur energetischen Renovierung gestartet, mit welcher gemeinsam mit den Akteuren aller betroffenen Sektoren die nationalen Gebäuderenovierungsstrategie weiterentwickelt werden soll. Im Rahmen der Initiative wurde wie folgt vorgegangen:



- Vorstellung der Gebäuderenovierungsstrategie in einem Einführungsworkshop mit den betroffenen Akteuren am 19. Mai 2015. Dieser ermöglichte einen ersten Austausch zwischen den eingeladenen Akteuren sowie die Vorstellung und Diskussion von Renovierungsstrategien anderer europäischer Mitgliedsstaaten und konkret umgesetzter Vorhaben. In einem Arbeitsdokument wurden Erkenntnisse und Einschätzungen zum Thema Hemmnisse und Restriktionen für die energetische Gebäuderenovierung in Luxemburg aus der Literatur und aus Gesprächen mit einzelnen Experten zusammengetragen und präsentiert [8]. Zum Vergleich wurden auch Erfahrungen aus anderen Ländern dargestellt. Die im Workshop angeregten schriftlichen Stellungnahmen wurden von myenergy in einer Synthese zusammengefasst [9].
- Durchführung zweier Befragungen Ende 2015 und Anfang 2016 im Auftrag von myenergy durch TNS ILRES [6], [7]. Befragt wurden Gebäudeeigentümer und -bewohner sowie Experten aus dem Bausektor.
- Durchführung von fünf thematischen Workshops (insgesamt 180 Teilnehmer) durch myenergy in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Martin Ploss mit dem Ziel, die aktuellen Hürden zur energetischen Renovierung systematisch zu analysieren und Lösungsansätze zusammen mit dem Planungs- und Bausektor auszuarbeiten. Die Workshops orientierten sich vom Inhalt her an der nationalen

Gebäuderenovierungsstrategie, am Arbeitsdokument [8] sowie an den zu diesen Dokumenten eingereichten Positionspapieren und wurden zwischen Oktober 2015 und Februar 2016 durchgeführt. Die Themenbereiche wurden aufgrund der Erkenntnisse aus dem Einführungsworkshop erarbeitet. In den Workshops wurden den Teilnehmern die Ergebnisse der zwei Befragungen von TNS-ILRES vorgestellt.

Durchgeführt wurden die folgenden Workshops:

- Workshop 1: „Baukulturelle Erfordernisse und Lösungsansätze“ (27.10.2015)
- Workshop 2: „Rechtliche Hemmnisse und Lösungsansätze (18.11.2015)
- Workshop 3: „Motivation der Eigentümer“ (16.12.2015)
- Workshop 4: „Finanzielle Hemmnisse“ (13.01.2016)
- Workshop 5: „Chancen für den Bausektor“ (03.02.2016)

In einem ergänzenden Workshop im Mai 2016 wurden Hemmnisse für die Gebäuderenovierung und erste Lösungsansätze mit Vertretern der Gemeinden diskutiert.

Die Ergebnisse der Workshops wurden von myenergy schriftlich zusammengefasst und sind in vollständiger Form im Anhang (siehe Anhang 1-6) zu finden.

- Die strategischen Elemente sowie die Hauptmaßnahmen aus den einzelnen thematischen Workshops wurden in Zusammenarbeit mit myenergy und Dipl.-Ing. Martin Ploss analysiert und in der Form von Leitlinien ausformuliert.
- In einem abschließenden Workshop wurden die Hauptelemente der Weiterentwicklung der nationalen Gebäuderenovierungsstrategie vorgestellt und abschließend diskutiert.

### **c. Interaktion mit der Weiterentwicklung der Förderprogramme**

Zeitgleich zur nationalen Gebäuderenovierungsstrategie wurden die staatlichen Anreizprogramme zur Finanzierung von energetischen Renovierungsmaßnahmen weiterentwickelt. Anmerkungen und Lösungsansätze, die von den Teilnehmern der partizipativen Workshops benannt wurden, konnten bereits in den Entwurf der neuen Förderprogramme ab 2017 aufgenommen werden. Im Einzelnen sind zu erwähnen die Prüfung der Genehmigungsfähigkeit von Renovierungsmaßnahmen vor Ausführung der Arbeiten sowie die Einführungen von zinsreduzierten Krediten zur Finanzierung der Durchführung einer energetischen Renovierung.

## **d. Struktur des Dokuments**

Auf der Basis der beschriebenen Ziele und Inhalte wird das Dokument wie folgt strukturiert:

- Zusammenfassung der Status Quo Analyse (Kapitel 1)
- Leitlinien der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie (Kapitel 2)
- Analyse der aktuellen Hemmnisse der energetischen Gebäuderenovierung in Luxemburg (Kapitel 3)
- Maßnahmenkatalog zum Abbau der aktuellen Hürden (Kapitel 4)
- Perspektiven der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie (Kapitel 5)

In Kapitel 1 bis 5 werden die wichtigsten Informationen komprimiert dargestellt. Wichtige Hintergrundinformationen finden sich in den Anhängen.

# 1 Status Quo Analyse

## 1.1 Nationaler Gebäudebestand

Als Instrument zur Analyse des energetischen Zustandes regionaler oder nationaler Gebäudebestände haben sich Gebäudetypologien bewährt. Diese beschreiben den Gebäudebestand differenziert nach Alters- und Größenklassen (Mengengefüge). Die energetische Qualität wird zumeist durch Gebäude dargestellt, die bezüglich ihrer Geometrie, Konstruktion und Wärmeversorgung repräsentativ für eine Alters- und Größenklasse sind.

Die wichtigsten Ergebnisse des Arbeitsberichts [8] zum nationalen Gebäudebestand sind nachfolgend zusammengestellt:

absolute Zahlen						
	EFH	DH	RH	MFH	Andere / Ohne Angabe	Gesamt pro Altersklasse
	Anzahl WE	Anzahl WE				
vor 1919	4.267	4.363	4.787	5.066	1.990	20.473
1919 - 1945	2.849	5.321	7.996	7.601	903	24.670
1946 - 1960	4.003	5.278	5.165	8.481	577	23.504
1961 - 1970	4.712	3.378	2.255	7.908	319	18.572
1971 - 1980	8.484	3.717	1.934	9.683	272	24.090
1981 - 1990	8.427	2.695	1.197	6.757	216	19.292
1991 - 2000	8.899	3.034	1.266	13.584	287	27.070
2001 - 2010	5.575	4.114	1.758	16.876	376	28.699
Ohne Angabe	3.085	2.599	2.584	12.220	1.101	21.589
Gesamt pro Typ	50.301	34.499	28.942	88.176	6.041	207.959

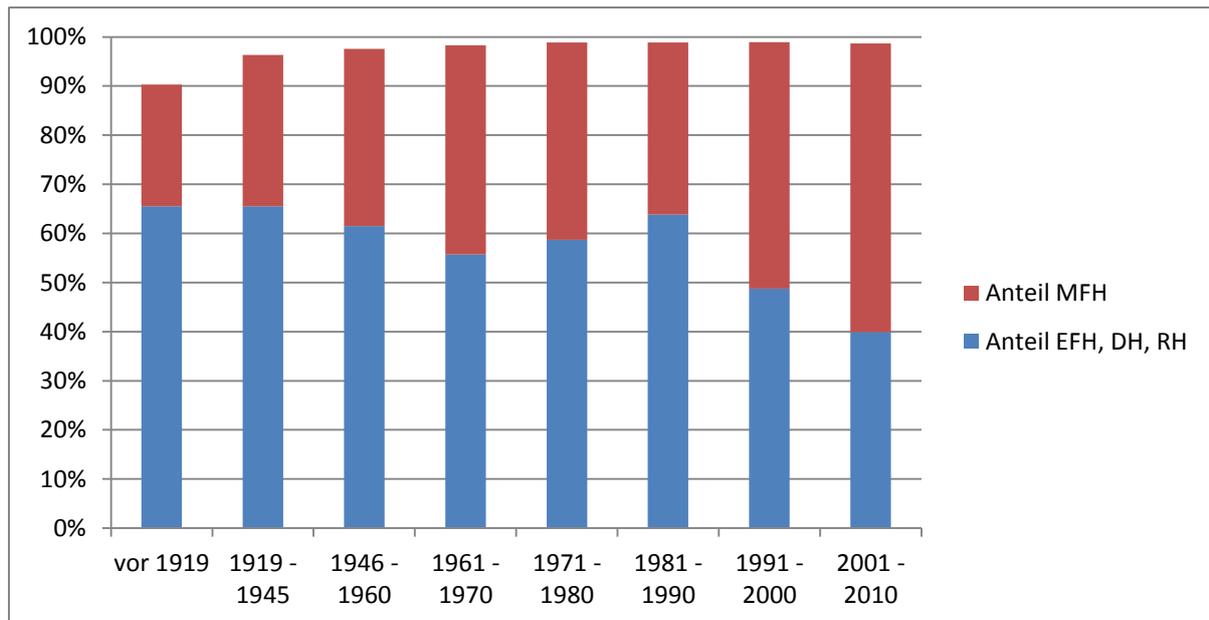
**Abbildung 1: Anzahl der Wohneinheiten nach Baualters- und Größenklassen. Datenaufbereitung myenergy auf der Basis amtlicher Statistiken [8]**

Der Wohngebäudebestand Luxemburgs umfasste im Jahr 2011 207.959 Wohneinheiten, davon 88.176 in Mehrfamilienhäusern und 113.742 in Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern.

prozentuale Anteile						
	EFH	DH	RH	MFH	Andere / Ohne Angabe	Gesamt pro Altersklasse
vor 1919	2,1%	2,1%	2,3%	2,4%	1,0%	9,8%
1919 - 1945	1,4%	2,6%	3,8%	3,7%	0,4%	11,9%
1946 - 1960	1,9%	2,5%	2,5%	4,1%	0,3%	11,3%
1961 - 1970	2,3%	1,6%	1,1%	3,8%	0,2%	8,9%
1971 - 1980	4,1%	1,8%	0,9%	4,7%	0,1%	11,6%
1981 - 1990	4,1%	1,3%	0,6%	3,2%	0,1%	9,3%
1991 - 2000	4,3%	1,5%	0,6%	6,5%	0,1%	13,0%
2001 - 2010	2,7%	2,0%	0,8%	8,1%	0,2%	13,8%
Ohne Angabe	1,5%	1,2%	1,2%	5,9%	0,5%	10,4%
Gesamt pro Typ	24,2%	16,6%	13,9%	42,4%	2,9%	100,0%

**Abbildung 2: Prozentuale Anteile der Wohneinheiten verschiedener Baualters- und Größenklassen. Datenaufbereitung myenergy auf der Basis amtlicher Statistiken [8]**

Der Anteil der Wohnungen in Mehrfamilienhäusern beträgt über alle Altersklassen 42,4%.



**Abbildung 3: Prozentuale Anteile der Wohneinheiten in Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern sowie Mehrfamilienhäusern in den verschiedenen Altersklassen. Datenaufbereitung myenergy auf der Basis amtlicher Statistiken [8]**

Der Anteil der Wohnungen in Mehrfamilienhäusern steigt kontinuierlich an während der Anteil der EFH, DH und RH sinkt. Lag der Anteil der EFH, DH und RH bis 1990 zwischen 55 und 65%, so ist er seit 1990 auf unter 40% gesunken.

Der größte Teil der Wohneinheiten liegt in Gebäuden mit 4 bis 10 Wohneinheiten, nur ein kleiner Teil in Gebäuden mit bis zu drei Wohneinheiten.

### Zusammenfassung Gebäudebestand

Die wichtigsten Ergebnisse der Analyse des Gebäudebestandes im Hinblick auf die energetische Renovierung sind:

- Der Wohngebäudebestand Luxemburgs ist im Vergleich zu dem Österreichs und Deutschlands im Durchschnitt jünger.
- Der Anteil national und kommunal denkmalgeschützter Gebäude ist noch eher klein, dürfte aber in den nächsten Jahren ansteigen.
- Die Abrissrate ist relativ hoch [11].
- Angesichts der obengenannten Fakten und der prognostizierten, weiterhin stark steigenden Bevölkerungszahlen, wird in Luxemburg dem Neubau eine höhere Bedeutung bei den Bemühungen zur Reduktion des Energieverbrauchs sowie zur Begrenzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudesektors zukommen als in anderen EU-Staaten.
- Der Anteil der Wohneinheiten in Einfamilien-, Doppel- und Reihenhäusern liegt vergleichsweise hoch.
- Der Anteil an eigengenutzten Wohneinheiten liegt vergleichsweise hoch, der von Mietwohnungen niedrig.

- Der Anteil des sozialen Wohnbaus ist mit ca. 3,6% im Vergleich zu den Nachbarländern als gering anzusehen.
- Der Anteil von Mehrfamilienhäusern im Besitz von Eigentümergemeinschaften ist hoch.
- Die durchschnittliche Wohnfläche aller Wohneinheiten ist mit 129 m<sup>2</sup> im Vergleich zu den Nachbarländern groß.
- Die durchschnittliche Wohnfläche der Einfamilienhäuser ist mit 175 m<sup>2</sup> im Mittel aller Altersklassen sehr hoch und ist in der letzten Dekade auf über 200 m<sup>2</sup> gestiegen.
- Die durchschnittliche Bewohneranzahl pro Wohneinheit liegt bei 2,46 und sinkt weiter.
- Der Anteil an Ein- und Zweipersonenhaushalten liegt bei mehr als 60% und steigt.
- Die durchschnittliche pro-Kopf-Wohnfläche liegt mit 52,4 m<sup>2</sup> im internationalen Vergleich hoch.
- Der Energieträgermix zur Beheizung des Luxemburger Wohngebäudebestandes ist sehr stark von fossilen Energieträgern dominiert.

Zusätzliche, detailliertere Informationen zum Mengengefüge des Gebäudebestandes finden sich im Arbeitsdokument [8].

## 1.2 Zusammenfassung der Status Quo Analyse

Neben dem Luxemburger Gebäudebestand wurden im Arbeitsdokument [8] weitere Aspekte des Status Quo der energetischen Gebäuderenovierung analysiert. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zahlreiche Projekte zeigen, dass sowohl für Gebäude ohne als auch für Gebäude mit Denkmalschutzanforderungen in der Praxis sehr große Energieeinsparungen erzielt werden können.
- Wissenschaftliche Studien zeigen, dass energetische Renovierungen bei kompetenter Planung und Ausführung wichtige nicht-energetische Vorteile bieten, etwa ein deutlich geringeres Risiko an Feuchte- und Schimmelschäden. [16]
- Weitere nicht energetische Vorteile der energetischen Renovierung sind die Schaffung zusätzlicher Arbeitsplätze in der Baubranche und die deutliche Reduktion der Energie-Importabhängigkeit.
- Die Luxemburger Kostenoptimalitätsstudie [12] zeigt, dass das Kostenoptimum der energetischen Renovierung schon heute und ohne Förderung bei einer effizienteren Energieklasse liegt, als in den nationalen Mindestanforderungen festgelegt, was einen gewissen Spielraum für eine Verschärfung der Mindestanforderungen an die Effizienz von Renovierungen eröffnet.

- Die Gesamtkosten für Investition, Wartung und Energie in 30 Jahren sind bei Gebäuden der Effizienzklasse A so gering, dass sie durch mäßige Förderungen kompensiert werden können.
- Da die Renovierungsraten in Luxemburg bislang noch gering sind, bestehen noch hohe Einsparpotenziale; bislang sind "Lock-in-Effekt" durch suboptimal sanierte Gebäude nur in geringem Maße vorhanden<sup>1</sup>.
- Die Anzahl der zum Thema Energieeffizienz weitergebildeten Fachleute ist im europäischen Vergleich hoch.
- Die Inanspruchnahme der Förderprogramme ist bislang relativ gering (35% derjenigen, die Maßnahmen durchgeführt haben, kennen das Programm nicht).
- Die statistischen Auswertungen zu Quantität und Qualität der energetischen Renovierungen sind in Ausarbeitung; bislang sind sehr wenig energetisch hochwertige Renovierungen dokumentiert.

Da die Anzahl der energetischen Gebäuderenovierungen in Luxemburg trotz sehr guter Weiterbildungsangebote und bestehender Förderprogramme als eher gering einzuschätzen ist und bislang nur sehr wenige umfassende Renovierungen, also Renovierungen in höchster energetischer Qualität, bekannt sind, werden nachfolgend Hemmnisse und Restriktionen analysiert.

---

<sup>1</sup> Unter Lock-in-Effekt versteht man in Bezug auf energetische Gebäudesanierungen, dass der im Rahmen einer Renovierung festgelegte Energiestandard auf lange Zeit fixiert wird: entschließt sich ein Bauherr, eine Außenwand mit nur 8 cm Außendämmung zu versehen, so wird er eine weitere Renovierung dieser Wand erst in etwa 50 Jahren durchführen, wenn etwa der Putz auf dem Wärmedämmverbundsystem bröckelt. Bis zum Zeitpunkt dieser zweiten Renovierung ist das viel größere Einsparpotenzial der Außenwanddämmung (wirtschaftlich wären Dämmstoffdicken zwischen etwa 18 und 24 cm) nicht umsetzbar, sozusagen „eingeschlossen“ (Lock-in).

## 2 Leitlinien der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie

Im Anschluss an die Workshops hat das Ministerium für Wirtschaft in Zusammenarbeit mit myenergy und Dipl.-Ing. Martin Ploss langfristige Leitlinien für die Weiterentwicklung der Renovierungsstrategie ausgearbeitet, dies auf der Grundlage der Ergebnisse der Status Quo Analyse, der TNS-ILRES Umfragen und der Ergebnisse der Workshops. Dabei sind auch Erkenntnisse aus anderen, parallel ablaufenden Prozessen wie der Weiterentwicklung der Förderprogramme eingeflossen. Zur Umsetzung dieser Leitlinien ist die Zuständigkeitsfrage zu beachten, die sich in diesem Fall auf mehrere Ministerien verteilt. Die Leitlinien dienen, was die Arbeit auf der Ebene der Regierung angeht, als Gestaltungsrahmen der notwendigen interministeriellen Zusammenarbeit. Die Leitlinien stellen ebenfalls den Gestaltungsrahmen für die Zusammenarbeit mit den betroffenen Akteuren dar.

Die Leitlinien gestalten sich wie folgt:

1. Priorität auf hocheffiziente Renovierung;
2. Finanzierbarkeit energetischer Renovierungsmaßnahmen;
3. Abstimmung der Ziele der Energiepolitik und des Denkmalschutzes;
4. Berücksichtigung von Aspekten des nachhaltigen Bauens und der Kreislaufwirtschaft.

Die Leitlinien beschreiben die langfristige Ausrichtung der Gebäuderenovierungsstrategie über den Zeithorizont 2020 hinaus und versuchen einen Umsetzungsrahmen für die jeweils zuständigen bzw. einzubindenden Akteure vorzugeben. Die Leitlinien sollen durch eine verstärkte Kommunikation dem Bau- und Immobiliensektor vermittelt werden. myenergy passt seine Beratungsangebote sowie seine Aktivitäten als Fazilitator an die Inhalte der Leitlinien an und trägt so zur Verbreitung und Umsetzung der Leitlinien bei.

Im Rahmen der Umsetzung der Leitlinien soll myenergy beispielsweise Arbeitstreffen koordinieren, Diskussions- und Entscheidungsgrundlagen (z.B. Umfragen, Studien, Statistiken, Analysen, Diskussionspapiere) für die betroffenen Ministerien erstellen und Schnittstellenarbeit mit dem Planungs- und Bausektor übernehmen.

Die in Kapitel 4 vorgestellten Maßnahmen aus den Workshops fügen sich in den Rahmen dieser Leitlinien ein, stellen jedoch vorrangig Antworten auf aktuelle Hürden dar.

### 2.1 Priorität auf hocheffiziente Renovierung

Laut der EED wird „umfassende Renovierung“ folgendermaßen definiert: *„[...] kostenwirksame größere Renovierungen [...], die eine Modernisierung bewirken, in deren Folge sowohl der Verbrauch an gelieferter Energie als auch der Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes im Vergleich zum Verbrauch vor der Renovierungsmaßnahme erheblich abnimmt und infolgedessen eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz erreicht wird.“* Aufgrund

der Ergebnisse der Workshops sowie der TNS ILRES Umfragen wurde die Zielstellung der „umfassenden Renovierung“ für den luxemburgischen Kontext im Hinblick auf den sogenannten „Lock-in-Effekt“ weiter spezifiziert.

Demnach wird die Steigerung der Effizienz von energetischen Renovierungen gegenüber der Steigerung der Anzahl an mit geringen Dämmstärken renovierten Wohngebäude zukünftig als prioritär gesehen. Die Effizienzsteigerung soll durch eine hocheffiziente Dämmung sowohl der einzelnen Maßnahmen als auch im Rahmen von Gesamtrenovierungen erreicht werden. Energetische Renovierungen mit geringen Dämmstärken sind in wirtschaftlicher und energetischer Hinsicht nachteilig: sie sind vergleichsweise teuer und erzielen geringe Einspareffekte.

Das Einsparpotential eines Gebäudes wird durch eine Renovierung geringer Qualität nicht ausgeschöpft und darüber hinaus auf die Dauer des Erneuerungszyklus (30-50 Jahre) blockiert. Der „Lock-in-Effekt“ ist kontraproduktiv, da er langfristig die Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebestand behindert.

Darüber hinaus sind hocheffiziente Renovierungen für den Eigentümer die kostenoptimale Lösung. Die luxemburgische Kostenoptimalitätsstudie zeigt, dass die Gesamtkosten (also die Kosten für Investition, Wartung und Energie) von Renovierungen für Gebäude der Effizienzklassen A bis E fast gleichhoch sind. Hocheffiziente Renovierungen der Klassen A und B können schon mit relativ geringen Förderanreizen wirtschaftlich durchgeführt werden. Wie Wirtschaftlichkeitsanalysen zur energetischen Gebäuderenovierung zeigen, sind energetische Renovierungsmaßnahmen besonders dann wirtschaftlich, wenn sie mit ohnehin anstehenden sonstigen Renovierungsmaßnahmen (Putzerneuerung, ohnehin notwendiger Fensteraustausch...) kombiniert werden.

Für die Umsetzung dieser Leitlinie ist eine regelmäßige Auswertung der Förderprogramme und der geplanten neuen Investitionshilfen erforderlich, um diese weiterentwickeln zu können.

## **2.2 Finanzierbarkeit energetischer Renovierungsmaßnahmen**

Aus den Workshops und der Status Quo-Analyse geht hervor, dass das größte Hemmnis für hocheffiziente Renovierungen deren Kosten darstellen.

Die Verbesserung der Finanzierbarkeit von energetischen Renovierungsmaßnahmen verfolgt zwei Ziele: einerseits soll die Anzahl an hocheffizienten Renovierungen erhöht werden, andererseits soll der Entwicklung einer energetischen „Segregation“ sowie dem Verschuldungsrisiko entgegen gewirkt werden, wonach sich einkommensschwache Haushalte hocheffiziente energetische Renovierungen nicht leisten können.

Die Luxemburger Regierung hat bereits erste Schritte zur Verbesserung der Finanzierbarkeit von Renovierungsmaßnahmen eingeleitet. Die für 2017 angekündigte Klimabank stellt den

Hauseigentümern ein Mittel zur Vorfinanzierung energetischer Renovierungsvorhaben zur Verfügung. Vor allem einkommensschwache Haushalte werden mit dem „*Klimaprêt à taux zéro*“ von einem effizienten Mittel für energetische Renovierungsvorhaben profitieren können. Gleichzeitig wird das bestehende Förderprogramm PRIME House verstärkt hocheffiziente Renovierungen fördern. Darüber hinaus werden Aspekte des nachhaltigen Bauens sowie der Kreislaufwirtschaft in das Förderprogramm aufgenommen.

Neben staatlichen Finanzhilfen spielt die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Renovierungsmaßnahmen eine wichtige Rolle. Hocheffiziente Renovierungen sind kostenoptimal und daher über den gesamten Nutzungszeitraum rentabel. Aber auch die Kopplung der Arbeiten an ohnehin notwendige Instandhaltungsarbeiten spielt bei der Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Arbeiten eine wichtige Rolle.

Kostensenkungen von Renovierungsmaßnahmen verbessern deren Wirtschaftlichkeit nachhaltig. In Zusammenarbeit mit dem Bausektor könnten Standardlösungen für die häufigsten Maßnahmen ausgearbeitet werden, um die Renovierungsarbeiten rationaler und damit günstiger zu gestalten.

Zur stetigen Verbesserung der Förderprogramme und Finanzhilfen soll ein Monitoring durchgeführt werden, so dass die zur Verfügung stehenden Finanzmittel effektiv eingesetzt werden.

### **2.3 Abstimmung der Ziele der Energiepolitik und des Denkmalschutzes**

Gerade in einem Land mit schnell wachsender Bevölkerung und hohen Neubau- und Abrissraten wie Luxemburg spielt die Bewahrung des baukulturellen Erbes eine große Rolle.

Während des Weiterentwicklungsprozesses der Gebäuderenovierungsstrategie wurde hingegen der Bedarf identifiziert, die Ziele der Energiepolitik und des Denkmalschutzes besser miteinander abzustimmen. Einerseits ist die Luxemburger Regierung durch eine EU-Richtlinie dazu verpflichtet, die Gebäuderenovierungsstrategie und die darin gesetzten Ziele flächendeckend umzusetzen. Andererseits fördert der Schutz des baukulturellen Erbes den Erhalt einer kulturellen Identität, deren Zerstörung gesellschaftlich als problematisch angesehen werden könnte und sich somit zu einer nicht zu vernachlässigenden Herausforderung bei der Umsetzung der Gebäuderenovierungsstrategie entwickeln könnte.

Bezüglich einer Annäherung in der Verfolgung dieser beiden Zielstellungen wurden im Rahmen der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie Punkte identifiziert, bei denen prioritär weiterer Abstimmungsbedarf besteht.

Die Abstimmung beider Ziele anhand von gemeinsamen Richtlinien betreffend denkmalgerechter energetischer Renovierungen soll vor allem eine bessere Koordination auf

staatlicher Ebene ermöglichen. Vorhandene Einsparpotenziale bei der Renovierung baukulturell wertvoller und denkmalgeschützter Gebäude sollten auch in der Zukunft weiterhin projektspezifisch ermittelt und – wo gestalterisch und wirtschaftlich umsetzbar – ausgeschöpft werden.

## **2.4 Berücksichtigung von Aspekten des nachhaltigen Bauens und der Kreislaufwirtschaft**

Einer der Kritikpunkte an der energetischen Gebäuderenovierung ist die Tatsache, dass bislang meist nur deren Auswirkung auf den Betriebsenergiebedarf bewertet wurde und andere Aspekte wie Herstellungsenergieaufwand und Umweltauswirkungen der eingesetzten Dämmstoffe unberücksichtigt bleiben. Da in den vergangenen Jahren wissenschaftlich fundierte und gut anwendbare Methoden zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung entwickelt wurden, sollten diese zukünftig verstärkt zur Bewertung von (energetischen) Renovierungsmaßnahmen eingesetzt werden.

Somit sollen Renovierungsmaßnahmen ganzheitlicher und damit ressourcenschonender verstanden und in der Folge nachhaltiger gestaltet werden. Dies soll sowohl für den energieeffizienten Wohnungsneubau als auch für Renovierungsmaßnahmen im Bestand gelten. Hierbei soll ein besonderes Augenmerk auf die Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen sowie die Wiederverwertung von Baumaterialien gelegt werden. Die kommende LENOZ-Zertifizierung sowie die Neuauflage des Förderprogramms PRIME House stellen bereits einen ersten Schritt in diese Richtung dar. Neben anderen Nachhaltigkeitsaspekten wird die Demontierbarkeit von Baumaterialien als Voraussetzung der Kreislaufwirtschaft zukünftig gefördert.

Daneben finden vor allem in Bezug auf die Kreislaufwirtschaft mit der TIR-Studie („Third Industrial Revolution Study“) sowie den Aktivitäten des CNCD und des EcoInnovation-Clusters bereits parallel laufende Prozesse und Entwicklungen in Luxemburg statt. Im Rahmen dieser Leitlinie soll besonders auf diese Prozesse verwiesen werden, in deren Rahmen die (energetische) Gebäuderenovierung als wichtiges Applikationsfeld identifiziert wurde. Für die Umsetzung der Leitlinie sollen die in diesen Prozessen ausgearbeiteten Schlussfolgerungen und Empfehlungen für den Kontext der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie analysiert als Umsetzungsmaßnahmen in die Gebäuderenovierungsstrategie mit aufgenommen werden.

### **3 Analyse der aktuellen Herausforderungen und Hemmnisse der energetischen Gebäuderenovierung in Luxemburg**

Die derzeitigen Herausforderungen, Hemmnisse und Restriktionen der energetischen Gebäuderenovierung wurden zunächst im Arbeitsdokument [8] analysiert und im Einführungsworkshop vom 19.05.2015 vorgestellt und diskutiert. In den fünf themenspezifischen Workshops wurde die Analyse vertieft, als weitere Quelle wurden die Ergebnisse der Befragungen von TNS-ILRES [6], [7] genutzt. Die Ergebnisse der Analyse der Hemmnisse und Restriktionen sind nachfolgend entsprechend der Themen der Workshops zusammengefasst. Die in den Workshops erarbeiteten Lösungsansätze wurden als Grundlage für den Maßnahmenplan (Kapitel 4) genutzt und sind dort zusammengefasst.

#### **3.1 Baukulturelle Herausforderungen**

Die wichtigsten Herausforderungen bei der energetischen Gebäuderenovierung denkmalgeschützter Gebäude lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Mangelnde Abstimmung zwischen den Anforderungen der Energieeffizienz und des Denkmalschutzes:
  - Die Anforderungen und Förderprogramme der zuständigen Behörden für die Energieeffizienz und den Denkmalschutz sind nicht genügend aufeinander abgestimmt.
  - Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Spezialisten für Denkmalschutz und für Energie ist noch nicht im Planungsalltag etabliert. Eine systematische Abstimmung der Renovierungsmöglichkeiten für die unterschiedlichen historischen Bauweisen besteht zurzeit nicht.
2. Fehlendes Beratungsangebot betreffend denkmalgerechter energetischer Renovierung für Eigentümer denkmalgeschützter Gebäude:
  - Der Eigentümer muss zwischen unterschiedlichen Kontaktstellen versuchen, die Abstimmung zwischen den unterschiedlichen Anforderungen für sein denkmalgeschütztes Gebäude herzustellen.
  - Bauherren sind bislang nicht ausreichend über die Möglichkeiten der energetischen Renovierung denkmalgeschützter Gebäude informiert.
  - Der administrative Aufwand zur Projektabwicklung ist groß und eine einzige Kontaktstelle, die alle Kompetenzen bündelt ist nicht vorhanden.
3. Fehlendes, spezifisches Anreizprogramm für denkmalgerechte energetische Renovierungen.

#### 4. Fehlende fachspezifische Kenntnisse in Planung und Ausführung:

- Planungs- und Ausführungs-Know-how haben eine zentrale Bedeutung bei der Renovierung denkmalgeschützter Gebäude. Das Know-how ist bislang weder im Bereich der Planung, noch im Bereich der Ausführung im notwendigen Umfang vorhanden.

### **3.2 Rechtliche Hemmnisse**

Die wichtigsten rechtlichen Hemmnisse für die energetische Gebäuderenovierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Fehlende Regelungen zur Rücklagenbildung für Renovierungen bei Eigentümergemeinschaften und Hausbesitzern.
2. Bestehende Regelung zur Entscheidungsfindung in Eigentümergemeinschaften:
  - Die Prozeduren für die Entscheidungsfindung für eine Gebäuderenovierung in Eigentümergemeinschaften sind komplex und können hemmend wirken.
3. Fehlende Harmonisierung der kommunalen Bauvorschriften:
  - Mangelnde Flexibilität durch Bauvorschriften (z.B. Ebene PAP „quartiers existants“ bzw. „Règlement sur les bâtisses“) bei nachträglicher Dämmung.
4. Mangelnde Attraktivität des bestehenden Förderprogramms:
  - Fehlende finanzielle Planungssicherheit, da Beantragung und Bewilligung der Fördermittel erst nach Abschluss der Renovierungsarbeiten erfolgen.
  - Lange Bearbeitungszeiten der Förderanträge.
  - Komplexe Förderanträge mit umfangreicher Dokumentierung der Nachweise.

### **3.3 Hemmnisse im Bereich der Motivation der Eigentümer**

Die wichtigsten Hemmnisse für die energetische Gebäuderenovierung im Bereich der Motivation der Eigentümer lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Hohe Investitionskosten:
  - Der wichtigste Faktor und damit das potentiell größte Hemmnis für die Entscheidungsfindung beim Eigentümer für eine Gebäuderenovierung sind die Kosten.

- Es sind auch im Wesentlichen die Kosten, die die Eigentümer davon abhalten, eine umfassende Renovierung durchzuführen oder mehrere Maßnahmen im gleichen Zeitraum umzusetzen.
2. Geringes Bewusstsein für die Notwendigkeit von energetischer Renovierung und mangelnde Wertschätzung:
    - Einer Mehrheit der Eigentümer (62%) ist ein guter energetischer Standard ihrer Immobilie nicht wichtig und sie sehen daher keine Notwendigkeit für eine energetische Renovierung. (Geringe Wertschätzung einer energetischen Renovierung).
  3. Administrative Hürden und mangelnde Attraktivität des bestehenden Förderprogramms:
    - Die Rahmenbedingungen der Förderprogramme im Rahmen des Wohnungsbaus (Entscheidungskriterien und Verwaltungsprozesse) werden von den betroffenen Immobilieneigentümern als zu komplex empfunden.
  4. Mangelnder Bekanntheitsgrad der staatliche Förderprogramme und Beratungsangebote:
    - Die staatliche Förderprogramme und Beratungsangebote sind vielen Immobilienbesitzern nicht bekannt und werden daher nur in geringem Maße in Anspruch genommen.
  5. Niedriger Bekanntheitsgrad der myenergy-Beratung:
    - Ein großer Anteil der Haushalte fühlt sich nicht gut über die Möglichkeiten einer energetischen Gebäuderenovierung informiert und kann den eigenen Bedarf an Renovierungsarbeiten nicht gut einschätzen.

Motivation und Hemmnisse eine energetische Renovierung durchzuführen variieren je nach Ausgangssituation der Eigentümer. Im Workshop „Motivation der Eigentümer“ wurden anhand der Ausgangssituation unterschiedliche „Renovierungstypen“ analysiert. Die Typisierung ermöglicht es zukünftig zielgruppen-spezifische Lösungsansätze und Kommunikationsstrategien zu entwickeln. Als Hauptgruppen der „Renovierungstypen“ wurden identifiziert:

- „Hauskäufer und Erben“, können energetische Maßnahmen an andere Renovierungsmaßnahmen koppeln und so hohe Einsparungen und die beste Wirtschaftlichkeit erreichen.
- „Heimwerker“ sind oftmals sehr motiviert eine Gebäuderenovierung durchzuführen. Sie nutzen jedoch kaum öffentliche Beratungsstellen und schöpfen das Einsparpotential ihrer Immobilien im Rahmen von Renovierungsarbeiten meist nicht aus. Bei entsprechender Beratung können energetische Aspekte stärker berücksichtigt werden.

- „Einkommensschwache Haushalte“ können aus der Perspektive der „Energiearmut“ bei steigenden Energiepreisen besondere Vorteile aus der Gebäuderenovierung ziehen, besitzen aber nicht die finanziellen Mittel für die Gebäuderenovierung.

### 3.4 Finanzielle Hemmnisse

Die wichtigsten finanziellen Hemmnisse für die energetische Gebäuderenovierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

#### 1. Hohe Investitionskosten:

- Der wichtigste Faktor für die Entscheidung zu einer umfassenden Gebäuderenovierung sowie zur Durchführung einzelner Renovierungsmaßnahmen sind die Kosten.
- Die Hürden für die Durchführung einer umfassenden Gebäuderenovierung sind noch höher als bei einzelnen Renovierungsmaßnahmen.

#### 2. Rentabilität von energetischen Renovierungen:

- Die Rentabilität von energetischen Renovierungen wird durch die relativ niedrigen Energiepreise verringert. Das in Luxemburg relativ hohe Durchschnittseinkommen bei relativ niedrigen Energiepreisen kann den Anreiz für die energetische Gebäuderenovierung erheblich reduzieren.
- Die Eigentümer haben den Eindruck, dass die energetische Gebäuderenovierung eine schlechte Wirtschaftlichkeit aufweist.

#### 3. Eigentümer-Nutzer-Dilemma:

- Vermieter haben keine direkte Motivation für die Durchführung von energetischen Gebäuderenovierungen, da die Einsparungen lediglich den Mietern zukommen.
- Mieter haben oft Bedenken gegenüber von Renovierungen, da der Eindruck besteht, dass diese mit einer Mietkostenerhöhung verbunden sein könnten. Dies trifft besonders auf einkommensschwache Haushalte zu, welche nur einen kleinen finanziellen Spielraum haben.

#### 4. Fehlende Rücklagenbildung:

- Die Eigentümer von Wohnungen und Gebäuden haben zumeist ein Problem fehlender Rücklagen an Eigenkapital zur Durchführung einer energetischen Gebäuderenovierung. Sie können somit die entstehenden Kosten nicht ohne Kredite decken, sind jedoch nicht bereit, Kredite oder zu hohe Kredite aufzunehmen. Es ist den Eigentümergemeinschaften überlassen ob Rücklagen gebildet werden, da kein gesetzlicher Rahmen besteht.

5. Spezifische Situation von einkommensschwachen Haushalten

### **3.5 Hemmnisse aus Sicht des Bausektors**

Der Bausektor bestätigt aus seiner Sicht die Motivations-Hemmnisse 1 - 4 (siehe S.20 und 21) sowie die baukulturellen Hemmnisse 1 und 4 (siehe S.19 und 20):

- Hohe Investitionskosten
- Geringes Bewusstsein für die Notwendigkeit von energetischen Renovierungen
- Administrative Hürden und mangelnde Attraktivität des aktuellen Förderprogramms PRIME House (Version 2012)
- Mangelnder Bekanntheitsgrad des aktuellen Förderprogramms und der staatlichen Beratungsangebote

Darüber hinaus wurden bezüglich des Bausektors folgende Hemmnisse identifiziert:

1. Mangelnde Qualifizierung im Bereich der energetischen Renovierung:

- Viele Akteure aus dem Bausektor sind der Meinung, dass die luxemburgischen Handwerker nicht ausreichend ausgebildet sind.

2. Fehlende Kenntnis der Kundenbedürfnisse sowie kundenspezifischer Angebote:

- Die Experten neigen dazu, die wahren Gründe der Eigentümer (Bsp. Renovierungsbedarf, Komplexität der Arbeiten, Mangelndes Vertrauen in Bausektor) zu unterschätzen und können daher ihre Leistungen nicht spezifisch genug an ihre Kunden anpassen bzw. kommunizieren.
- Des Weiteren bevorzugen Kunden Komplettlösungen.

### **3.6 Hemmnisse aus Sicht der Gemeinden**

Im Gemeineworkshop wurden folgende Hemmnisse bestätigt:

- Fehlende Harmonisierung der kommunalen Bauvorschriften
- Mangelnde Abstimmung zwischen den Anforderungen der Energieeffizienz und der des Denkmalschutzes

Darüber hinaus wurden folgende neue Hemmnisse bzw. Lösungspisten identifiziert:

1. Teilweise bestehen Unsicherheiten bezüglich der Vorschriften und Vorgaben, welche in PAGs festgelegt werden können (Bsp. Festlegen von Materialqualität)
2. Mangelnde Flexibilität durch Bauvorschriften (z.B. Ebene PAP „quartiers existants“ bzw. „Règlement sur les bâtisses“) bei nachträglicher Dämmung

3. Da ein Förderantrag für Mittel aus dem Umweltschutzfonds (FPE) bereits vor Projektbeginn eingereicht werden muss, empfinden viele Gemeinden die Prozeduren bei Renovierungen im Rahmen der Förderung als zu umständlich
4. Komplexität bzw. Verständlichkeit der Vorschriften für den Bürger sowie Unkenntnis der kommunalen Prozeduren
5. Fehlende Informationen über Energieverbräuche von Gemeindebauten
6. Unsicherheiten in Bezug auf die Zuständigkeiten der Gemeinde im Bereich der Baukontrolle (Konformität zum Energiepass)

## 4 Maßnahmenkatalog zum Abbau der aktuellen Herausforderungen und Hemmnisse

Die nachfolgenden Maßnahmen sind eine Auswahl aus den Vorschlägen der Workshop-teilnehmer und bieten für jedes im vorherigen Kapitel aufgelistete Hemmnis eine oder mehrere Lösungen an. In Anhang 7 befindet sich dazu eine Gegenüberstellung der identifizierten Maßnahmen und der entsprechenden Hemmnissen. Die Maßnahmen fügen sich in den Rahmen der in Kapitel 2 vorgestellten Leitlinien ein, sind im Vergleich zum übergeordneten Umsetzungsrahmen aber konkreter ausgearbeitet um aktuelle Hürden adressieren zu können.

In seiner Rolle als Fazilitator begleitet myenergy, in enger Kooperation mit dem Ministerium für Wirtschaft, die Umsetzung der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie vor indem die Schnittstellenarbeit mit dem Bau- und Immobiliensektor weiter ausgebaut wird.

### 4.1 Maßnahmen zum Umgang mit baukulturellen Herausforderungen:

Die in dem ersten Workshop identifizierten Herausforderungen betreffen im Wesentlichen das Planungs- und Ausführungs-Know-how bei den betroffenen Akteuren aus dem Bausektor, die fehlende interdisziplinäre Zusammenarbeit sowie die fehlende Information bei den Bauherren über die Möglichkeiten von Renovierungen in denkmalgeschützten Gebäuden.

Für die Umsetzung einiger hier genannter Maßnahmen muss die Abstimmung der Ziele der Energiepolitik und des Denkmalschutzes (Kapitel 2.3) angegangen werden, da die Ergebnisse dieses Prozesses Auswirkungen auf die konkrete Gestaltung der Maßnahmen haben wird.

Die zum Abbau der identifizierten baukulturellen Herausforderungen notwendigen konkreten Maßnahmen gestalten sich wie folgt:

<b>Maßnahmen zum Umgang mit baukulturellen Herausforderungen</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Maßnahme</b>	<b>Möglichst einzubindende Stellen</b>	<b>Zeithorizont</b>
M14	Siehe Punkt 4.3 (Tabelle)		
M1	Abstimmung und Beschreibung der Spielräume für energetische Renovierungen in geschütztem Bestand nach den unterschiedlichen historischen Bauweisen unter Berücksichtigung des Denkmalwerts und des Erhaltungszustandes des Objektes.  Zusammenstellung von Richtlinien für Gebäude der	SSMN	2018 - 2019

	unterschiedlichen historischen Bauweisen.		
M2	Schaffung neuer Fördermaßnahmen für denkmalgeschützte Gebäude („PRIME House Denkmalschutz“), Festlegung der Förderhöhe bei Bedarf auf der Grundlage von Modellvorhaben in Abstimmung mit SSMN	MDDI, MLog, SSMN	2019
M3	Wettbewerb Architektur + Energie in denkmalgeschützten Gebäuden	SSMN, OAI, myenergy	2017 - 2019
M4	Ausweitung des bestehenden „myenergy certified“-Labels auf Aspekte des Denkmalschutzes	myenergy, SSMN	2019
M5	Erhöhen des Weiterbildungsangebotes für energetische Renovierung von denkmalgeschützten Gebäuden	OAI, FdA, CdM, IFSB, SSMN	2018

## 4.2 Maßnahmen zum Abbau rechtlicher Hemmnisse:

Die in dem zweiten Workshop identifizierten rechtlichen Hemmnisse betreffen im Wesentlichen Regelungen für Eigentümergeinschaften, sowie bauvorschriftliche Regelungen auf kommunaler Ebene sowie rechtliche bzw. prozedurale Unsicherheiten bei den Förderprogrammen.

Die zum Abbau der identifizierten rechtlichen Hemmnisse notwendigen Maßnahmen gestalten sich wie folgt:

<b>Maßnahmen zum Abbau rechtlicher Hemmnisse</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Maßnahme</b>	<b>Möglichst einzubindende Stellen</b>	<b>Zeithorizont</b>
M6	Einführung einer Verpflichtung zur Bildung von Renovierungsrücklagen	Ministère de la Justice, Ministère des Finances, MLog	2018
M7	Einführung einer einfachen Mehrheit bei Entscheidungen von Eigentümergeinschaften	Ministère de la Justice	2018
M8	Harmonisierung der kommunalen Bauvorschriften, insbesondere im Hinblick auf Ausnahmeregelungen von Abstandsflächen bei nachträglicher Gebäudedämmung	Gemeinden, Ministère de l'Intérieur	2019
M9	Erhöhung der Attraktivität des Anreizprogramms „PRIME House“: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vereinfachung der Förderprozeduren</li> <li>• Einführung einer Prüfung der Förderfähigkeit vor Durchführung der Arbeiten.</li> </ul>	MDDI	In Vorbereitung

Zur Beseitigung bzw. Abmilderung der rechtlichen Hemmnisse soll die interdisziplinäre Zusammenarbeit der zuständigen Ministerien verstärkt werden.

### 4.3 Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen im Bereich der Motivation der Eigentümer:

Die in dem dritten Workshop identifizierten Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen im Bereich der Motivation der Eigentümer betreffen im Wesentlichen die Unkenntnis der Bauherren über die Gesamtkosten sowie die Wirtschaftlichkeit von Renovierungen, die fehlende Information über Renovierung, die Komplexität der Bauvorschriften und der Förderprogramme.

Die Umsetzung dieser Maßnahmen fügen sich besonders in den Rahmen der Leitlinien der Priorität von hocheffizienten Renovierungen sowie deren Finanzierbarkeit (Kapitel 2.1 und 2.2) ein.

Die zum Abbau der identifizierten Hemmnisse notwendigen konkreten Maßnahmen gestalten sich wie folgt:

<b>Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen im Bereich der Motivation der Eigentümer</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Maßnahme</b>	<b>Möglichst einzubindende Stellen</b>	<b>Zeithorizont</b>
M10	<p>Weiterentwicklung der Förderprogramme und Investitionshilfen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einführung einer Klimabank und zinsvergünstigter Kredite</li> <li>• Einführung einer Voreingehmigung zur Erhöhung der finanziellen Planungssicherheit des „PRIME House“ Programms</li> <li>• Förderschwerpunkt auf umfassende Renovierung durch stärkere Progression in der „PRIME House“ Förderung</li> </ul>	MDDI, MLog, MINECO, Ministère des Finances	In Vorbereitung
M11	<p>Erhöhung der Wertschätzung energetischer Renovierungen und Vermittlung der Notwendigkeit von energetischen Renovierungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prämierung von „best-practice“-Beispielen in den Bereichen „Energetisch renoviertes Denkmal“, „energetische Renovierung mit hoher Selbstbeteiligung“ evtl. auch im Bereich „Eigentümergeinschaften“</li> <li>• Marketingkampagne zum Wert umfassender</li> </ul>	myenergy, OAI, FdA, CdM, SSMN	2018

	Renovierung und zu den bestehenden Förderprogrammen (myenergy in Zusammenarbeit mit dem Immobilien- und Bausektor)		
M12	<p>Erhöhung der Attraktivität des Anreizprogramms „PRIME House“:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schaffung einer zentralen Antragsstelle für alle Beihilfen im Bereich Wohnungsbau („guichet unique“)</li> <li>• Vereinfachung der Förderprozeduren</li> <li>• Einführung einer Vorgegenehmigung zur Erhöhung der finanziellen Planungssicherheit</li> </ul>	MDDI, MLog, MINECO	In Vorbereitung
M13	<p>Erhöhung des Bekanntheitsgrades des Anreizprogramms „PRIME House“:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kommunikationskampagne der „neuen“ PRIME House</li> <li>• Marketingkampagne (myenergy in Zusammenarbeit mit dem Immobilien- und Bausektor) zum Wert umfassender Renovierungen (sowie der dazu passenden Fördermöglichkeiten)</li> </ul>	myenergy, OAI, FdA, CdM, MDDI, MLog	2017
M14	<p>Anpassung und Weiterentwicklung der myenergy-Beratung betreffend energetische Renovierung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flächendeckende Einführung der „Beratung vor Ort“ durch myenergy im Rahmen der infopoint-Aktivitäten</li> <li>• Anpassung an veränderte Abläufe im Beratungsprozess</li> <li>• Zuspitzung der Beratungsinhalte auf Kundenprofil</li> <li>• Zuspitzung der Beratungsinhalte auf die Schwerpunkte der Gebäuderenovierungsstrategie</li> <li>• Einführung einer myenergy-Beratung für „Heimwerker“</li> <li>• Größere Sensibilisierung der Bauherren durch: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Publizierung der Richtlinien zur denkmalgerechten energetischen Renovierung</li> <li>○ Veröffentlichung der Resultate der Wettbewerbe (cf. M3)</li> <li>○ Besichtigungen</li> <li>○ Best-practice Beispiele</li> </ul> </li> </ul>	myenergy, SSMN	2017 - 2019

Die Sensibilisierung und die Grundberatung der Eigentümer spielt eine wesentliche Rolle bei der Motivation der Eigentümer. Die obengenannten Maßnahmen sollen darauf abzielen, eine

zielgruppenorientiertere Grundberatung zu schaffen. Eine wichtige Grundlage stellen hier die im Rahmen des Workshops „Motivation der Eigentümer“ entwickelten Zielgruppen dar, bei welchen sich der Schwerpunkt der Beratung schrittweise von „Informieren“ auf „Motivieren“ verlegen sollte.

Hauptthemen der Sensibilisierung und der Grundberatung sollten mittelfristig folgende Themen sein:

- Einschätzung des Verbrauchs des eigenen Gebäudes durch Vergleich mit dem Verbrauch hochwertig renovierter Gebäude;
- Einschätzung und Trennung von Kosten der ohnehin notwendigen Maßnahmen und von Mehrkosten für höhere energetische Qualität;
- Wirtschaftlichkeit über die Nutzungsdauer mit einer Betonung der Langfristigkeit von Entscheidungen bei Bau und Renovierung von Gebäuden;
- Kopplung der energetischen Renovierung an ohnehin stattfindende Renovierungen bzw. Umbauten bei Eigentümerwechsel durch Kauf oder Erbschaft;
- Nicht energetische Vorteile wie Bauschadenssicherheit;
- Fördermöglichkeiten;
- Möglichkeiten der energetischen Renovierung in denkmalgeschützten Gebäuden;
- Motivation zur Kopplung mehrerer Maßnahmen und zur Ausführung in hohen energetischen Qualitäten (Tiefenrenovierung);
- Aufklärung der Vorschriften;
- Möglichkeiten zur Kopplung der energetischen Renovierung an Maßnahmen zur Nachverdichtung (Aufstockung, Anbau, Teilung in mehrere Wohneinheiten) als Mittel zur Senkung der Kosten;
- Praktische Vereinbarkeit von Energieeffizienz und Denkmalschutz.

Wie sich durch Befragungen von TNS-ILRES gezeigt hat, ist der Bekanntheitsgrad der Förderprogramme relativ gering. Dies zeigt die Wichtigkeit und Dringlichkeit für Informationskampagnen, für bessere Grundberatungsangebote sowie die Multiplikatorenrolle der Akteure des Planungs- und Bausektors zu stärken. Hier soll myenergy verstärkt in der Rolle als Vermittler, also als Fazilitator aktiv werden.

#### **4.4 Maßnahmen zum Abbau finanzieller Hemmnisse:**

Die in dem vierten Workshop identifizierten finanziellen Hemmnisse betreffen im Wesentlichen die hohen Investitionskosten, das fehlende Eigenkapital sowie die Wirtschaftlichkeit der Renovierung bei den Eigentümern, das Eigentümer-Nutzer-Dilemma, Entscheidungsprozeduren in Eigentümergemeinschaften, sowie Unsicherheiten auf der Ebene der Förderprogramme.

Die zum Abbau der identifizierten finanziellen Hemmnisse notwendigen Maßnahmen gestalten sich wie folgt:

<b>Maßnahmen zum Abbau finanzieller Hemmnisse:</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Maßnahme</b>	<b>Möglichst einzubindende Stellen</b>	<b>Zeithorizont</b>
M6	Siehe Punkt 4.2 (Tabelle)		
M10	Siehe Punkt 4.3 (Tabelle)		
M15	Steuerrechtliche Maßnahmen zur Erhöhung der Rentabilität: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ermäßigter TVA-Satz für energetische Renovierungen: Anpassung TVA 3%</li> <li>• Kopplung der Grundsteuer an Energieeffizienzklasse</li> <li>• Erhöhung der Energiesteuern auf Strom und Fossile</li> </ul>	Ministère des Finances, MINECO	2019
M16	Beratungs- und Kommunikationsschwerpunkt myenergy: <ul style="list-style-type: none"> <li>• „Der richtige Zeitpunkt für energetische Renovierungen“ (Kopplung von Maßnahmen)</li> <li>• Möglichkeiten zur Nachverdichtung mit Erhöhung der Anzahl der Wohneinheiten</li> </ul>	myenergy	2018
M17	Verringern des Eigentümer-Nutzer-Dilemmas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfung der Einführung von Warmmietmodellen (ggf. mit Praxistest in einigen Beispielprojekten)</li> <li>• Einführung von Modalitäten einer Mietpreisbremse in Förderprogramme (Bsp. Verbot der Mieterhöhung für X Jahre nach energetischer Renovierung)</li> </ul>	Ministère de la Justice	2019
M18	Unterstützung einkommensschwacher Haushalte: <ul style="list-style-type: none"> <li>• „Klimawohngeld“ als Kompensation bei Mieterhöhung</li> <li>• Klimabank → „Klimaprêt à taux zéro“</li> <li>• Projet d'assistance aux ménages en situation de précarité énergétique par myenergy</li> </ul>	myenergy, MDDI, MLog, MINECO, Ministère de la Famille, Ministère des Finances	2020, teilweise in Vorbereitung

Die Befragungen von TNS-ILRES zeigen, dass finanzielle Hemmnisse ein Hauptgrund für die relativ geringe Renovierungsrate und die sehr seltene Durchführung umfassender Renovierungen sind.

Die Ausarbeitung neuer sowie die Bewertung bestehender Finanzierungsinstrumente sollte durch eine verstärkte interministerielle Zusammenarbeit, unter Einbeziehung der relevanten Akteure des Bausektors, verbessert werden (siehe Kapitel 2).

## 4.5 Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen aus Sicht des Bausektors:

Die in dem fünften Workshop identifizierten Hemmnisse der Akteure des Bausektors betreffen im Wesentlichen das Informationsdefizit der Eigentümer über die Gebäuderenovierung und der Akteure aus dem Bausektor über die Förderprogramme. Des Weiteren wird auf die fehlende Attraktivität der aktuellen Förderprogramme sowie auch die fehlende Qualifizierung der Akteure aus dem Bausektor hingewiesen.

Die zum Abbau der identifizierten Hemmnisse der Akteure des Bausektors notwendigen Maßnahmen gestalten sich wie folgt:

<b>Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen aus Sicht des Bausektors</b>			
<i>Nr.</i>	<i>Beschreibung der Maßnahme</i>	<i>Möglichst einzubindende Stellen</i>	<i>Zeithorizont</i>
M19	Schaffung einer Internetseite „Bauen und Energie“ mit allen für den Handwerker relevanten Informationen zu energiepolitischen Vorschriften sowie Weiterbildungsangeboten und der auszuarbeitenden Richtlinien zur denkmalgerechten energetischen Renovierung	myenergy, OAI, FdA, CdM, SSMN	2017 - 2019
M20	Organisation regelmäßiger Treffen zum Erfahrungsaustausch zwischen Vertretern des Bausektors, myenergy und den Ministerien	Myenergy, SSMN	In Vorbereitung
M21	Gewerke übergreifende Zusammenarbeit von Betrieben, Netzwerke von Handwerkerbetrieben fördern (Erfahrungs- und Wissensaustausch, Diskussion über Partnerschaften für Komplettlösungen,...)	OAI, FdA, CdM	2018

Die verstärkte Einbindung der betroffenen Akteure aus dem Bausektor bei der Umsetzung der Weiterentwicklung der Renovierungsstrategie wird als Schlüsselement angesehen. Bei der Erarbeitung der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie hat sich die Einbeziehung der betroffenen Akteure aus dem Bausektor bereits bewährt. Die weiteren Schritte der Umsetzung sollten daher in einem Beteiligungsprozess vertieft werden. Bei der verstärkten Einbindung der Akteure aus dem Bausektor soll myenergy die zentrale Rolle als Vermittler, als Fazilitator, übernehmen.

Einerseits sollte myenergy durch verschiedene Aktivitäten wie Workshops oder Rundtischgespräche den jeweiligen Akteuren eine Plattform anbieten, um sich auf Augenhöhe ergebnisorientiert auszutauschen. Andererseits sollte myenergy die Ideen und Erfahrungen des Sektors konsequent aufnehmen, synthetisieren und als neutraler Partner den jeweiligen Ministerien im Sinne praxisnaher Lösungen weitervermitteln.

## 4.6 Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen aus Sicht der Gemeinden:

Die in dem zusätzlichen Workshop identifizierten Hemmnisse aus Sicht der Gemeinden betreffen im Wesentlichen den legalen und prozeduralen Rahmen sowie die Motivation bzw. das Informationsdefizit der Eigentümer.

Die zum Abbau der aus Sicht der Gemeinden identifizierten Hemmnisse werden zum größten Teil durch Maßnahmen zum Abbau rechtlicher Hemmnisse, finanzieller Hemmnisse, sowie durch Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen im Bereich der Motivation der Eigentümer behandelt.

Zusätzlich werden zum Abbau der identifizierten Hemmnisse folgende Maßnahmen zurückbehalten:

<b>Maßnahmen zum Abbau von Hemmnissen aus Sicht der Gemeinden</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Maßnahme</b>	<b>Möglichst einzubindende Stellen</b>	<b>Zeithorizont</b>
M22	Ausarbeitung und Festlegung von Richtlinien zu den Vorschriften und Vorgaben, welche im PAG verankert werden können  Ausarbeitung von Best Practice Beispielen bezüglich der PAPs, PAGs.  Änderung oder Anpassung der Bauvorschriften im Rahmen der Ausarbeitung der neuen PAGs.	Ministère de l'Intérieur, SYVICOL, Gemeinden	2017
M23	Harmonisierung der kommunalen Bauvorschriften, insbesondere im Hinblick auf Ausnahmeregelungen von Abstandsflächen bei nachträglicher Gebäudedämmung.  Anpassung des „Règlement-type“ des Innenministeriums	Gemeinden, Ministère de l'Intérieur, SSMN	2018 - 2019
M24	Anpassung des allgemeinen Ablaufs der FPE-Prozeduren: <ul style="list-style-type: none"> <li>Anpassung der im Rahmen von FPE-Anträgen für Renovierungsprojekte zu nutzenden Berechnungshilfen</li> </ul>	MDDI	In Vorbereitung
M25	Proaktive Kommunikation zum Thema „Bauen und Energie“	Gemeinden, myenergy,	2017

	Informationsbroschüren zu den kommunalen Vorschriften und Prozeduren	SSMN	
M26	Verbesserung der Datenlage bezüglich der Energieverbräuche in den Gemeinden durch eine systematische Analyse/Erfassung von Verbrauchsdaten	Gemeinden, Energieversorger	2018
M27	Zuständigkeiten auf der Ebene der Baukontrollen in Bezug auf die Energieeffizienz noch klarer kommunizieren und umsetzen.  Identifikation und Kommunikation von Best Practice Beispielen in Bezug auf Baukontrollen.	Gemeinden, MINECO, myenergy	2017

Einige Maßnahmen (M22 und M23) beziehen sich auf die gezielte Nutzung der kommunalen Stellschrauben auf der Ebene der Bebauungspläne sowie die mangelnde Flexibilität bei nachträglicher Dämmung auf der Ebene der Bauvorschriften. Die dazu vorgeschlagenen Lösungsansätze sollten prioritär behandelt werden, da noch nicht alle Bebauungspläne der Gemeinden ausgearbeitet sind und somit zum jetzigen Zeitpunkt noch Handlungsspielraum besteht. Dies gilt auch für die Bauvorschriften, welche zeitgleich mit den Bebauungsplänen überarbeitet werden.

## **5 Perspektiven der Weiterentwicklung der Gebäuderenovierungsstrategie**

### **5.1 Szenarienstudie**

Zur Abschätzung der langfristig erreichbaren Einsparungen des luxemburgischen Gebäudeparks wurde vom Ministerium für Wirtschaft eine Szenarienstudie in Auftrag gegeben. Diese Studie befindet sich derzeit noch in der Ausarbeitung. Die Szenarienstudie soll die möglichen Handlungsspielräume aufzeigen und wird auch eine Grundlage für ein erfolgreiches Monitoring der Umsetzung der Gebäuderenovierungsstrategie sowie der Zwischenziele sein.

Der Schwerpunkt der Szenarienstudie stellt eine detaillierte Analyse des Gebäudebestandes sowie eine szenarienbasierte Abbildung mehrerer zukünftiger Entwicklungspfade dar. Aus den Ergebnissen sollen sich vor allem quantitative Ziele für die Gebäuderenovierungsstrategie sowie eine Renovierungsrate ableiten lassen.

Für die Szenarienstudie wird der Untersuchungszeitrahmen dabei bis 2070 festgelegt, um eine Betrachtung der typischen Sanierungszyklen von 30 bis 50 Jahren zu ermöglichen. Dies ermöglicht eine Berücksichtigung der Kopplung von energetischen Renovationsmaßnahmen an anfallende Instandsetzungsarbeiten. Studien und Erfahrungen aus realisierten Gebäuden zeigen, dass hierbei die Wirtschaftlichkeit am höchsten ist.

In der Szenarienstudie wird dabei der Einfluss verschiedener Faktoren wie Bevölkerungsentwicklung, Neubau-, Renovierungs- und Abrissrate, energetische Qualität in Neubau und Renovation, Veränderung des Energieträgermix' auf Energiebedarf und Treibhausgasemissionen untersucht. Die genannten Einflussfaktoren werden in mehreren Szenarien abgebildet, die unterschiedliche Entwicklungen beschreiben.

In einem ersten Schritt werden die Energiebedarfe für Heizung, Warmwasserbereitung, Hilfs- und Haushaltsstrom des heutigen Gebäudebestandes nach Gebäudetypen und Altersklassen differenziert berechnet. In einem zweiten Schritt wird der zeitliche Verlauf des Endenergiebedarfs für die unterschiedlichen Szenarien ermittelt. Dabei sollen die Erkenntnisse aus dem ersten Schritt mit einfließen sowie eine Berücksichtigung der zu erwartenden Effizienzverbesserungen und des sich ändernden Energiemix.

Die Szenarienstudie soll derart aufgebaut sein, dass sie zukünftige Fortschreibungen und damit eine verbesserte und präzisere Abbildung des energetischen Zustands des Gebäudebestandes ermöglicht, beispielsweise durch Beschreibung und Quantifizierung schon erfolgter Renovierungsschritte, des Leerstandes sowie durch die räumliche Verortung des Energiebedarfs im Gebäudesektor.

## 5.2 „Forschung & Entwicklung“, Umsetzung sowie Analyse von Pilotprojekten:

Als Grundlage für die Ausgestaltung vieler Maßnahmen sollen verstärkt Aktivitäten im Bereich der „Forschung und Entwicklung“ von technischen Lösungen sowie die Umsetzung und Analyse von Pilotprojekten vorangetrieben werden.

Die zurückbehaltenen Maßnahmen gestalten sich wie folgt:

<b>Maßnahmen im Bereich „Forschung &amp; Entwicklung“, Umsetzung sowie Analyse von Pilotprojekten</b>			
<b>Nr.</b>	<b>Beschreibung der Maßnahme</b>	<b>Möglichst einzubindende Stellen</b>	<b>Zeithorizont</b>
M28	Wirtschaftliche Renovierung eines typischen MFH des sozialen Wohnbaus in Effizienzklasse A	SNHBM, Fonds du Logement	2018
M29	Wirtschaftliche Renovierung eines typischen MFH des sozialen Wohnbaus in Kombination mit Aufstockung bzw. Nachverdichtung	SNHBM, Fonds du Logement	2018
M30	Renovierung mit Denkmalschutz	SSMN, myenergy, uni.lu, LIST, FNR	2019
M31	Renovierung eines typischen öffentlichen Gebäudes in Klasse A	Gemeinde, CdM, OAI	2018
M32	Wissensvernetzung auf der Ebene der Handwerker mittels Best-Practice Beispielen und Erfahrungsaustausch	CdM, Centres de compétences	2018
M33	Förderung von Forschung und Entwicklung	FNR, uni.lu, LIST, SSMN	2019

Erfahrungen aus mehreren anderen Regionen zeigen, dass es für die Akzeptanz von Gebäuden und Gebäuderenovierungen hoher energetischer Qualität wichtig ist, deren technisch und wirtschaftlich umsetzbare Einsparpotenziale am Beispiel begleiteter Pilotprojekte zu demonstrieren. Dabei geht es weniger um die Entwicklung und die Analyse neuer komplexer Konzepte, sondern um Konzepte, die wirtschaftlich vertretbar auf große Marktsegmente übertragen werden können.

Hauptziel ist es, Vorurteile gegen umfassende Renovierungen in hoher energetischer Qualität abzubauen und zu zeigen, dass diese:

- die vorausberechneten niedrigen Energiekennwerte auch in der Praxis erreichen,
- zu geringen Mehrkosten errichtet und über die gesamte Nutzungsdauer wirtschaftlich betrieben werden können,
- eine höhere Behaglichkeit als übliche Renovierungen gewährleisten,

- hohe Sicherheit vor Feuchte- und Schimmelschäden erreichen und in hochwertiger Gestaltung an unterschiedlichen Gebäudetypen durchgeführt werden können.

Im Rahmen der Umsetzung von Pilotprojekten sollte myenergy eine begleitende Rolle übernehmen.

### **5.3 Auswirkungen auf den Bausektor**

Vor allem der Bausektor, als ausführender Akteur, wird von der Gebäuderenovierungsstrategie und deren Maßnahmen bzw. deren Auswirkungen profitieren können. Dabei gilt es vor allem, die Multiplikatorenrolle des Sektors effektiv auszunutzen, um die vorhandenen Potenziale möglichst weitestgehend auszuschöpfen. Das wirtschaftliche Potenzial von energetischen Renovierungen beläuft sich laut einer Status quo Analyse im Rahmen der LuxBuild-Projektes [15] auf über 277 Mio € pro Jahr, für den gesamten Bausektor könnten bis 2020 rund 8.000 zusätzliche Arbeitsstellen geschaffen werden. Die Gebäuderenovierungsstrategie soll dabei helfen, dieses Potenzial, besonders in Bezug auf energetische Renovierungen, auszuschöpfen.

Dabei lässt die TNS-ILRES-Befragung [7] der Experten bereits einen ersten Ausblick zu, in welche Richtung sich der Bausektor bewegt:

- So gaben die Experten an, dass die luxemburgischen Betriebe durchaus die Kompetenzen und Kapazitäten besitzen, um einer erhöhten Nachfrage im Bereich der energetischen Renovation entgegenzutreten. Es fehlt hierfür aber noch an genügend Ausbildungsangeboten, welche unter anderem im Hinblick auf die Umsetzung der Gebäuderenovierungsstrategie weiter ausgebaut werden sollen.
- Auch sind die Experten der Meinung, dass in den nächsten 10 Jahren verstärkt ökologische Materialien zum Einsatz kommen werden. Dies wird durch die vierte Leitlinie, sowie durch die Weiterentwicklungen der Förderprogramme, unterstützt und hervorgehoben.
- Aber die Experten sehen auch den Bedarf einer Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu ausländischen Betrieben. Um dies zu gewährleisten werden vermehrt innovative Lösungen und Materialien benötigt.

Mit diesen Erkenntnissen und den in Kapitel 4.5 vorgeschlagenen Maßnahmen sollte die Priorität des Bausektors auf dem Ausbau und der Abstimmung der bestehenden Ausbildungsangebote liegen. Dies wäre ein Grundstein, um alle oben genannten Tendenzen weiter zu verstärken und um das enorme wirtschaftliche Potenzial auszuschöpfen.

### **5.4 Überprüfung der Umsetzung durch Monitoringprogramm:**

Aufgrund des hohen Anteils des Gebäudesektors am nationalen Gesamtenergiebedarf sowie an den nationalen Gesamtemissionen Luxemburgs sowie der bestehenden substanziellen

Einsparpotenziale ist ein Monitoring der Umsetzung der Renovierungsstrategie sowie der Zwischenziele von höchster Bedeutung.

Im Rahmen des Monitoringprogramms soll die aktuelle Datenlage durch Auswertung verschiedener Quellen (statistische Auswertungen Energiepässe mit Verbrauchsdaten, anonymisierte Verbrauchsdaten von Energieversorgungsunternehmen und Ablesedienstleistern,...) wesentlich verbessert werden.

Die so erhobenen Verbräuche des Gesamt-Gebäudeparks sollten regelmäßig mit den quantitativen Zielen verglichen werden und im Rahmen der Umsetzung der in Kapitel 2 vorgestellten Leitlinien berücksichtigt werden.

## 6 Quellen

- [1] Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaft bis 2050, Brüssel, März 2011
- [2] B. Schlomann, Fraunhofer Institute for systems and innovation research: The European savings potential in buildings: which policy measures are needed to harvest these potentials; Präsentation anlässlich des eceee annual policy seminar „Capturing the vast energy savings potential in Europe´s buildings“, Brüssel 19. November 2014
- [3] Europäisches Parlament / Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz
- [4] Dritter Nationaler Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg im Rahmen der Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG; Anhang A: Gebäuderenovierungsstrategie
- [5] L. Castellazzi, P. Zangheri, D. Paci: Synthesis Report on the assessment of Member States´ building renovation strategies; JRC Science for policy Report, 2016
- [6] Fenn Faber, Christiane Conrady, Yann Trausch: Nationale Renovierungsstrategie – Workshop III: Motivation der Eigentümer“ Präsentation der TNS-ILRES Umfrage 2015 zur energetischen Renovation in Luxemburg (Haushalte); myenergy, Dezember 2015
- [7] Fenn Faber, Christiane Conrady, Yann Trausch: Nationale Renovierungsstrategie – Workshop V: Chancen für den Bausektor: myenergy: Präsentation der TNS ILRES Umfrage 2015-2016 zur energetischen Renovation in Luxemburg (Bausektor), myenergy, Februar 2016
- [8] M. Ploss: Arbeitsdokument im Rahmen der Erstellung einer nationalen Gebäuderenovierungsstrategie, Mai 2015
- [9] myenergy: Thematische Zusammenfassung der im Rahmen der Entwicklung einer nationalen Renovierungsstrategie eingereichten Positionspapiere; Luxemburg, Oktober 2015
- [10] Aufbereitung Statistischer Daten der Statec zum Gebäudebestand Luxemburgs; myenergy, März, 2015
- [11] F. Peltier: Regards 06 sur le stock des bâtiments et logements; Statec, Mai 2015
- [12] Ministère de l´Économie (Herausgeber): Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz für neue und bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude; Luxemburg, April 2014

- [13] Eurostat: Durchschnittliches und Median-Einkommen nach Alter und Geschlecht  
download:[http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc\\_di03&lang=de](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc_di03&lang=de)
- [14] Eurostat: Preise Elektrizität für Haushaltabnehmer, ab 2007 - halbjährliche Daten  
[nrg\_pc\_204
- [15] myenergy, CdM, IFSB: LuxBuild2020: Analyse du statu quo national; Luxembourg,  
Juli 2013
- [16] W. Feist: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Tagungsband 24: Einsatz von  
Passivhaustechnologien bei der Altbaumodernisierung; Passivhaus Institut,  
Darmstadt, 2003