



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Économie

Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und der effizienten Fernwärme- und Fernkälteversorgung

Bericht des Ministeriums für Wirtschaft Luxemburg

zur Erfüllung der Berichtspflicht nach § 14 der Richtlinie 2012/27/EU des EU Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz.

August 2016

Auftraggeber:

Ministerium für Wirtschaft Luxemburg

Auftragnehmer:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Competence Center Energiepolitik und Energiemärkte
Competence Center Energietechnik und Energiesysteme
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Bearbeiter:

Dr. Marian Klobasa (marian.klobasa@isi.fraunhofer.de)

Dr. Jan Steinbach (jan.steinbach@isi.fraunhofer.de)

Dr. Martin Pudlik (martin.pudlik@isi.fraunhofer.de)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Historische Entwicklung der KWK-Erzeugung	3
2.1 Installierte elektrische und thermische Leistung.....	3
2.2 KWK-Stromerzeugung und Wärmeerzeugung.....	7
3 Ausgangsbasis und Rahmendaten	10
3.1 Energiebilanz Luxemburg	10
3.2 Technische und ökonomische Kenndaten von KWK-Anlagen	11
3.3 Weitere Rahmendaten und Energieträgerpreisentwicklungen	12
3.4 Aktuelle Maßnahmen zur Förderung der KWK	16
4 Beschreibung des Wärme- und Kältebedarfs und des Gebäudebestandes.....	18
4.1 Wärme- und Kältebedarf im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich.....	18
4.2 Wärmebedarf des Industriesektors	22
4.3 Beschreibung des Gebäudebestandes in Luxemburg.....	25
4.4 Ermittlung der Geschossflächenzahl pro Gemeinde	28
5 Potenzialabschätzung für dezentrale KWK-Anlagen in Gebäuden	30
5.1 Entwicklung des Wärmebedarfs in Gebäuden bis 2030.....	30
5.2 Wirtschaftliches Potenzial dezentraler KWK-Anlagen in Wohngebäuden	35
5.2.1 Auslegung dezentraler KWK-Anlagen.....	37
5.2.2 Wirtschaftlichkeit gegenüber alternativer Wärmeversorgungsoptionen.....	40
6 Potenzialabschätzung für KWK in der Industrie.....	46
6.1 Entwicklung des Industrierwärmebedarfs bis 2030	46
6.2 Wirtschaftlichkeit von industriellen KWK-Anlagen.....	49

6.3	Entwicklung des zusätzlichen KWK-Potenzials durch Modernisierung und Neubau von industriellen KWK-Anlagen	52
7	Potenzialabschätzung für Wärmenetzversorgung und zentrale KWK- Anlagen.....	55
7.1	Ermittlung der lokalen Wärmebedarfe und -dichten.....	56
7.2	Ergebnisse der Wärmebedarfskarten für die Jahre 2012 und 2030 für Luxemburg.....	57
7.3	Detaillierte Wärmebedarfskarten für Gemeinden mit wirtschaftlichem Wärmenetzpotenzial	61
7.4	Fazit zu Potenzial für hocheffiziente KWK-Anlagen.....	62
8	Handlungsempfehlungen und Strategien zur zukünftigen Deckung des Wärmebedarfs	63
8.1	Handlungsempfehlungen für Gebiete mit hoher Wärmedichte	63
8.2	Handlungsempfehlung für Gebiete mit niedriger Wärmedichte und für dezentrale KWK-Anlagen.....	67
	Literatur	69
9	Anhang.....	74
9.1	Modellbeschreibung Invert/EE-Lab	74
9.2	Zusätzliche Wärmebedarfskarten.....	76

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Entwicklung der installierten elektrischen Stromerzeugungsleistung nach Technologien von 2000 bis 2014.....	4
Abbildung 2: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung in fossilen KWK-Anlagen von 2000 bis 2016.....	5
Abbildung 3: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung in erneuerbaren KWK-Anlagen von 2000 bis 2014	5
Abbildung 4: Gekoppelte Stromerzeugung aus KWK-Anlagen, Stromerzeugung gesamt und KWK-Anteil von 2000 bis 2014	7
Abbildung 5: KWK-Stromerzeugung nach Anlagenarten von 2010 bis 2015.....	8
Abbildung 6: Entwicklung der Gaspreise für Haushalte und Unternehmen von 2008 bis 2015.....	12
Abbildung 7: Entwicklung der Strompreise für Haushalte und Unternehmen von 2008 bis 2015.....	13
Abbildung 8: Entwicklung des Verhältnisses Strom- zu Gaspreis für Haushalte und Unternehmen von 2008 bis 2015.....	13
Abbildung 9: Entwicklung der Energieträgerpreise (Grenzübergang) bis 2050.....	14
Abbildung 10: Angenommene Energiepreisentwicklung für Haushaltskunden bis zum Jahr 2030.....	15
Abbildung 11: Entwicklung der Gas und Strom für Unternehmen sowie des Stromgroßhandelspreises	15
Abbildung 12: Zusammenhang Endenergiebilanz und relevante Anwendungsgrößen der Wärmebedarfsanalyse.....	18
Abbildung 13: Entwicklung des Endenergiebedarfs der privaten Haushalte.....	19
Abbildung 14: Entwicklung des Endenergiebedarfs im tertiären und Landwirtschaftssektor	20
Abbildung 15: Anwendungsbilanz des Wärme- und Kältebereichs in Luxemburg im Jahr 2012.....	21
Abbildung 16: Wärmebedarf in Wohn- und Nichtwohngebäuden nach Energieträgern für das Jahr 2012.....	21
Abbildung 17: Entwicklung des Endenergiebedarfs in der Industrie von 2004 – 2014.....	22
Abbildung 18: Energieträger und Anwendungsarten des Wärmebedarfs in der Industrie 2012	23

Abbildung 19:	Entwicklung der Beschäftigtenzahlen im Industriesektor von 2005 - 2013	24
Abbildung 20:	Anzahl Wohngebäude nach Gebäudeklassen	26
Abbildung 21:	Ergebnisse für die Geschossflächenzahl mit Gemeindefläche als Bezugsfläche	29
Abbildung 22:	Monatliche Durchschnittstemperaturen für Luxemburg	31
Abbildung 23:	Kumulierte Bruttogrundfläche neuer Gebäude bis zum Jahr 2030	32
Abbildung 24:	Entwicklung des Nutzwärmebedarfs bis zum Jahr 2030	33
Abbildung 25:	Durchschnittlicher Nutzwärmebedarf der Referenzwohngebäudeklassen im Jahr 2016	34
Abbildung 26:	Anteil der im Simulationszeitraum von 2012 bis 2030 nachträglich sanierten Wohngebäude.....	35
Abbildung 27:	Vergleich der Wärme- und Stromprofile in Sommer- und Winterwerktypage für EFH-Referenzgebäude Baualtersklasse 1971 - 1980	38
Abbildung 28:	Spezifische Investitionskosten gängiger Wärmeversorgungssysteme	42
Abbildung 29:	Jahreskosten der Wärmebereitstellung dezentraler KWK-Systeme	43
Abbildung 30:	Spezifische Wärmebereitstellungskosten und Wirtschaftlichkeit der dezentralen KWK-Versorgung ohne Eigenstromnutzung in MFH	44
Abbildung 31:	Spezifische Wärmebereitstellungskosten und Wirtschaftlichkeit der dezentralen KWK-Versorgung mit Eigenstromnutzung in MFH	45
Abbildung 32:	Wärmebedarf nach Temperaturniveau und Industriesektor.....	47
Abbildung 33:	Entwicklung des Brennstoffbedarfs und des KWK-geeigneten Brennstoffbedarfs in der Industrie in 2014, 2020 und 2030 nach Sektoren	48
Abbildung 34:	Stromerzeugungskosten für GT mit Wärmenutzung bzw. GuD-Anlagen in Abhängigkeit der Auslastung	51
Abbildung 35:	Stromerzeugungskosten für BHKW-Anlagen in Abhängigkeit der Auslastung.....	52
Abbildung 36:	Wärmeverteilungskosten in Abhängigkeit der Wärmedichte	56
Abbildung 37:	Verteilung des Nutzwärmebedarfs und Gebiete wirtschaftlichem Potenzial für Wärmeversorgung	58
Abbildung 38:	Potentiell erschließbarer Wärmebedarf in den Wärmenetzregionen	59

Abbildung 39: Wirtschaftliches Wärmenetzpotenzial und derzeitige Wärmenetze.....	60
Abbildung 40: Detaillierte Darstellung der Wärmebedarfe und der Industriestandorte in den Wärmenetzregionen.....	61
Abbildung 41: Struktur des Simulationsmodells Invert/ EE-Lab.....	74

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Installierte elektrische und thermische KWK-Leistung sowie reine Wärmeerzeuger in Fernwärmenetzen.....	6
Tabelle 2: Elektrische und thermische Leistung sowie Strom- und Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen nach Anwendungsbereichen für 2015	9
Tabelle 3: Endenergiebilanz 2014 für die Sektoren Industrie, Verkehr und andere	10
Tabelle 4: Technische und ökonomische Kenndaten von KWK-Anlagen der Leistungsklasse (1).....	11
Tabelle 5: Technische und ökonomische Kenndaten von KWK-Anlagen der Leistungsklasse (2).....	11
Tabelle 6: Verwendete Datenquellen zur Ableitung der Gebäudetypologie	25
Tabelle 7: Ermittelte Nichtwohngebäudeflächen aus Katasterdaten	27
Tabelle 8: U-Werte für Gebäudekomponenten von Wohngebäuden seit 1995	28
Tabelle 9: Mittlere Neubau- und Abrissrate über Szenarienzeitraum.....	32
Tabelle 10: Klassifizierung von Objekt-KWK Anlagen in der dezentralen Versorgung.....	36
Tabelle 11: KWK-Technologien in der dezentralen Versorgung von Wohngebäuden	36
Tabelle 12: Auslegung dezentraler KWK-Anlagen für einzelne Referenzgebäude	39
Tabelle 13: Ökonomische Rahmenbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung	41
Tabelle 14: Brennstoffbedarf in der Industrie insgesamt und nach Temperaturniveau für 2014, 2020 und 2030	48
Tabelle 15: Betrachtete Kosten und Erlöse zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von industriellen KWK-Anlagen.....	50
Tabelle 16: Abschätzung des zusätzlichen Potenzials für KWK-Wärme in der Industrie bis 2030 bezogen auf Endenergieeinsatz in der Industrie.....	54

1 Einleitung

Die Richtlinie 2012/27/EU des EU Parlaments und des Rates zur Energieeffizienz sieht in § 14 vor, dass alle Mitgliedsstaaten eine Bewertung des Potenzials für den Einsatz hocheffizienter KWK und hocheffizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung durchführen. Ziel der Studie ist es daher aufbauend auf bestehenden Analysen zum KWK- und Fernwärmepotenzial den aktuellen Stand sowie die mögliche zukünftige Entwicklung zu bestimmen und wirtschaftliche Potenziale auf Basis einer Kosten-Nutzen-Rechnung zu bestimmen.

Ausgangspunkt der Untersuchung ist es, zunächst die historische Entwicklung zu betrachten und zu identifizieren, in welchem Umfang bereits heute KWK-Technologien zur Deckung der Wärmenachfrage eingesetzt werden. Dabei wird sowohl der Gebäudesektor als auch die Entwicklung im industriellen Bereich betrachtet, wo KWK-Technologien zur Bereitstellung von Prozesswärme genutzt werden.

Für die zukünftigen Potenziale einer Ausweitung der KWK-Erzeugung stellt der aktuelle und zu erwartende Wärmebedarf die Grundlage dar. Im Rahmen der Studie wird daher der zukünftige Bedarf sowohl im Gebäudesektor als auch in der Industrie abgeschätzt und fortgeschrieben. Diese Analysen stützen sich dabei auf aktuelle Energiebilanzen für Luxemburg und differenzieren den Wärmebedarf sowohl sektoral als auch geographisch. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Systemen spielt die Wärmedichte und damit die regionale Verteilung möglicher Wärmesenken und Wärmequellen eine wichtige Rolle. Soweit möglich werden daher auf Gemeindeebene regionale Auswertungen vorgenommen und diese auch in Form von Wärmekarten dargestellt.

Die Kenntnis der regionalen Verteilung von Wärmesenken und –quellen sowie der bereits bestehenden Wärmeinfrastruktur bildet die Grundlage, um auf Basis einer Kosten-Nutzen-Analyse die wirtschaftlich realisierbaren Potenziale für KWK-Technologien zu ermitteln und zu bewerten. Für diese Bewertung sind die möglichen alternativen Wärmeversorgungskonzepte von großer Relevanz. Auf Grund des vergleichsweise hohen erwarteten Anteils an Neubau im Gebäudebestand von Luxemburg könnten sich hier größere Möglichkeiten für die Implementierung neuer Wärmeversorgungssysteme bieten.

Die Ergebnisse zu den wirtschaftlichen Potenzialen stellen die Grundlage für mögliche Handlungsempfehlungen und Strategien für die zukünftige Deckung des Wärmebedarfs in Luxemburg dar. Bei der Ableitung von politischen Handlungsempfehlungen sind weitere Zielverpflichtungen wie Verminderung der CO₂-

Emissionen, Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien sowie Steigerung der Energieeffizienz zu beachten. Dabei ist die besondere Situation in Luxemburg zu beachten, dass eine Steigerung der nationalen Stromproduktion auf Grund des Territorialprinzips zunächst zu einer Erhöhung der nationalen CO₂-Emissionen führt, wenn diese Anlagen nicht unter das Emissionshandelsregime fallen und gleichzeitig Stromimporte verdrängen.

Neben diesen Wechselwirkungen mit anderen Zielverpflichtungen stellt sich auch die Frage, welche Pfadabhängigkeiten bestehen, wenn die Wärmebedarfsdeckung zukünftig durch hohe Effizienzstandards und eine zunehmende Verbreitung von elektrischen Wärmepumpen in einem stark von erneuerbaren Energien dominierten Energiesystem geprägt wird. Durch den hohen Neubauanteil sind hier ggf. schnellere Veränderungen und Anpassungen der Wärmeversorgung denkbar als in anderen Ländern, die niedrigere Neubauraten aufweisen.

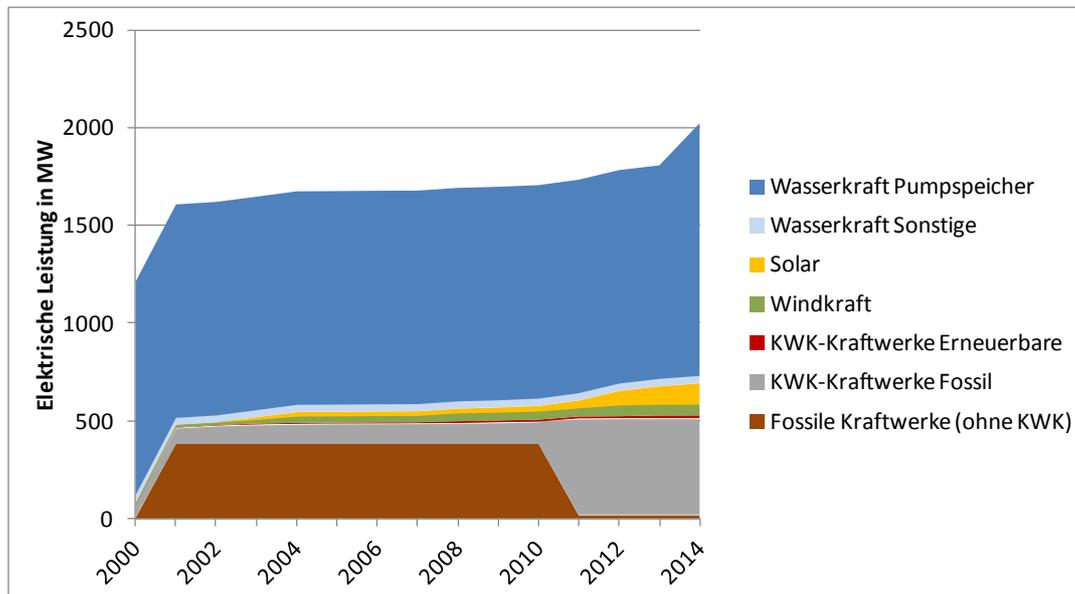
Die nachfolgenden Kapitel adressieren die genannten Fragestellungen und geben damit eine umfassende Bewertung der Potenziale für hocheffiziente KWK-Anlagen ab, wie sie im Rahmen der Richtlinie 2012/27/EU des EU Parlaments und des Rates zur Energieeffizienz in § 14 gefordert ist.

2 Historische Entwicklung der KWK-Erzeugung

2.1 Installierte elektrische und thermische Leistung

Einen großen Anteil an der Stromerzeugung in Luxemburg haben das Pumpspeicherkraftwerk Vianden sowie bisher das Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (GuD) TwinErg in Esch-Alzette, die zusammen über 1600 MW an elektrischer Erzeugungsleistung aufweisen. Das GuD-Kraftwerk TwinErg wurde jedoch Mitte 2016 stillgelegt. Zusätzlich sind in den letzten Jahren auch weitere Industrie-KWK-Anlagen stillgelegt worden, so dass lediglich kleinere, fast ausschließlich wärmegeführte, KWK-Anlagen in Luxemburg in Betrieb sind. Diese Anlagen laufen zu einem Großteil auf Basis von fossilen Energien (Erdgas), vereinzelt aber auch auf Basis erneuerbarer Energieträger (Holzpellets).

Der Ausbau der KWK-Erzeugung in Luxemburg hat in den letzten Jahren insbesondere bei diesen kleineren Anlagen (« *Petites centrales* ») stattgefunden. Die Wärmeauskopplung von TwinErg wurde im Jahre 2008 mit einer auskoppelbaren Gesamtleistung von 28 MW_{th} in Betrieb genommen und ist bis zum Jahre 2015 für die Fernwärmeversorgung des Gebiets Belval Ouest (Agora) konstant angestiegen bis zu einer Gesamtlast von 12 MW_{th}. Der KWK-Anteil des Kraftwerks wurde in den in der Vergangenheit publizierten statistischen Daten zur installierten KWK-Leistung berücksichtigt. Dieser hat in der publizierten Form allerdings eine sehr begrenzte Aussagekraft gehabt, so dass der Statec aus nachträglicher Sicht eine rückwirkende Korrektur vorgesehen hat. Aus diesem Grund ist die fossile KWK-Leistung von 491 MW in 2011 differenziert zu betrachten (siehe Abbildung 1). Insgesamt sind für 2014 ca. 507 MW elektrische KWK-Leistung in der aktuellen Statistik ausgewiesen, wovon ca. 14 MW erneuerbare Energien einsetzen.

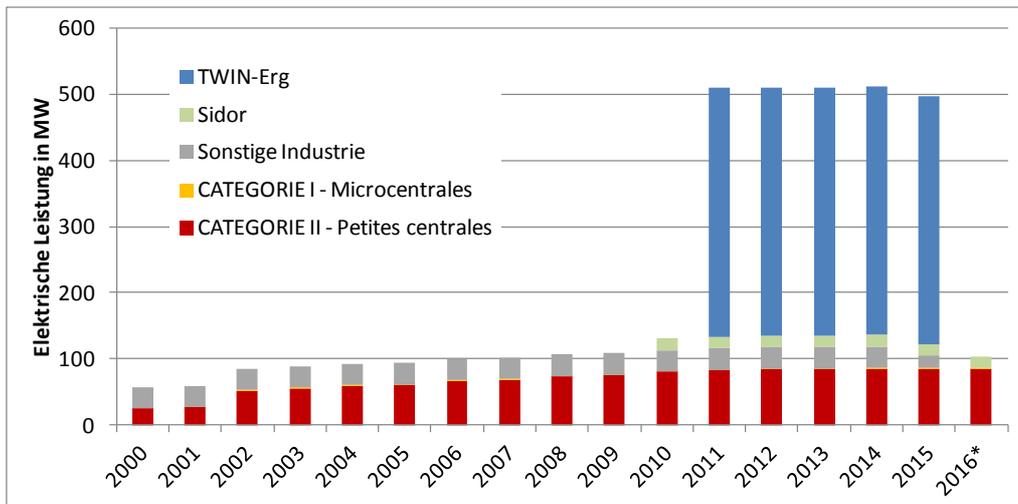


Quelle: Statec A4201

Abbildung 1: Entwicklung der installierten elektrischen Stromerzeugungsleistung nach Technologien von 2000 bis 2014

Der KWK-Anteil an der installierten Leistung beläuft sich damit in der aktuellen Statistik auf ca. 25 % in 2014. Seit Mitte der 1990er Jahre bestanden auch mehrere industrielle KWK-Anlagen im einstelligen MW-Bereich, die zur Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt wurden. Diese Anlagen sind in den letzten Jahren auf Grund einer mangelnden Wirtschaftlichkeit jedoch stillgelegt worden. Durch diese seit 2014 erfolgten Stilllegungen ist der KWK-Anteil an der in Luxemburg installierten elektrischen Leistung jedoch deutlich gefallen.

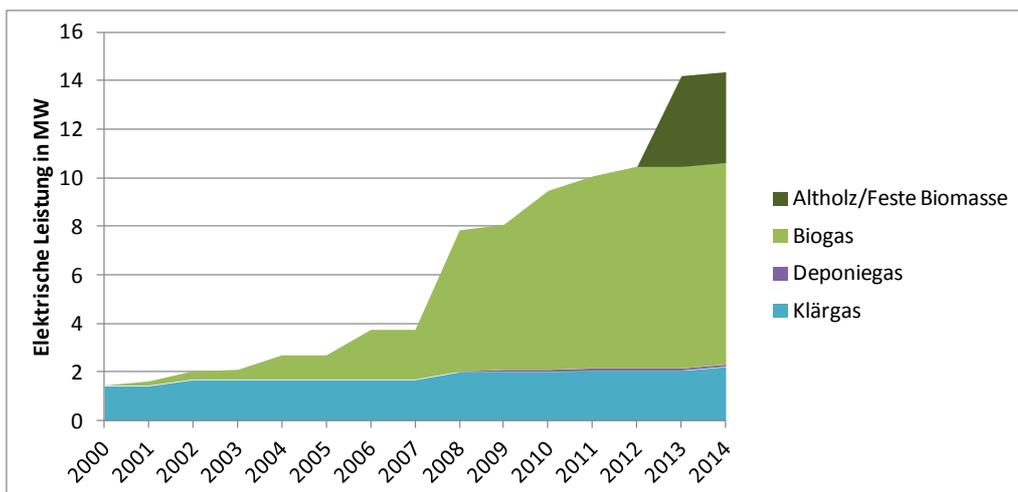
Im Bereich der kleinen Anlagen sind seit dem Jahre 2000 insgesamt 117 Blockheizkraftwerke an 86 Standorten mit einer mittleren elektrischen Leistung von einigen hundert kW gebaut worden, so dass die installierte Leistung von ca. 25 MW auf 85 MW angestiegen ist (siehe Abbildung 2). Darüber hinaus gab es im Bereich Mikro-KWK (« Microcentrales ») einen Zubau von 39 Anlagen mit jeweils unter 100 kW auf knapp 1 MW. Die Anlagen setzen in der Regel Erdgas als Brennstoff ein. Schlussendlich bleibt noch zu erwähnen, dass im Jahre 2010 die bestehende Müllverbrennungsanlage (SIDOR) erneuert und vergrößert worden ist. Sie erzeugt Strom und kann ebenfalls auch Wärme auskoppeln. Hier ist eine Wärmeauskopplung geplant, um ein naheliegendes Stadtquartier (« Cloche d'Or ») zu versorgen.



Quelle: WiMi Lux 2016, ILR 2016 (*2016, geschätzt)

Abbildung 2: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung in fossilen KWK-Anlagen von 2000 bis 2016

Einen weiteren Ausbau der KWK-Erzeugung hat es im Bereich der erneuerbaren KWK-Anlagen gegeben. Hier ist die installierte Leistung von Biogas-Anlagen mit Wärmenutzung auf ca. 8,3 MW in 2014 angestiegen (siehe Abbildung 3) und umfasst ca. 25 Anlagen mit im Mittel 300 kW elektrischer Leistung. In 2013 ist eine größere KWK-Anlage im MW-Bereich installiert worden, die Restholz als Brennstoff einsetzt. Die installierte Leistung von Deponie- und Klärgasanlagen ist kaum angestiegen und liegt in 2014 bei ca. 2,3 MW.



Quelle: WiMi Lux 2016

Abbildung 3: Entwicklung der installierten elektrischen Leistung in erneuerbaren KWK-Anlagen von 2000 bis 2014

Aufbauend auf Daten von Eurostat (Eurostat 2015) und der installierten elektrischen Leistungen lassen sich auf Basis typischer Stromkennzahlen die thermischen Leistungen der KWK-Anlagen abschätzen. Zusätzlich werden in Luxemburg auch Nah- und Fernwärmenetze mit reinen Wärmeerzeugern betrieben, die keinen Strom produzieren. Zusätzlich zur KWK-Wärmeleistung von ca. 105 MW sind mehr als 320 MW an reinen Wärmeerzeugern - typischerweise Heizkessel – installiert, so dass die gesamte thermische Leistung im Fernwärmenetzen bei über 430 MW liegt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Installierte elektrische und thermische KWK-Leistung sowie reine Wärmeerzeuger in Fernwärmenetzen

	KWK- Strom	KWK- Wärme	Strom- kennzahl	reine Wärmeer- zeuger	Wärme gesamt
	in kW	in kW		in kW	in kW
Sidor	17.500*	geplant (18.000)		geplant > 30.000	geplant > 40.000
kl. Heizzentralen (Kat. II)	85.130	105.100	0,81	> 320:000	> 430.000
Mikro-KWK (Kat. I)	919	1.670	0,55		
Biomasse	14.354	48.060	0,29		

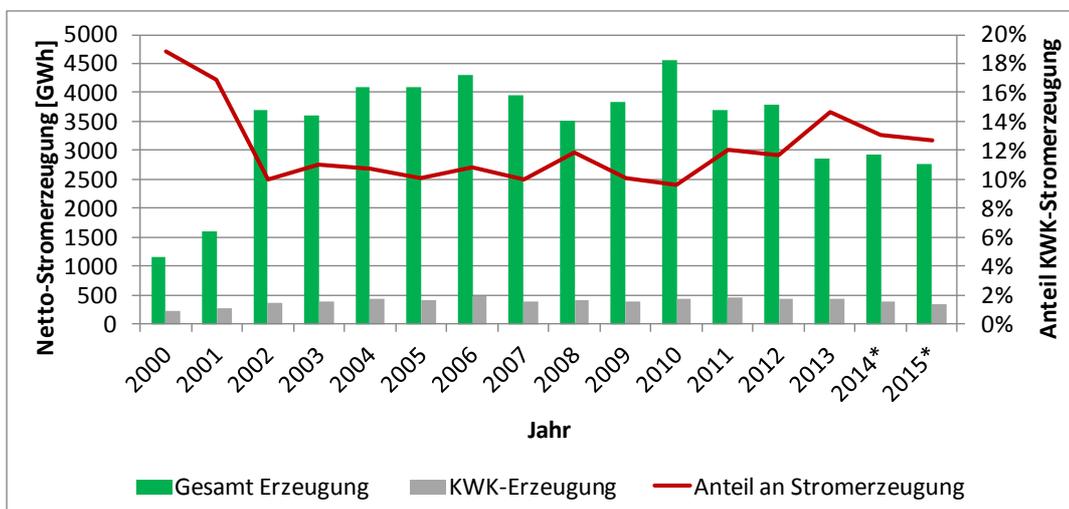
* ohne Wärmeauskopplung, Quelle: ILR 2016, WiMi Lux 2016

Unter Berücksichtigung der gekoppelten Wärmeleistung in Heizzentralen von ca. 106 MW sowie der industriellen KWK-Anlagen und TwinErg, die sich auf insgesamt ca. 800 MW summieren, wurden bei Eurostat im Jahre 2013 für Luxemburg ca. 900 MW an gekoppelter thermischer Leistung ausgewiesen. Dabei war der Anteil der TwinErg jedoch statistisch zu relativieren, da die zur Verfügung gestellte Wärmeleistung weniger als 5% der gesamten auskoppelbaren Wärmeleistung des Kraftwerks Twinerg betrug. Durch die Stilllegung der industriellen KWK-Anlagen (CEDUCO, CEGYCO) sowie der Twinerg reduziert sich die thermische KWK-Leistung sehr deutlich.

2.2 KWK-Stromerzeugung und Wärmeerzeugung

Die KWK-Erzeugung belief sich in 2013 auf ca. 424 GWh (Eurostat 2015) und lag in 2014 bei ca. 384 GWh (ILR 2016). Bedingt durch die Ausweisung der KWK-Erzeugung aus KWK-Anlagen bei Eurostat, die auch die ungekoppelte Stromerzeugung in diesen Anlagen enthält, ist eine exakte Abschätzung der Erzeugung für 2014 auf Basis der Eurostatdaten noch nicht möglich gewesen¹. Der Anteil der KWK-Stromerzeugung an der gesamten Stromproduktion in 2013 lag bei etwa 15 % und ist seit 2010 leicht angestiegen (siehe Abbildung 4). Dies ist allerdings zum Großteil auch auf eine rückläufige Gesamtstromproduktion bei annähernd gleich gebliebener KWK-Stromerzeugung zurückzuführen. Seitdem ist der Anteil als auch die absolute Menge an KWK-Strom zurückgegangen, da insbesondere industrielle Anlagen in ihrer Auslastung zunächst zurückgegangen sind und die Anlagen mittlerweile komplett stillgelegt worden sind.

Insgesamt zeigt sich, dass die KWK-Stromerzeugung in dem Zeitraum von 2005 bis 2010 auf einem Niveau zwischen 390 und 470 GWh lag und seit 2011 von ca. 450 GWh auf mittlerweile geschätzten 350 GWh/a in 2015 gesunken ist. Dies ist insbesondere auf den Rückgang bei den industriellen KWK-Anlagen zurückzuführen, die in 2015 nicht mehr in Betrieb waren.

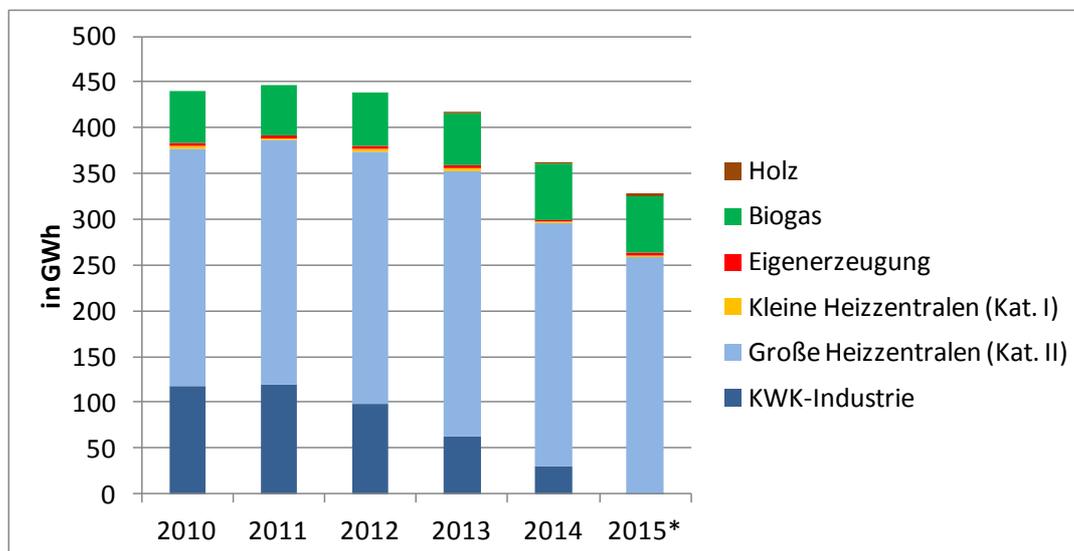


Quelle: Eurostat 2015, Statec A4203, ILR 2016

Abbildung 4: Gekoppelte Stromerzeugung aus KWK-Anlagen, Stromerzeugung gesamt und KWK-Anteil von 2000 bis 2014

¹ Stromerzeugung aus KWK-Anlagen (inkl. ungekoppelter Anteil) 1478 GWh (2013)/ 1534 GWh (2014)

Die Stromproduktion wurde historisch von den industriellen KWK-Anlagen und den kleinen Anlagen dominiert. Seit 2011 ist jedoch die industrielle KWK stark zurückgegangen und 2015 komplett stillgelegt worden (siehe Abbildung 5). Der Anteil der Biogas-KWK-Erzeugung lag in 2013 nur bei 13 % der gesamten KWK-Stromerzeugung bzw. bei ca. 56 GWh (Status 2014: 61 GWh) Damit erreichten die Biogasanlagen ca. 6200 Volllaststunden in 2013 und laufen daher deutlich länger als gasbasierte KWK-Anlagen. KWK-Anlagen auf Basis von Restholz erzeugten lediglich 0,2 GWh in 2013 bzw. ca. 1,8 GWh in 2014. Veröffentlichungen des ILR weisen für 2015 eine Stromerzeugung durch Biogas-KWK von 61,5 GWh aus. Für Stromerzeugungsanlagen auf Basis von Restholz lagen keine Angaben über die gekoppelte Erzeugung vor, so dass hier die Werte auf Basis des Vorjahrs geschätzt wurden.



Quelle: ILR 2016, Statec 4203

Abbildung 5: KWK-Stromerzeugung nach Anlagenarten von 2010 bis 2015

Zur Abschätzung der Wärmeerzeugung aus KWK-Anlagen wurden die Stromkennzahlen und Auslastungsdauern für 2015 geschätzt. Der KWK-Stromerzeugung von ca. 325 GWh steht damit eine Wärmeerzeugung von ca. 527 GWh gegenüber (siehe Tabelle 2). Diese werden insbesondere durch kleine Anlagen, die vor allem BHKWs umfassen, erzeugt. Industrielle KWK-Anlagen, die in der Gummiindustrie und in der chemischen Industrie eingesetzt wurden, sind mittlerweile stillgelegt worden. Im Bereich Biomasse fällt die Wärmeerzeugung im Verhältnis zur Stromerzeugung deutlich größer aus, was an dem Einsatz von Dampfturbinen zur Stromerzeugung im Bereich der Altholzverwertung liegt. Diese Anlagen haben nur sehr niedrige Stromkennzahlen und produzieren daher deutlich mehr Wärme als Strom.

Tabelle 2: Elektrische und thermische Leistung sowie Strom- und Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen nach Anwendungsbereichen für 2015

2015	Elektrische Leistung P(el) [kW]	Thermische Leistung P(th) [kW]	Anzahl	Auslastung Strom 2015 [h]	Strom MWh	Wärme MWh
KWK-TwinErg	376.000 Stilllegung 2016	k.A.			k.A.	k.A.
Sidor	17.500	bisher keine Wärme- auskopplung				
KWK-Industrie	Stilllegung in 2015 2014: 15.800	2014: 33.200	2			
Eigenverbrauch	2.560	3.500	1	1.624	4.159	5.686
kl. Heizzentralen (Kat. II)	85.130	105.100	87	3.033	258209	318.777
Mikro-KWK (Kat. I)	919	1.670	43	1.987	1.826	3.320
Biomasse	15.818	48.060	36	3.888	61.500	205.000
Summe (ohne / mit TwinErg/Sidor)	104.427 497.677	158.330	168		325.694	532.783
<i>nachrichtlich EUROSTAT 2013</i>	<i>507.000</i>	<i>912.000</i>			<i>424.000</i>	<i>938.000</i>

Quelle: Eurostat 2015, Statec A4203, ILR 2016

3 Ausgangsbasis und Rahmendaten

3.1 Energiebilanz Luxemburg

Ausgangsbasis für die Abschätzung der möglichen Wärmebedarfsdeckung durch KWK-Anlagen ist der aktuelle Endenergiebedarf in Luxemburg. Der Endenergiebedarf in Luxemburg lag in 2014 bei ca. 47 TWh, wovon ca. 7 TWh im Industriebereich, ca. 29 TWh im Verkehrsbereich und 10 TWh in allen anderen Bereichen verbraucht wurden (Tabelle 3). Ein Großteil des Endenergiebedarfs im Verkehr wird dabei durch Treibstoffexporte verursacht, welche in 2014 ca. 20 TWh ausgemacht haben. Für KWK Anlagen geeignete Sektoren sind insbesondere der Industriebereich und über eine Fernwärmeversorgung auch die Bereiche Haushalte und GHD.

Tabelle 3: Endenergiebilanz 2014 für die Sektoren Industrie, Verkehr und andere

	Endenergiebilanz Luxemburg 2014					
	Industrie	Verkehr	Landwirtschaft	Haushalte	GHD	Summe
	Angaben in GWh					
Strombedarf	3.175	123	40	942	1.948	6.227
Mineralöl; Erdöl	122	28.255	0	1.719	588	30.684
Erdgas	2.543	0	0	2.596	1.175	6.314
Feste Brennstoffe	615			6	0	621
Biomasse + Abfallbrennstoffe	507	812	30	270	26	1.644
Wärme	157	0	0	69	839	1.065
Summe	7.119	29.189	70	5.601	4.575	46.555

Quelle: Statec A4100

In der Endenergiebilanz wird als Energieträger auch Wärme ausgewiesen, die sämtliche Wärmebereitstellung über ein Wärmenetz umfasst. Darunter fällt neben der KWK-Wärmeerzeugung auch die ungekoppelte Wärmeerzeugung. Nicht erfasst wird dabei die KWK-Wärmeerzeugung, die im industriellen Bereich selbstverbraucht wird und nicht an andere Wärmenutzer über ein Wärmenetz abgegeben wird. Den größten Beitrag zum Endenergiebedarf liefert Wärme im Bereich GHD mit ca. 840 GWh, was einen Anteil von ca. 30 % des Endenergiebedarfes (exklusive Strom) ausmacht. Im Haushaltssektor und im Bereich Industrie liegt der Anteil mit deutlich unter 5 % sehr viel niedriger.

3.2 Technische und ökonomische Kenndaten von KWK-Anlagen

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen im industriellen Bereich und im Nah- und Fernwärmebereich werden einzelne Referenzanlagen definiert (siehe Tabelle 4 und Tabelle 5). Die Kosten der KWK-Technologien umfassen die Investition (einschließlich der technischen Peripherie und baulicher Maßnahmen), variable Betriebskosten (Brennstoffkosten, Hilfsstoffe) und fixe Betriebskosten (Personal, Verwaltung, Versicherung).

Tabelle 4: Technische und ökonomische Kenndaten von KWK-Anlagen der Leistungsklasse (1)

Kennzahlen	Einheit	GuD-HKW	GuD-HKW	GuD-HKW	GuD-HKW	BHKW	GT
Leistung [MW]	MW (el)	450	200	100	20	10	10
el. Wirkungsgrad	%	55	50	45	35	46	30
th. Wirkungsgrad	%	33	38	43	53	42	55
Wirkungsgrad gesamt	%	88	88	88	88	88	85
Investment inkl Planung	€/kW	1100	1200	1300	1300	700	800
Fixe Betriebskosten	€/kW/a	16	16	16	20	9	16
Variable sonstige Kosten	€/MWh	1,5	1,5	1,8	4	6	6

Quelle: Prognos AG, 2014

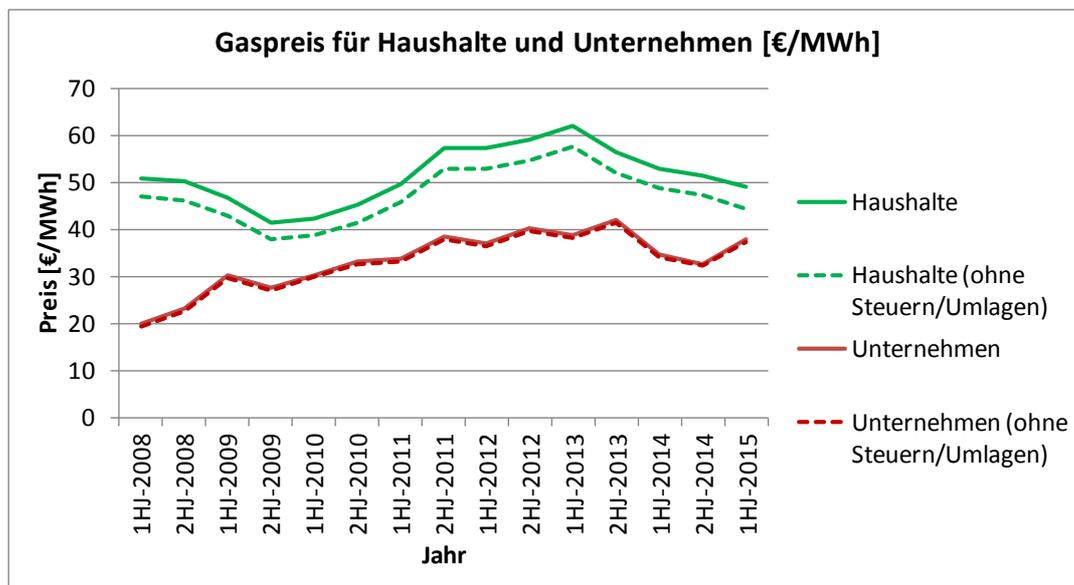
Tabelle 5: Technische und ökonomische Kenndaten von KWK-Anlagen der Leistungsklasse (2)

Kennzahlen	Einheit	DT	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW
Leistung [MW]	MW (el)	5	2	0,5	0,05	0,005	0,001
el. Wirkungsgrad	%	25	42	39	34	27	26
th. Wirkungsgrad	%	60	48	51	57	66	66
Wirkungsgrad gesamt	%	85	90	90	91	93	92
Investment inkl Planung	€/kW	1500	850	1300	2750	5300	15000
Fixe Betriebskosten	€/kW/a	10	10	15	30	110	280
Variable sonstige Kosten	€/MWh	8	9	13	25	40	60

Quelle: Prognos AG, 2014

3.3 Weitere Rahmendaten und Energieträgerpreisentwicklungen

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen bildet der Strom- und Gaspreis, den die jeweiligen Nutzer zu zahlen haben, die zentrale Grundlage. Der Endkundengaspreis ist in Folge der Wirtschaftskrise zunächst gefallen und seit 2010 bis 2013 auf ein Niveau von ca. 60 €/MWh gestiegen. Seit 2013 sind die Gaspreise für Endkunden wieder gefallen und liegen aktuell bei ca. 50 €/MWh (siehe Abbildung 6). Für Unternehmen liegen die Gaspreise auf Grund der höheren Abnahmemengen und geringerer Verteilkosten unterhalb des Haushaltsniveaus und erreichten im 1. Halbjahr 2015 ca. 37 €/MWh. Gleichzeitig fallen auch Umlagen und Steuern deutlich geringer aus als bei Haushalten.



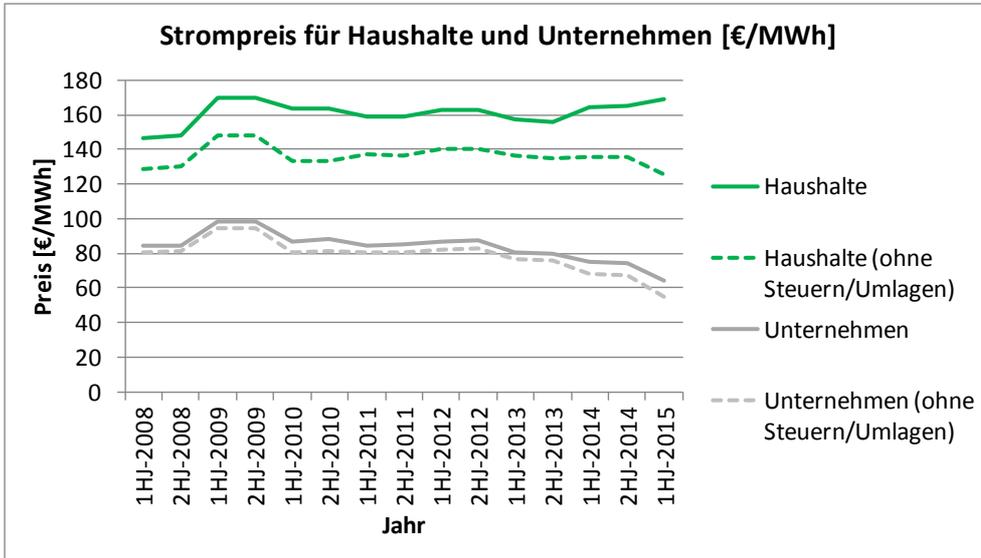
Quelle: Statec A4503

Abbildung 6: Entwicklung der Gaspreise für Haushalte und Unternehmen von 2008 bis 2015

Der Strompreis für Haushalte in Luxemburg lag über mehrere Jahren bei ca. 160 €/MWh und ist in 2015 auf Grund gestiegener Umlagen und Steuern leicht auf ca. 170 €/MWh gestiegen (siehe Abbildung 7). Für Unternehmen ist der Strompreis seit 2009 gefallen und lag 2015 bei ca. 64 €/MWh. Auch beim Strompreis fallen die Steuern/Umlagen für Unternehmen deutlich geringer aus als für Haushalte.

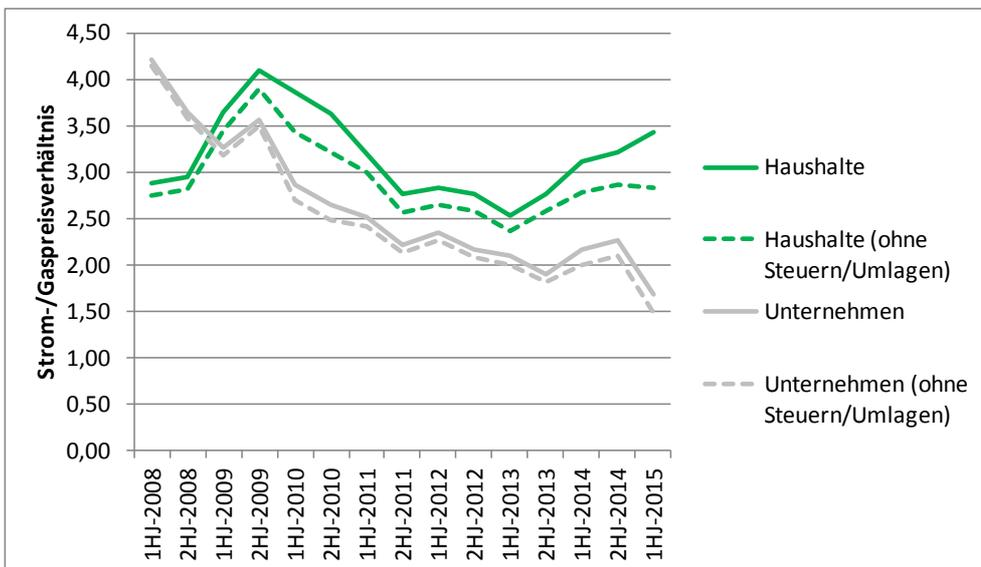
Für die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen, die Erdgas als Brennstoff einsetzen, ist das Verhältnis zwischen Gas- und Strompreisen entscheidend. Steigen die Strompreise stärker als die Gaspreise verbessert sich die Wirtschaftlichkeit von

erdgasbasierten KWK-Anlagen. Steigen nur die Gaspreise und die Strompreise bleiben konstant bzw. sinken sogar, wie es in den letzten Jahren in Luxemburg der Fall war, dann verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit von Erdgas-KWK-Anlagen (siehe Abbildung 8). Dies ist vor allem bei Unternehmen der Fall gewesen.



Quelle: Statec A4502

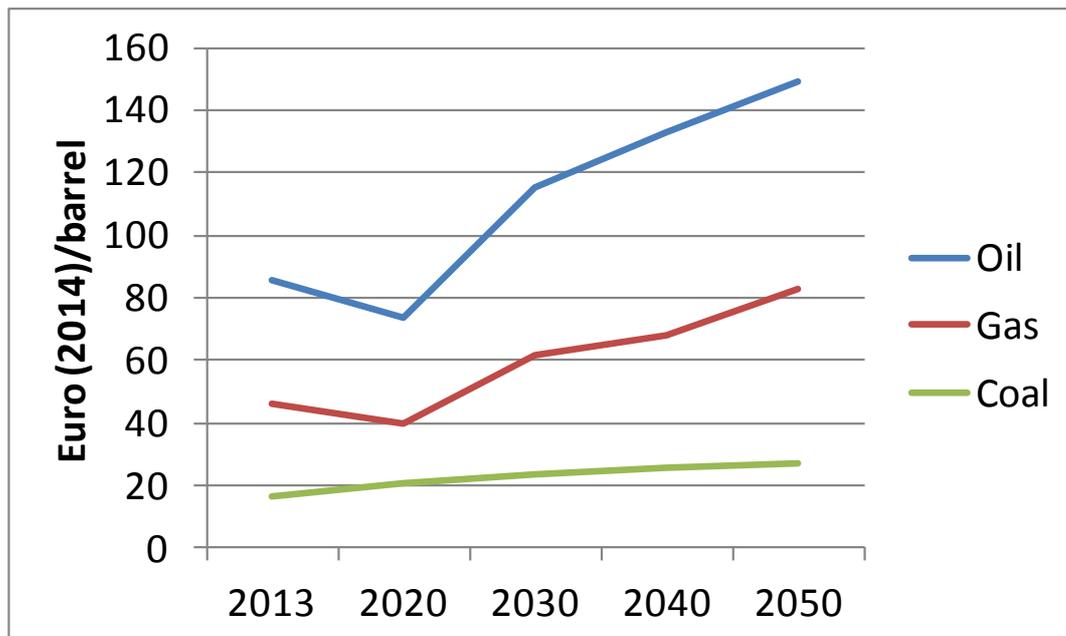
Abbildung 7: Entwicklung der Strompreise für Haushalte und Unternehmen von 2008 bis 2015.



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von Statec A4502/3

Abbildung 8: Entwicklung des Verhältnisses Strom- zu Gaspreis für Haushalte und Unternehmen von 2008 bis 2015

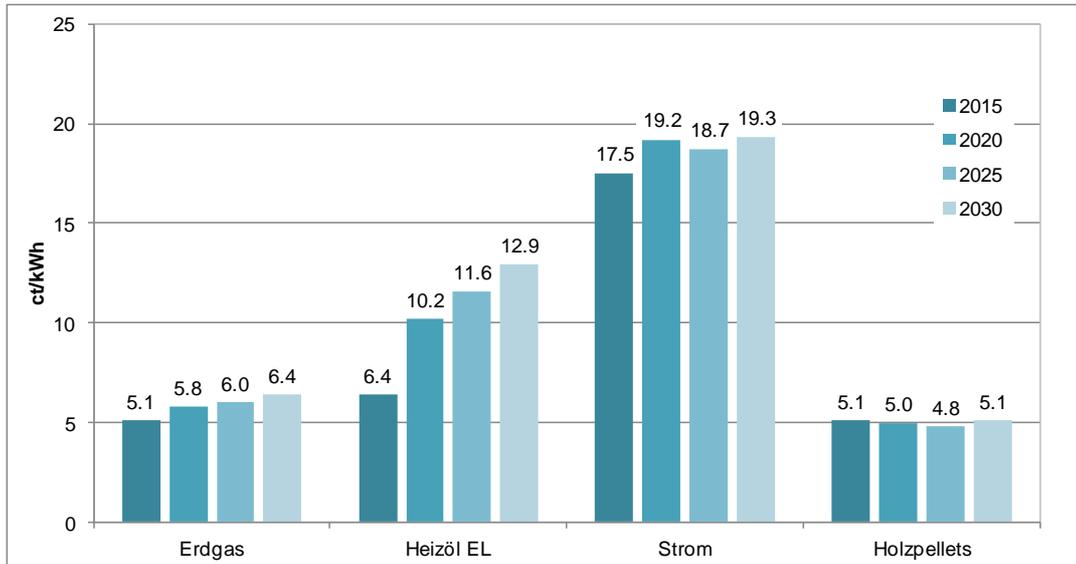
Für die zukünftige Entwicklung der Energieträgerpreise wird auf das Szenario des IEA World Energy Outlook 2015 (WEO 2015) und Berechnungen der EU Kommission (Primes 2014) aufgesetzt und mit mittelfristig steigenden Energieträgerpreisen (siehe Abbildung 9) und Preisen für Emissionszertifikate gerechnet (EUA: 31 €/t in 2030, 87 €/t in 2050).



Quelle: angelehnt an WEO 2015, Primes 2014

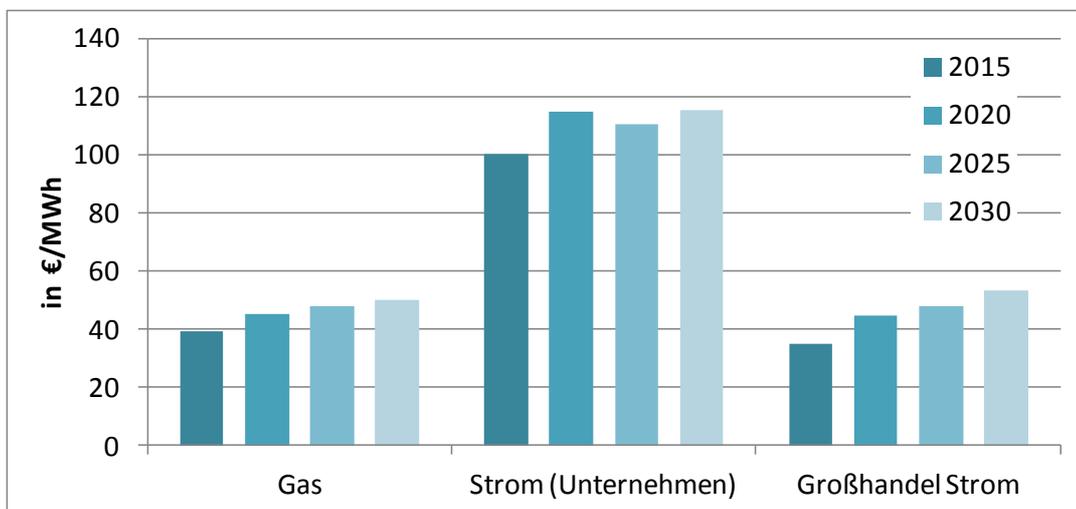
Abbildung 9: Entwicklung der Energieträgerpreise (Grenzübergang) bis 2050

Die Entwicklung der Strompreise auf Endkundenebene wird in Anlehnung an das Referenzszenario der EU Kommission abgeleitet (Primes 2014). Die Preise für Haushaltskunden steigen für 2030 bis auf 193 €/MWh (Abbildung 10) und für Industriekunden auf 115 €/MWh (siehe Abbildung 11) jeweils mit Steuern und Abgaben.



Quelle: Quelle: angelehnt an WEO 2015, Primes 2014

Abbildung 10: Angenommene Energiepreisentwicklung für Haushaltskunden bis zum Jahr 2030



Quelle: Quelle: angelehnt an WEO 2015, Primes 2014

Abbildung 11: Entwicklung der Gas und Strom für Unternehmen sowie des Stromgroßhandelspreises

3.4 Aktuelle Maßnahmen zur Förderung der KWK

Die aktuellen Förderbedingungen umfassen derzeit folgende Gesetze und Verordnungen, nach denen KWK-Anlagen unterstützt bzw. gefördert werden können:

1. Einspeisetarife für Anlagen, die aus erneuerbaren Energien gespeist werden: « *Règlement grand-ducal du 1^{er} août 2014 relatif à la production d'électricité basée sur les sources d'énergie renouvelables* » (RGD 2014);
2. Einspeisetarife für Anlagen auf Basis fossiler Energieträger: « *Règlement grand-ducal du 26 décembre 2012 relatif à la production d'électricité basée sur la cogénération à haut rendement* » (RGD 2012);
3. Investitionsbeihilfen auf Gemeindeebene: « *Loi modifiée du 31 mai 1999 portant institution d'un fonds pour la protection de l'environnement* » (FPE 1999).

Zu 1.

Für die Einspeisung von Wärme aus Biogas bzw. fester Biomasse erhalten die Anlagen eine Vergütung der Wärme von 30 €/MWh, wenn Mindestabsatzquoten für die Wärmeabgabe eingehalten werden. Diese liegen zwischen 25 % (1. bis 3. Jahr) und 50 % (ab dem 4. Jahr) für Biogas-Anlagen und bei 35 % bzw. 75 % für feste Biomasse. Zusätzlich wird auch die erzeugte Strommenge gefördert (RGD 2014). Des Weiteren kann bei Erfüllung niedrigerer Mindestabsatzquoten (40% beziehungsweise 65% ab dem 4. Jahr) eine abgeminderte Wärmepremie von 15 €/MWh erhalten werden.

Zu 2.

Für Bestandsanlagen, die bis zum 1. Juli 2014 in Betrieb gegangen sind, besteht eine Förderung der erzeugten Strommenge, die für Anlagen der Kategorie 1 (1 bis 150 kW) bei 7,3 Cent/kWh liegt. Größere Anlagen der Kategorie II (150 kW - erhalten eine Förderung von 7 Cent/kWh, wenn sie zwischen 6 Uhr und 22 Uhr (Vergütung Tag) einspeisen und 3 Cent/kWh in den übrigen Stunden (Vergütung Nacht). Auch für Kategorie II gilt die Förderung nur für Anlagen, die vor dem 1. Juli 2014 in Betrieb gegangen sind. Abweichend davon erhalten Anlagen, die vor dem 1. Juli 2013 in Betrieb gegangen sind eine niedrigere Vergütung am Tag von 5,7 Cent/kWh (Vergütung Tag), aber zusätzlich eine Leistungsvergütung von 111,55 €/kW pro Jahr. Die Förderdauer besteht ab dem Zeitpunkt der ersten Einspeisung dann über einen Zeitraum von 20 Jahren. Sowohl die Arbeitspreise als auch die Leistungspreise (nur Kategorie II) werden an die Inflation und die Entwicklung des Gaspreises angepasst.

Zu 3.

Für Kommunen können Investitionsbeihilfen von bis zu 30 % aus dem Fonds für Umweltschutz gegeben werden, wenn sie eine Nahwärmezentrale auf Basis erneuerbarer Energien installieren (« *Circulaire n° 3178 aux administrations communales, aux syndicats de communes, aux établissements publics placés sous la surveillance des communes* », FPE 1999).

Aktuell bestehen für KWK-Neuanlagen damit nur Förderansprüche, wenn sie erneuerbare Energien als Brennstoff einsetzen. KWK-Anlagen auf Basis fossiler Brennstoffe, insbesondere auf Basis von Erdgas, werden nur als Bestandsanlagen gefördert. Neu-Anlagen sind von der Förderung ausgeschlossen.

4 Beschreibung des Wärme- und Kältebedarfs und des Gebäudebestandes

Aus der Energiebilanz ist der Primär- und Endenergieverbrauch nach den Sektoren private Haushalte, Industrie und dem tertiären Sektor einschließlich Landwirtschaft bekannt. Für die Untersuchung des KWK-Potenzials ist jedoch eine Aufschlüsselung nach Anwendungen erforderlich, um den Wärmebedarf zu ermitteln (Abbildung 12).

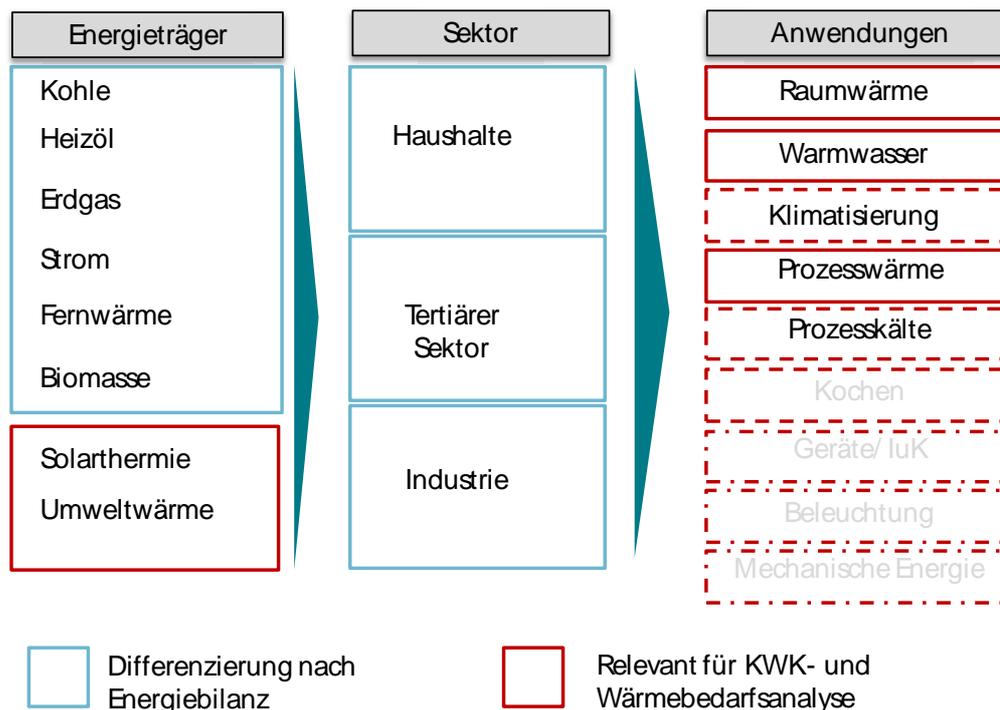
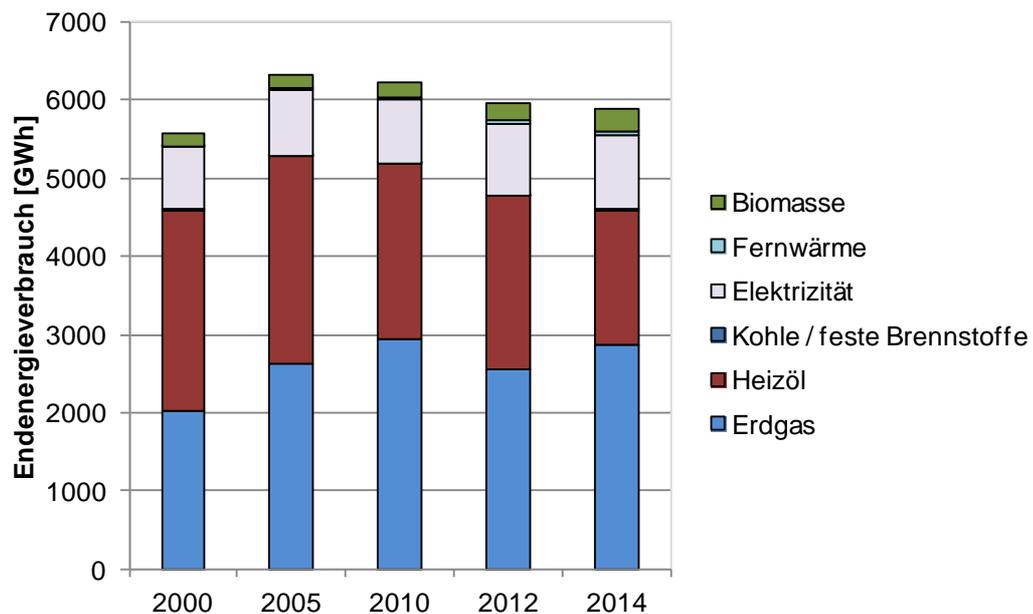


Abbildung 12: Zusammenhang Endenergiebilanz und relevante Anwendungsgrößen der Wärmebedarfsanalyse

4.1 Wärme- und Kältebedarf im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich

Die Abgrenzung des Wärmebedarfs der Gebäude ergibt sich aus dem Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser. In einer sektoralen Abgrenzung lässt sich dieser aus dem Energiebedarf der privaten Haushalte und des tertiären Sektors ableiten. Im Industriesektor ist hingegen eine Abgrenzung zwischen Raum- und Prozesswärmebedarf nur bedingt möglich, weswegen diese im folgenden Kapitel zusammen dargestellt werden. Abbildung 13 zeigt zunächst die Entwicklung des gesamten Endenergiebedarfs der privaten Haushalte. Die Entwicklung des

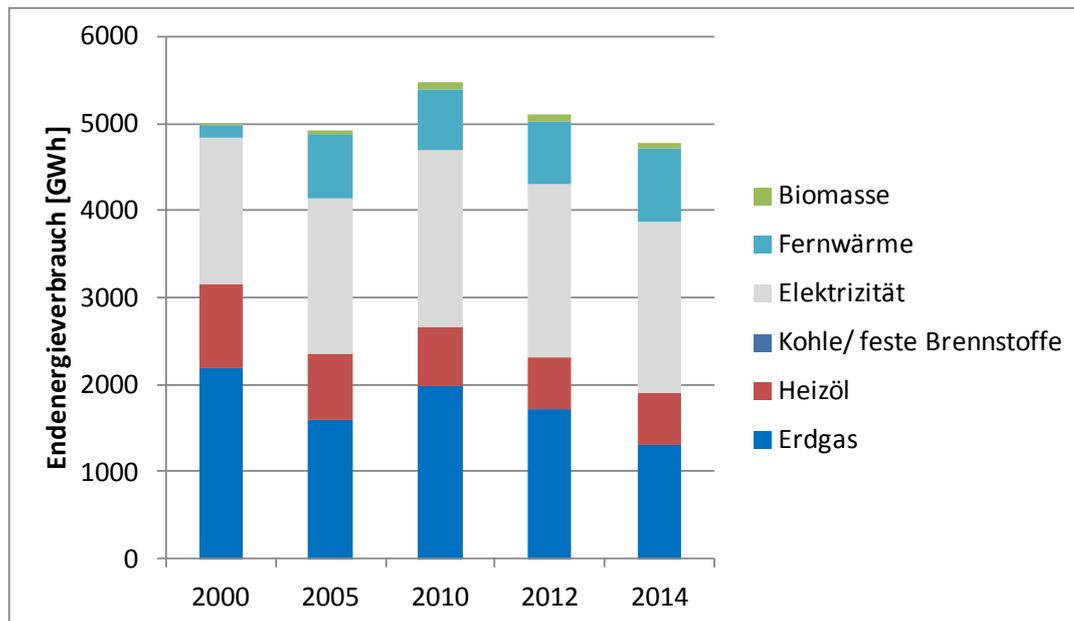
Endenergiebedarfs zeigt in den dargestellten Jahren einen rückläufigen Trend. Dies ist zum einen auf eine Steigerung der Gebäudeeffizienz und eine Verbesserung der Wärmeversorgungstechnologien zurückzuführen. Darüber hinaus sind auch die klimatischen Bedingungen in den jeweiligen Jahren zu berücksichtigen, die zu einer Veränderung des Endenergiebedarfs beitragen. Insgesamt entfielen im Jahr 2014 5,9 TWh auf den Endenergieverbrauch der privaten Haushalte, wobei der Anteil der Nah- und Fernwärme daran nur 1,2 % betrug.



Quelle: Statec (2015)

Abbildung 13: Entwicklung des Endenergiebedarfs der privaten Haushalte

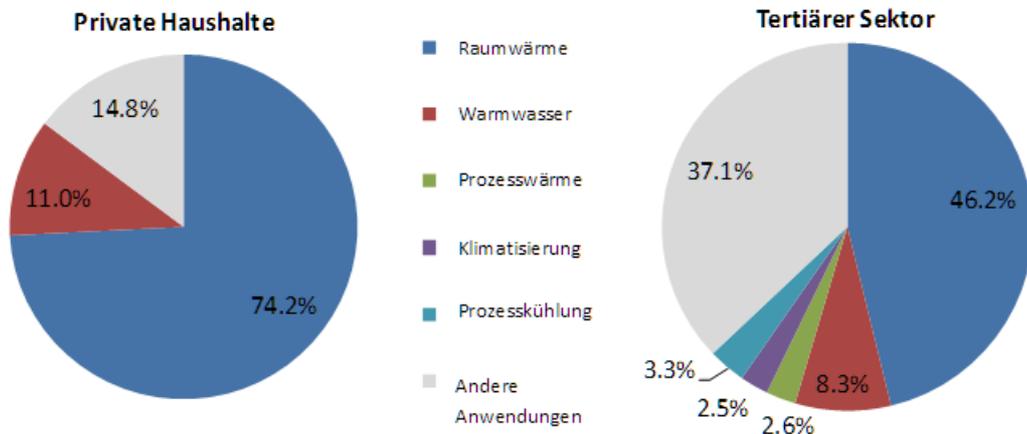
Mit 17,5 % ist der Anteil der Nah- und Fernwärmeversorgung im tertiären Sektor hingegen wesentlich höher (Abbildung 14). Insgesamt betrug der Endenergiebedarf im tertiären und Landwirtschaftssektor 4,8 TWh im Jahr 2014, wovon ca. 0,8 TWh durch Nah- und Fernwärme bereitgestellt wurden.



Quelle: Statec (2015)

Abbildung 14: Entwicklung des Endenergiebedarfs im tertiären und Landwirtschaftssektor

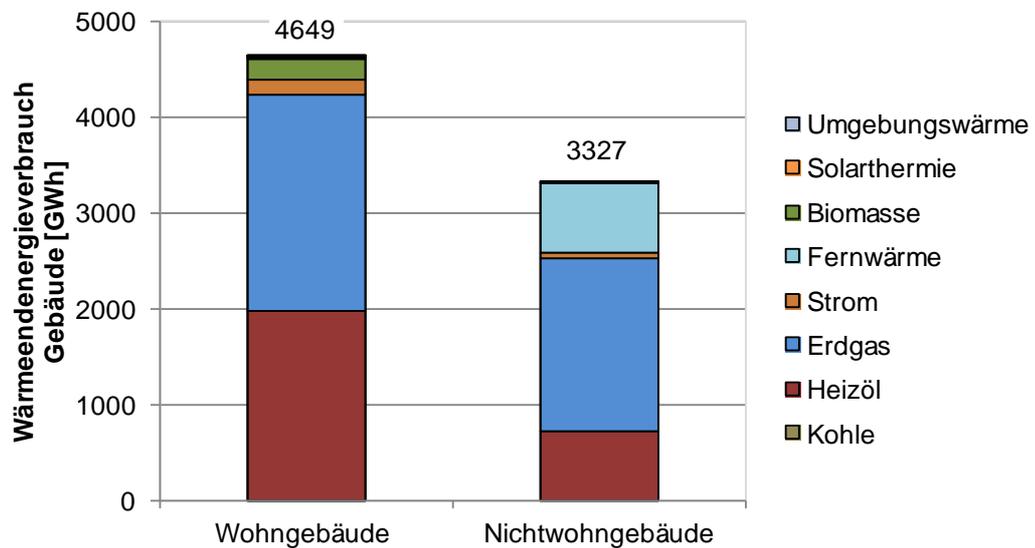
Eine Differenzierung des Endenergiebedarfs nach den einzelnen Anwendungsbereichen, die für die Wärmebedarfsentwicklung relevant sind, wird im Rahmen des Projektes „Mapping EU heating and cooling supply“ für das Jahr 2012 für alle EU Länder vorgenommen (Fleiter, Steinbach, Ragwitz et al. 2016). Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass rund 85 % des Endenergieverbrauchs der privaten Haushalte auf die Wärmebereitstellung (Raumwärme und Warmwasser) entfällt (siehe Abbildung 15). Im tertiären Sektor entfällt mit 54,5 % ein weitaus geringerer Anteil auf die Wärmebereitstellung in Gebäuden. Der Prozesswärme- und Kältebedarf spielt im Gegensatz zum Industriesektor mit rund 2,6 % eine untergeordnete Rolle.



Quelle: Fleiter, Steinbach, Ragwitz et al. (2016)

Abbildung 15: Anwendungsbilanz des Wärme- und Kältebereichs in Luxemburg im Jahr 2012

Abbildung 16 zeigt den Wärmeendenergiebedarf der Wohn- und Nichtwohngebäude (ohne Gebäude des Industriesektors) in Luxemburg nach Energieträgern. Dieser wird für die weitere Modelluntersuchung als Ausgangswert für die Szenarien des KWK-Potenzials angesetzt.

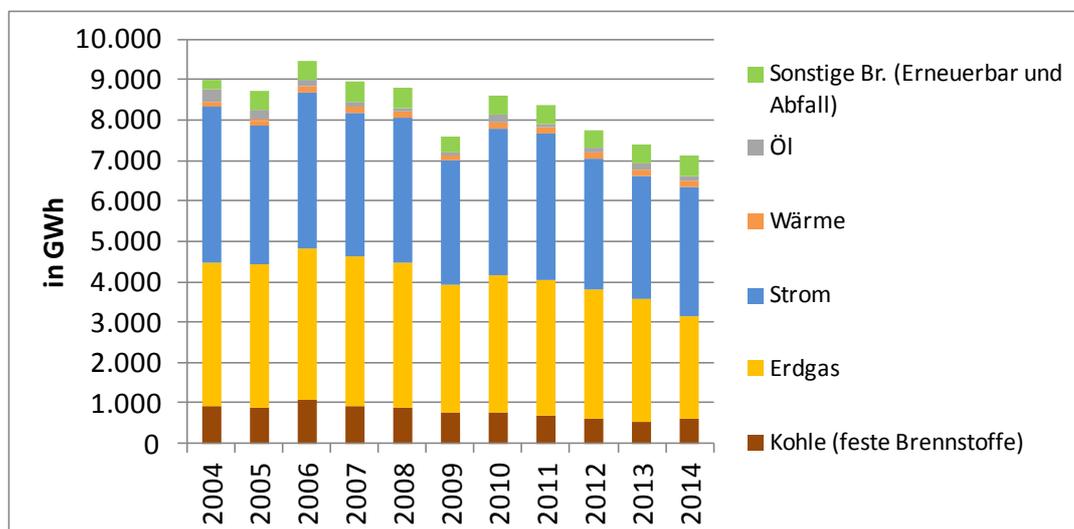


Quelle: Fleiter, Steinbach, Ragwitz et al. (2016)

Abbildung 16: Wärmebedarf in Wohn- und Nichtwohngebäuden nach Energieträgern für das Jahr 2012

4.2 Wärmebedarf des Industriesektors

Ausgangspunkt für die Abschätzung des Wärmebedarfs in der Industrie ist der Endenergiebedarf in diesem Sektor. Der Endenergiebedarf² in der Industrie machte 2014 ca. 15% des gesamten Endenergiebedarfs Luxemburgs aus und lag bei 7.119 GWh (Statec A4100). Im Industriebereich werden hauptsächlich Erdgas und Strom eingesetzt. Der Anteil Kohleerzeugnisse hat sich innerhalb der letzten 14 Jahre reduziert und machte 2014 nur noch ca. 8 % des Endenergiebedarfs aus. Während der Wirtschaftskrise in 2009 ist der Endenergiebedarf in der Industrie deutlich gesunken und hat sich danach kurzzeitig stabilisiert (Abbildung 17). Seit 2010 fällt der Endenergiebedarf kontinuierlich und ist in 2013 unter das Niveau von 2009 gefallen.



Quelle: Energiebilanz, Statec A4100

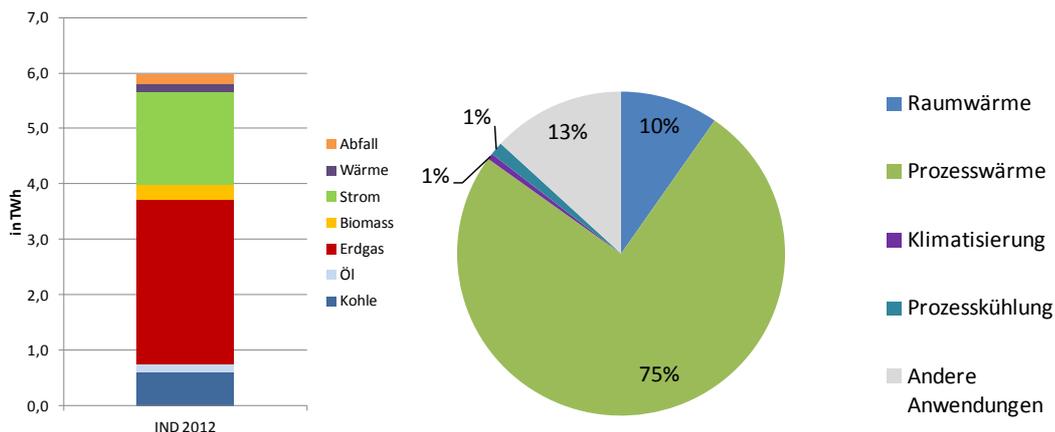
Abbildung 17: Entwicklung des Endenergiebedarfs in der Industrie von 2004 – 2014

Lediglich ein geringer Anteil des Endenergiebedarfs wird nicht für Wärmeanwendungen eingesetzt. Dies betrifft vor allem den Einsatz von Strom in der Industrie. Eine Abschätzung der Anwendungsarten sowie der eingesetzten Brennstoffe für Wärme erfolgte im Rahmen des Projektes „Mapping EU heating and cooling supply“ für das Jahr 2012 für alle EU Länder, darunter auch Luxemburg (Fleiter, Steinbach, Ragwitz et al. 2016). Ein Großteil des Endenergieeinsatzes in der Industrie wird für Prozesswärme eingesetzt. Raumwärme hat einen Anteil von ca. 10 % des Endenergiebedarfs der Industrie (siehe Abbildung 18).

² ohne Endenergiebedarfsanteil für Transport, der dem Industriebereich zugeordnet wird

Der Endenergiebedarf der Industrie wird damit bis auf einen Anteil des Strombedarfs fast ausschließlich zur Wärmebereitstellung eingesetzt. Der dominierende Energieträger zur Deckung des brennstoffbasierten Wärmebedarfs ist Erdgas mit ca. 3.200 GWh. In 2012 wurden ca. 1.700 GWh Strom zur Wärmebereitstellung verwendet, die zum Großteil in der Stahlindustrie für Prozesswärme in Elektrolichtbogenöfen eingesetzt wurden. Die Nutzung von Wärme aus netzgebundenen KWK-Anlagen lag in der Industrie nach Angaben der Energiebilanz in 2012 bei 134 GWh Endenergie.

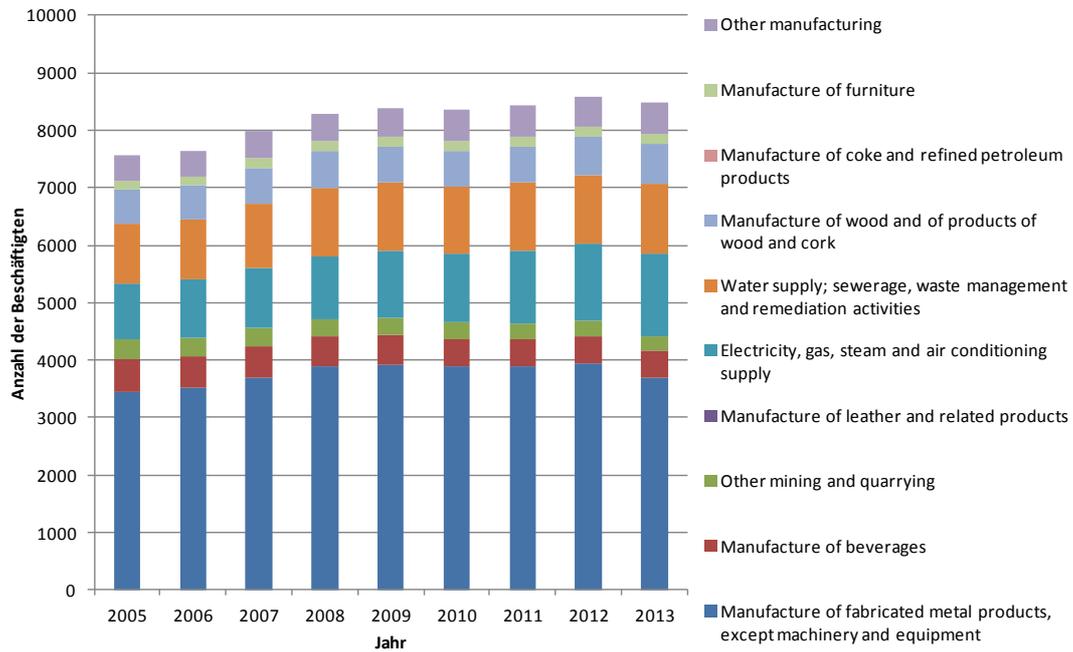
Für die Berechnung des Wärmebedarfs in der Industrie wird in Anlehnung an den „Dritten Nationalen Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg“ (Ministère de L'Économie, 2014) der Brennstoffbedarf (Gesamter Endenergiebedarf abzüglich Endenergiebedarf Strom) als Basis genommen und mit einem Primärenergiefaktor von 1 belegt. Damit ergibt sich auf Basis der neusten Energiebilanzen für die Industrie in 2014 ein brennstoffbasierter Wärmebedarf von 3.944 GWh und damit etwa 250 GWh weniger als 2012.



Quelle: Fleiter, Steinbach, Ragwitz et al. (2016)

Abbildung 18: Energieträger und Anwendungsarten des Wärmebedarfs in der Industrie 2012

Für die zukünftige Abschätzung des Wärmebedarfs in der Industrie sind die jeweiligen Beschäftigtenzahlen im Industriebereich der Indikator. Neben der Bauindustrie sind die meisten Beschäftigten in der Stahl und Metallindustrie tätig (siehe Abbildung 19). Weitere wichtige Branchen sind die Ernährungs-, Gummi und Kunststoffindustrie.



Quelle: Statec 2013

Abbildung 19: Entwicklung der Beschäftigtenzahlen im Industriesektor von 2005 - 2013

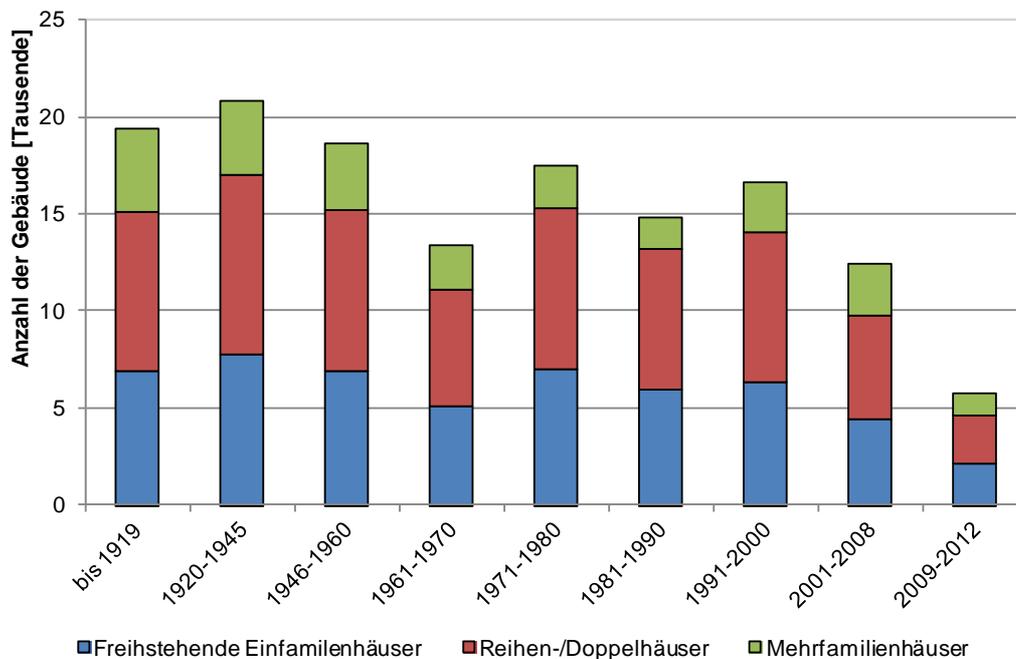
4.3 Beschreibung des Gebäudebestandes in Luxemburg

Das Potenzial für die Anwendung von KWK-Technologien, sowohl als dezentrale als auch zentrale Technologien in Wärmenetzen hängt maßgeblich von der Entwicklung des Wärmebedarfs und der Wärmedichten im Gebäudebereich ab. Für die Potenzialberechnung ist es daher essentiell, den Gebäudebestand möglichst detailliert auf Ebene der individuellen Gebäude als auch hinsichtlich der regionalen Verteilung der Gebäude abzubilden. Tabelle 6 zeigt die zur Verfügung stehenden Datenquellen mit denen eine Gebäudetypologie für Luxemburg erstellt wird. Eine detaillierte Analyse des Gebäudebestandes und die Aufstellung einer Gebäudetypologie werden in dem gerade laufenden Vorhaben « Szenarien des zukünftigen Energiebedarfs des Gebäudeparks Luxemburgs » durchgeführt. Die Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie noch nicht vor.

Tabelle 6: Verwendete Datenquellen zur Ableitung der Gebäudetypologie

Daten	Differenzierung Gebäude	Regionale Auflösung	Quelle
Gebäudeanzahl	WG-Typen und Baualtersklasse	Gemeindeebene	(Statec, 2016a, 2016b, 2011a)
Wohnfläche	WG-Typen	Gemeindeebene	(Statec, 2016c)
Verwendete Heizenergie	WG-Typen	Gemeindeebene	(Statec, 2016d)
Wohnflächen	WG-Typen und Baualtersklasse	Luxemburg	(Statec, 2011b)
Neubauten: Anzahl, Gebäudevolumen, Fläche	WG-Typen, NWG-Typen	Luxemburg	(Statec, 2016e)
U-Werte	Baualtersklasse	Luxemburg (teilweise Analogien)	ENTRANZE / LuxEeB (Atanasiu et al., 2014; Markus Lichtmeß, 2008; Schimschar et al., 2010b; Sebi et al., 2013)
Grundflächen, Gebäudeanzahl	WG, NWG-Typen mit Nutzungsarten	Georeferenzierte Hausumringe	(GeoPortal Luxemburg, 2016)

Diese wird einerseits für die Modellierung des zukünftigen Wärmebedarfs, andererseits auch zur Ermittlung der „Plot-Ratio“ verwendet. Abbildung 20 zeigt die Anzahl der Wohngebäude nach Gebäudetyp und Baualtersklasse aggregiert für ganz Luxemburg. Grundlage der Daten stellen die offiziellen Statistiken der Wohngebäude dar.



Quelle: Eigene Berechnung basierend auf Statec

Abbildung 20: Anzahl Wohngebäude nach Gebäudeklassen

Die Datenlage für Wohngebäude ist wie in fast allen Ländern besser als für Nichtwohngebäude. Allerdings stehen mit den offiziellen Hausumringen des Katasteramtes eine umfangreichen Gliederung der Nichtwohngebäude als georeferenzierte Daten zur Verfügung, die im Rahmen des Projektes über das nationale Geoportal von Luxemburg zur Verfügung gestellt werden (GeoPortal Luxemburg, 2016). Daraus lassen sich die Anzahl und Grundflächen gegliedert nach unterschiedlichen Nichtwohngebäudetypen ermitteln (siehe Tabelle 7). Zur Berechnung der Bruttogrundflächen der Gebäude werden Annahmen zu den durchschnittlichen Vollgeschossen gemacht, die überwiegend auf Klauß (2010) basierend.

Tabelle 7: Ermittelte Nichtwohngebäudeflächen aus Katasterdaten

Gebäude	Grundfläche [1000 m ²]*	Anzahl Gebäude	Anzahl Voll- geschosse**	Ge- schossflä- che [1000 m ²]
Industrie- und Gewerbegebäude	7038	4722	1,0	7038
Landwirtschaftsgebäude	4557	7238	1,6	7092
Handel-, Verkaufsgebäude	1613	1217	1,0	1613
Ausbildungsgebäude (Schulen, Universitäten..)	993	810	2,5	2482
Büro- und Verwaltungsgebäude	537	694	4,5	2406
Öffentliche Gebäude	518	1336	4,5	2332
Sportanlagen	435	212	1,0	435
Krankenhäuser/ Gebäude des Gesundheitssektors	338	422	4,5	1522
Kirchen- und Sakralbauten	204	824	1,0	204
Veranstaltungsgebäude	194	264	1,5	291
Gemeinschaftsunterkünfte	175	451	3,0	525
sonstige Gebäude	80	244	3,0	241
Gebäude für öffentliche Bereitschaftsdienste	73	164	2,0	146
Kulturgebäude	52	89	4,5	233
<i>Thermisch nicht konditioniert</i>	<i>1015</i>	<i>20131</i>		

Quelle: *Geoportal Luxemburg (2016) Auswertung Katasterdaten BD-L-TC;**Eigene Annahmen basierend auf (Klauß, 2010)

Neben den Gebäudeflächen und Nutzungsarten wird der Wärmebedarf maßgeblich durch die Qualität der Gebäudehülle bestimmt. In der Modellierung werden die Gebäudekomponenten über spezifische Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) beschrieben (siehe Tabelle 8). Dazu wird auf die ENTRANZE Datenbank zurückgegriffen, die über typische U-Werte der einzelnen Komponenten für unterschiedliche Baualtersklassen in den einzelnen EU Mitgliedsländern verfügt (www.entranze.eu). Für den neueren Gebäudebestand seit 2008 kann auf die entsprechenden Anforderungen der Wärmeschutzverordnung und Energieeinsparverordnung zurückgegriffen werden, aus denen sich typische U-Werte für die Gebäudekomponenten ergeben.

Tabelle 8: U-Werte für Gebäudekomponenten von Wohngebäuden seit 1995

Verordnung / Effizienzklasse	Baujahr	Wand	Dach	Boden	Fenster
WSV95	1995 - 2007	0,40	0,30	0,50	2,00
LuxEeB Klasse D	2008 - 2012	0,32	0,25	0,40	1,50
LuxEeB Klasse C	2012 - 2014	0,26	0,23	0,36	1,25
LuxEeB Klasse B	2015 - 2016	0,19	0,14	0,24	1,00
LuxEeB Klasse A	Ab 2017	0,13	0,11	0,17	0,90
Renovierung		0,32	0,25	0,40	1,50

Quelle: auf Basis von (Markus Lichtmeß and Knissel, 2014; Markus Lichtmeß, 2008; Schimschar et al., 2010a)

4.4 Ermittlung der Geschossflächenzahl pro Gemeinde

Die Bewertung des nationalen Wärme- und Kälteversorgungspotenzials für wärmenetzbasierte Versorgung und den Einsatz von KWK soll entsprechend der Energieeffizienzrichtlinie (Anhang VIII) eine Darstellung der „Wärme- und Kältebedarfs“ Punkte enthalten. Darunter zählen Gemeinden die eine Geschossflächenzahl von mindesten 0,3 aufweisen. Die Geschossflächenzahl (Plot ratio) ist folgendermaßen definiert:

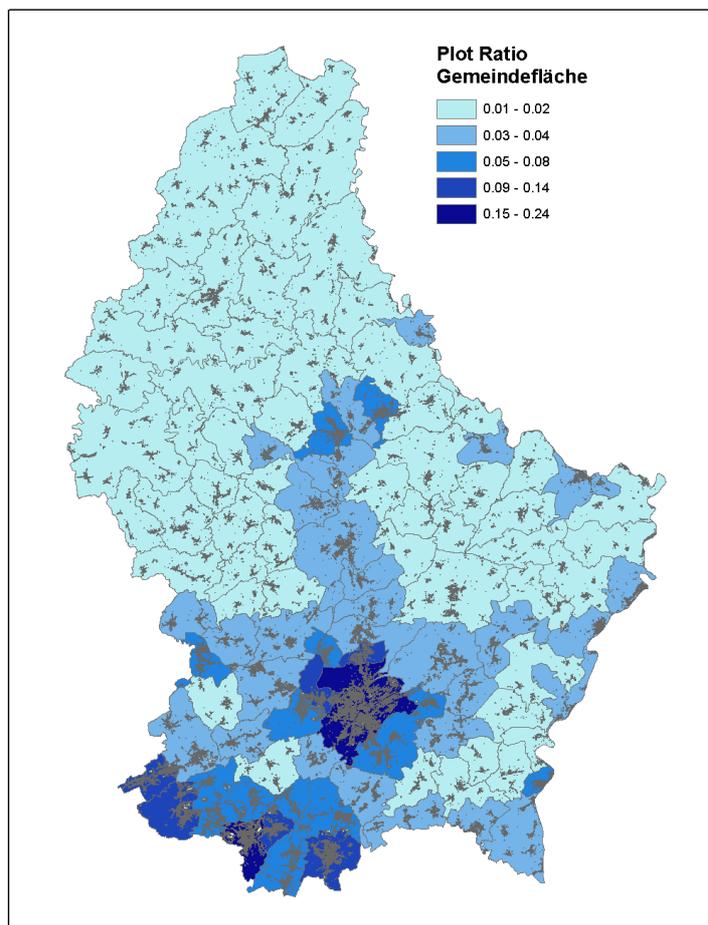
$$\frac{\text{Geschossfläche}}{\text{Grundstücksfläche}} > 0.3$$

Die Geschossfläche setzt sich aus den Außenmaßen des Gebäudes in allen Vollgeschossen zusammen (§20 BauNVO). Wichtig ist dabei der Begriff der Vollgeschosse, mit dem die Geschossfläche zur Brutto-Grundfläche nach DIN 277 abgegrenzt ist. Diese enthält die Grundflächen aller Geschosse. Das Verhältnis von Wohn- zu Geschossfläche kann in dieser systemischen Betrachtung jedoch näherungsweise mit den typischen Umrechnungsfaktoren zwischen Wohn- und Brutto-Grundfläche angesetzt werden. Die Geschossflächen werden mit Hilfe der dargestellten Daten und Auswertungen für die einzelnen Gemeinden ermittelt.

Für die Wohngebäude werden diese aus den durch STATEC erfassten spezifischen Wohnflächen pro Gemeinde und Gebäudeart ermittelt. Für die Umrechnung von Wohnfläche auf Geschossfläche wird ein Faktor von 1,6 für Einfamilienhäuser und 1,7

für Mehrfamilienhäuser angesetzt. Die Geschossfläche der Nichtwohngebäude wird aus der Grundfläche, die aus der Auswertung der GIS-Daten berechnet wird, sowie den Annahmen zur spezifischen Vollgeschossanzahl berechnet (vgl. Tabelle 7). Während die Grundflächen somit pro Gemeinde vorliegen, wird die spezifische Vollgeschossanzahl zwar nach Nichtwohngebäudetyp differenziert, jedoch nicht nach Gemeinde. Als Bezugsfläche der Gemeinde (Grundstücksfläche der Gemeinde) kann die Gemeindefläche angesetzt werden. Allerdings beinhaltet dies auch zu einem großen Anteil Flächen, die nicht als Siedlungs-, Industrie- und Gebäudefläche dienen, wie beispielsweise Wald- und Ackerbaufläche.

Die Auswertung zeigt, dass die Plot-Ratio mit den gewählten Kennzahlen in keiner Gemeinde über 0,24 liegt. Die höchsten Kennwerte ergeben sich für die Gemeinden Luxemburg und Esch-sur-Alzette im Süden (siehe Abbildung 21).



Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von GeoPortal Luxemburg (2016)

Abbildung 21: Ergebnisse für die Geschossflächenzahl mit Gemeindefläche als Bezugsfläche

5 Potenzialabschätzung für dezentrale KWK-Anlagen in Gebäuden

5.1 Entwicklung des Wärmebedarfs in Gebäuden bis 2030

Das wirtschaftliche Potenzial für den Einsatz von KWK-Anlagen und wärmenetzbasierter Versorger hängt maßgeblich von der Entwicklung der Sanierungsaktivität im Gebäudesektor und damit der Entwicklung des Wärmebedarfs ab. Die zukünftige Entwicklung des Nutz- und Endenergiebedarfs wird mit dem bottom-up Simulationsmodell Invert/EE-Lab gerechnet. Grundlage für die Berechnung stellt die Abbildung des Gebäudebestandes in Referenzgebäuden dar. Als Basisjahr für die Simulation wird das Jahr 2012 angesetzt, auf welches der Energiebedarf im Gebäudebereich kalibriert wird (vgl. 4.1). Der Simulationszeitraum für das Szenario ist vom Jahr 2013 bis zum Jahr 2030. Für eine ausführliche Modellbeschreibung sei auf den Anhang verwiesen.

Die Entwicklung des Wärmebedarfs hängt dabei insbesondere von folgenden Parametern ab:

- Klimatische Einflüsse – Entwicklung der Durchschnittstemperaturen
- Entwicklung der Neubaurate
- Entwicklung der energetischen Sanierungsrate (Wie häufig wir saniert)
- Umsetzung der Sanierungstiefen (Auf welchen Standard wird saniert)

Während die ersten beiden Punkte exogen für die Simulation vorgegeben werden, stellen die Entwicklung der Sanierungsraten und -tiefen ein Modellergebnis dar.

Abbildung 22 stellt die durchschnittlichen Monatstemperaturen der Jahre 2012 bis 2016 dar. Für den Simulationszeitraum bis zum Jahr 2030 wird ein Referenzklima basierend auf den Außentemperaturen des Jahres 2012 angesetzt.

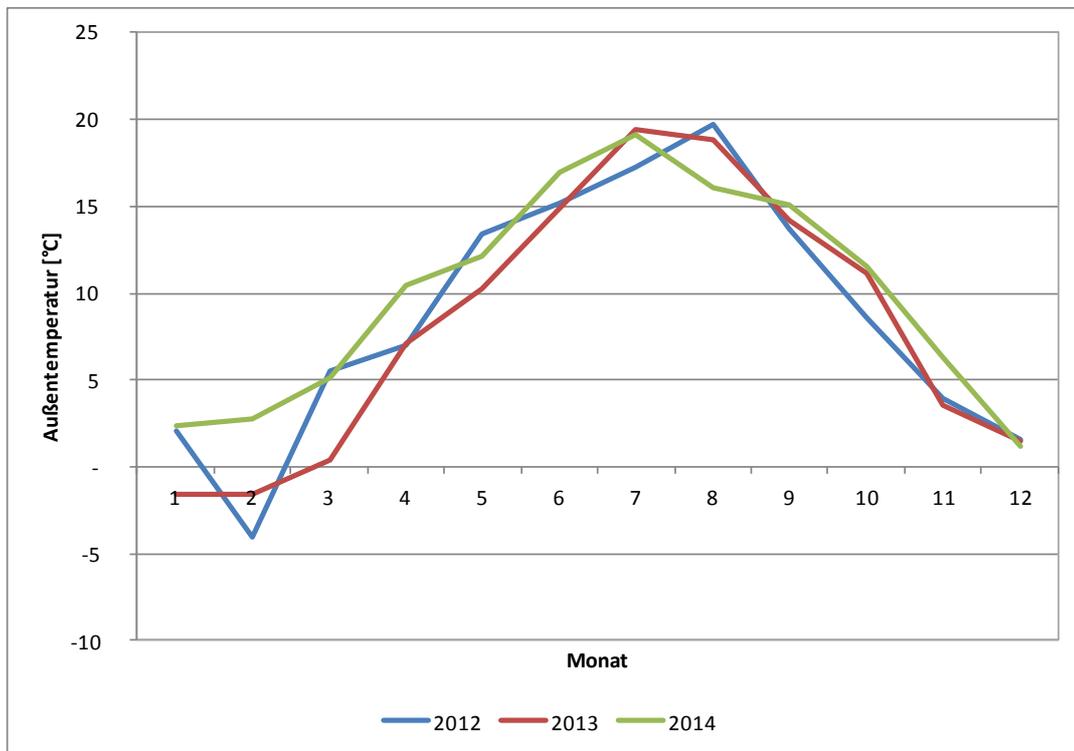


Abbildung 22: Monatliche Durchschnittstemperaturen für Luxemburg

Neben dem Referenzklima stellt die zukünftige Bautätigkeit eine wichtige externe Rahmenbedingung für das Szenario dar. Für die Modellierung wird die Entwicklung des Gebäudebestandes exogen vorgegeben und das Modell ermittelt endogen, in Abhängigkeit der Baualter der Gebäude, der Neubau- und der Abrissraten. Die Entwicklung des Gebäudebestandes wird entsprechend den Annahmen aus dem „Dritten Nationalen Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg“ (Ministerium für Wirtschaft, 2014) angesetzt. Darin wird bis zum Jahr 2020 eine mittlere jährlichen Neubaurate von 3 % bei einer Abrissrate von 0,85 % für Wohngebäude angenommen sowie 2% Neubaurate für Nichtwohngebäude. Diese im europäischen Vergleich sehr hohe Neubaurate setzt den derzeitigen Trend der hohen Bautätigkeit und des Bevölkerungszuwachses in Luxemburg bis 2020 fort. Im Modell ist eine Verteilungsfunktion hinterlegt mit der die jährliche Neubau- und Abrissrate auf Grundlage des hinterlegten Gebäudebestandes – insbesondere der Gebäudealter und der exogenen Vorgabe zur Gesamtentwicklung der Gebäudezahlen und Nutzflächen ermittelt werden. In der Modellierung resultiert eine etwas niedrigere Abrissrate, so dass die mittlere Neubaurate über den Zeitraum bis 2030 ebenfalls etwas niedriger liegt (siehe Tabelle 9).

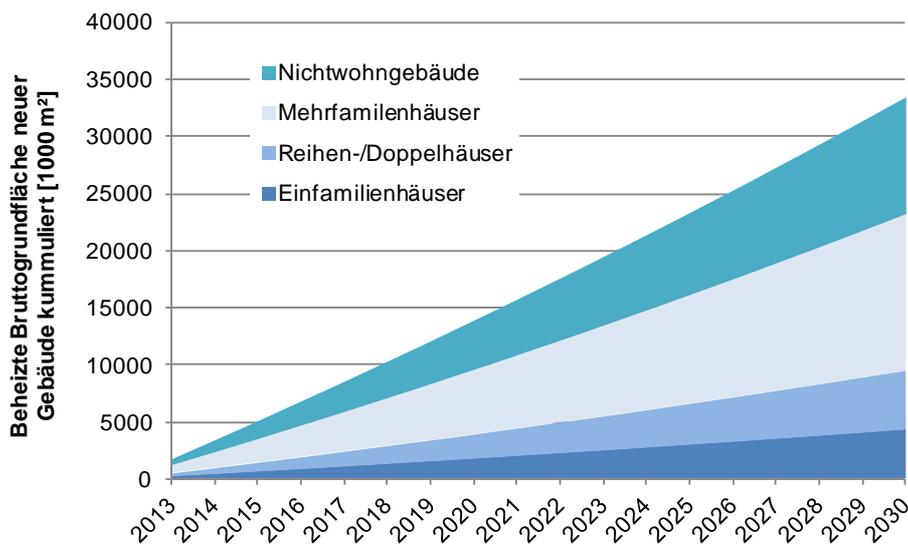
Tabelle 9: Mittlere Neubau- und Abrissrate über Szenarienzeitraum

Gebäude	Mittlere Neubaurate/ a 2013 bis 2030	Mittlere Abrissrate/ a 2013 bis 2030
Einfamilienhäuser	2,5 %	0,5 %
Reihen-/Doppelhäuser	2,5%	0,5%
Mehrfamilienhäuser	2,7%	0,67%
Nichtwohngebäude*	1,7%	0,82%

*Ohne Kirchen und Kulturgebäude

Quelle: Eigene Berechnung

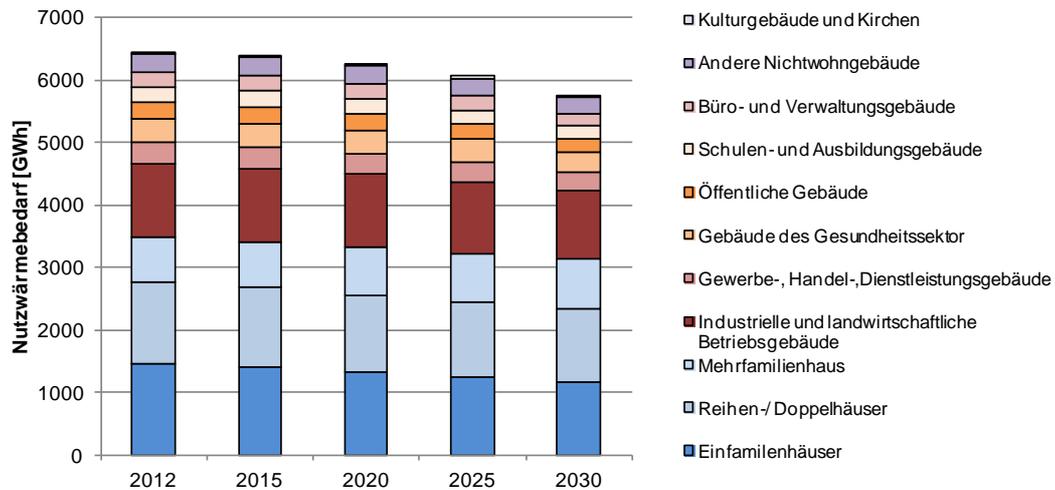
Abbildung 23 stellt die daraus resultierende Entwicklung der Neubaufächen von 2013 an dar. Die im Zeitraum von 2013 bis 2030 durch neu errichtete Gebäude zugebaute beheizte Bruttogrundfläche entspricht 33,4 Millionen Quadratmeter. Die gesamte beheizte Bruttogrundfläche des Gebäudebestandes beträgt 85,1 Millionen Quadratmeter im Jahr 2030.



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 23: Kumulierte Bruttogrundfläche neuer Gebäude bis zum Jahr 2030

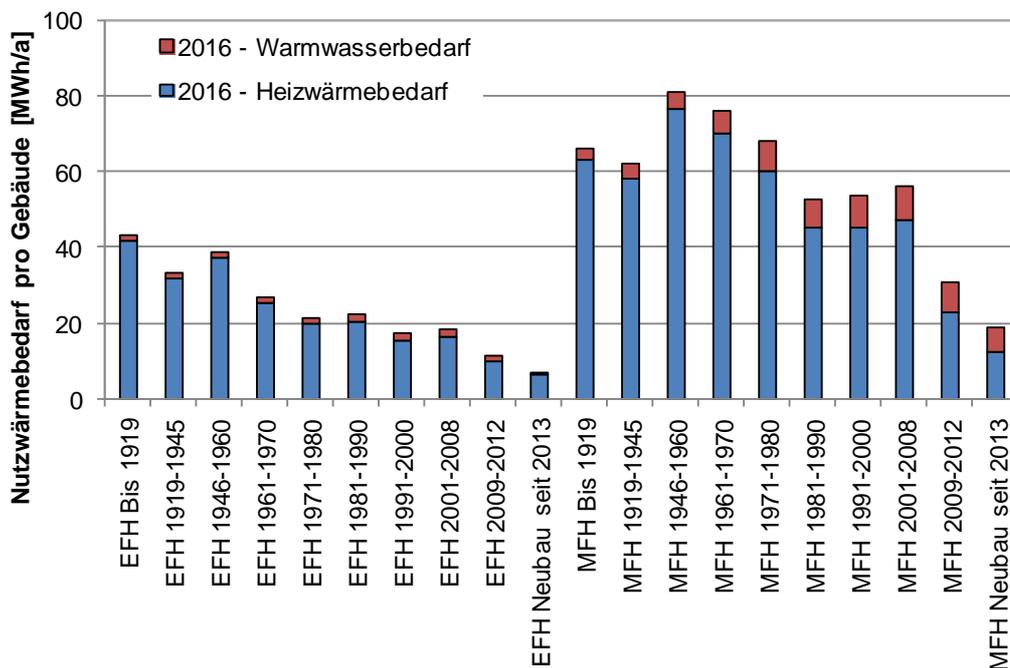
Abbildung 24 zeigt die aus der Modellsimulation resultierende Entwicklung des Nutzenergiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser bis zum Jahr 2030 für ganz Luxemburg. Der Nutzwärmebedarf sinkt gegenüber dem Jahr 2012 um 10,7 % auf 5.768 GWh im Jahr 2030. Die mittlere energetische Sanierungsrate beträgt dabei über den Szenariozeitraum 1,3 % pro Jahr.



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 24: Entwicklung des Nutzwärmebedarfs bis zum Jahr 2030

Auf Basis der Simulationsergebnisse wird das Potenzial für den Einsatz hocheffizienter KWK-Anlagen ermittelt. Für die Objekt-KWK in der dezentralen Versorgung (vgl. 5.2) ist dabei der jeweilige spezifische Wärmebedarf auf Einzelgebäudeebene relevant sowie die Entwicklung der Sanierungsaktivitäten, die das Potenzial aufgrund sinkender Wärmebedarfe verringert. Abbildung 25 zeigt den Jahreswärmebedarf der Ein- und Mehrfamilienreferenzgebäude für das Jahr 2016.



Quelle: Eigene Berechnung mit Invert/EE-LAB

Abbildung 25: Durchschnittlicher Nutzwärmebedarf der Referenzwohngebäudeklassen im Jahr 2016

Abbildung 26 zeigt die aus den Simulationsergebnissen resultierenden Anteile der bis zum Jahr 2030 im Simulationszeitraum nachträglich sanierten Gebäude in den jeweiligen Gebäudeklassen. Im Zeitraum 2012 bis 2030 erfolgen Sanierungen insbesondere in den Baualtersklassen 1945 bis 1970. Ältere Gebäude werden hingegen stärker abgerissen oder es hat eine nachträgliche Sanierung bereits vor dem Jahr 2012 in einem vorhergehenden Zyklus stattgefunden.

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von KWK in der Wärmenetzversorgung sind hingegen die regional aufgelösten Wärmedichten entscheidend. Dazu werden die Simulationsergebnisse mittels einer GIS-Modellierung und den zu Verfügung stehenden GIS-Daten des Gebäudebestandes hochaufgelöst analysiert (vgl. auch Kapitel 7).

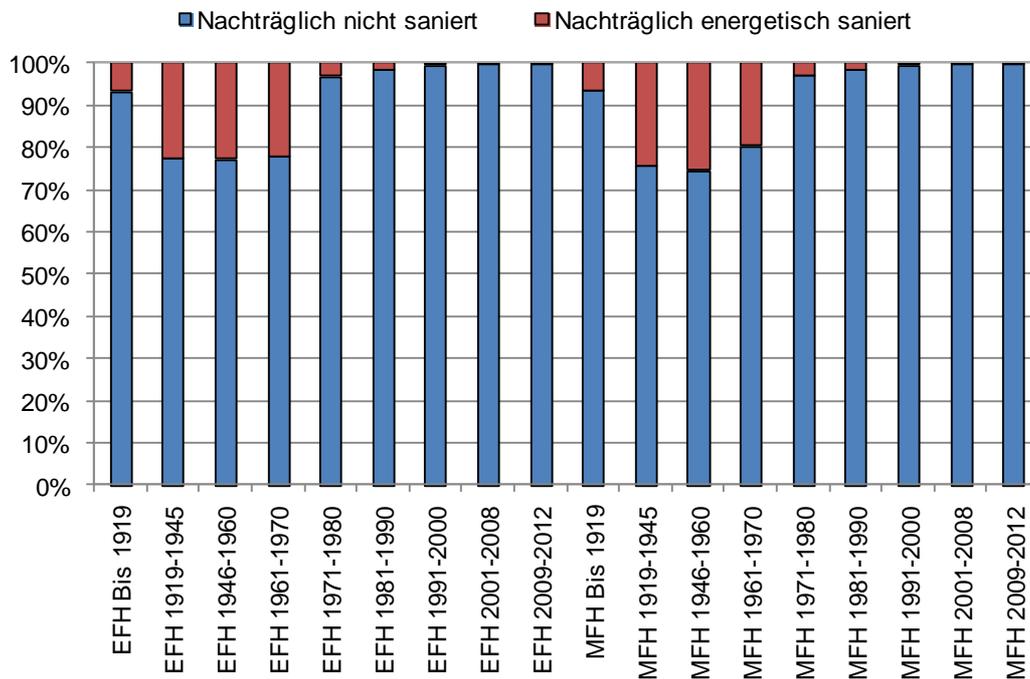


Abbildung 26: Anteil der im Simulationszeitraum von 2012 bis 2030 nachträglich sanierten Wohngebäude

5.2 Wirtschaftliches Potenzial dezentraler KWK-Anlagen in Wohngebäuden

Der Einsatz dezentraler KWK-Technologien in der Objektversorgung von Wohngebäuden ist in den unteren Leistungsbereichen unter 500 kW elektrische Leistung angesiedelt. Eine Einteilung wird dabei entsprechend der Größenklassen und Einsatzzwecke in Mikro-, Mini- und Klein-KWK Anlagen vorgenommen (siehe Tabelle 10). Dezentrale KWK-Anlagen im Wohngebäudebereich sind in der Regel wärmegeführt konzipiert. Aus Einzelwirtschaftlichkeitsperspektive sind eine Maximierung der Betriebsstunden und ein möglichst hoher Anteil an Eigenstromnutzung anzustreben. Die KWK-Anlage wird daher nicht auf die höchste Wärmelast des jeweiligen Gebäudes ausgelegt. Dies macht dann eine Installation eines Spitzenlastkessels erforderlich. Im kleineren Leistungsbereich für den Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern werden Mikro-KWK Anlagen als vollwertige Heizsysteme mit integriertem Spitzenlastkessel vertrieben. Im mittleren Leistungsbereich wird oftmals nach Installation einer KWK-Anlage der vorhandene Heizkessel als Spitzenlastkessel weiterbetrieben.

Tabelle 10: Klassifizierung von Objekt-KWK Anlagen in der dezentralen Versorgung

Klassifikation	Einsatzgebiete	Leistungsbereich
Mikro-KWK	Einfamilienhäuser	< 2 kWel
Mini-KWK	Mehrfamilienhäuser	2 – 50 kWel
Klein-KWK / BHKW	Industriesektor, große Gebäudekomplexe,	50 kWel – 2 MWel

Quelle: Eigene Darstellung, (BDH, 2013)

Als Technologie kommen in der Objektversorgung von Wohngebäuden verschiedene Technologien zum Einsatz (siehe Tabelle 11). KWK-Anlagen auf Basis von Verbrennungsmotoren stellen die gängigste Technologie dar. Im Bereich der Mikro-KWK Anlagen sind seit einigen Jahren auch Stirling-Motoren auf dem Markt und seit kurzem auch Brennstoffzellen-Heizgeräte.

Tabelle 11: KWK-Technologien in der dezentralen Versorgung von Wohngebäuden

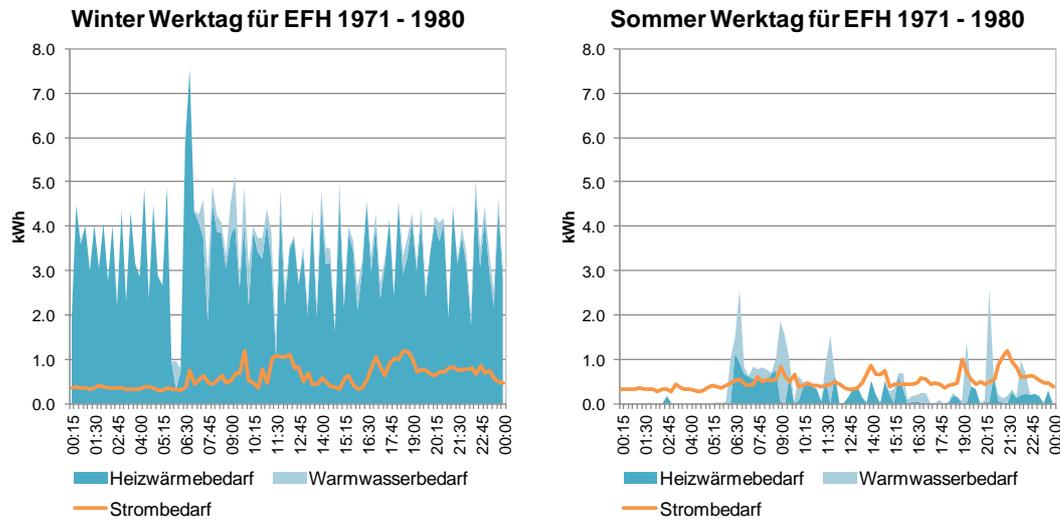
Technologie	Verbrennungsmotor	Stirling-Motor	Brennstoffzelle
Gesamteffizienz	< 90 %	< 85 %	< 90 %
Stromwirkungsgrad	28 – 44 %	10 – 30 %	30 – 47 %
Teillastverhalten	+	O	+++
Brennstoff	Erdgas, Heizöl, Pflanzenöl	Erdgas, Biomasse	Erdgas
Marktreife	Bewährt	Neu	Erste kommerzielle Anlagen verfügbar

Quelle:(Suttor, 2009)

5.2.1 Auslegung dezentraler KWK-Anlagen

Die Wirtschaftlichkeit dezentraler KWK-Anlagen wird für die exemplarischen Referenzwohngebäude aus der aufgestellten Gebäudetypologie für Luxemburg ermittelt (vgl. Abbildung 25). Für jedes der Referenzgebäude wird eine optimale Auslegung der dezentralen KWK-Anlagen über stündliche Strom- und Wärmeprofile ermittelt. Für Einfamilienhäuser wird in den Modellrechnungen die Maximierung des Eigenstromverbrauchs unterstellt, während bei Mehrfamilienhäusern die Maximierung der Gesamtstrommenge angesetzt wird. Eine Nutzung des erzeugten KWK-Stroms im Mehrfamilienhaus ist entweder durch den Verkauf des erzeugten Stroms an die Mieter oder die Gründung einer gemeinsamen Nutzungsgesellschaft durch die verschiedenen Wohnparteien möglich. Allerdings bestehen dabei aufgrund der Komplexität Hemmnisse, die mit entsprechenden Transaktionskosten für die Gebäudeeigentümer bzw. Nutzer verbunden sind. In der Wirtschaftlichkeitsrechnung wird für Mehrfamilienhäuser sowohl die Variante mit alleiniger Netzeinspeisung als auch mit anteiliger Eigenstromnutzung betrachtet.

In die Berechnung fließt der zeitlich hochaufgelöste Wärme- und Strombedarf ein, der auf Basis der Wärme- und Stromprofile der VDI-4655 Norm ermittelt wird mit denen die Aufteilung des Energiebedarfs im Tagesgang für verschiedene Typtage ermöglicht wird. Die Tageslastgänge werden dabei nach den Kriterien Jahreszeit – Sommertag, Wintertag oder Übergangstag, Arbeitstag oder Feiertag sowie dem meteorologischen Bedeckungsgrad – heiter oder bewölkt unterschieden. Abbildung 27 vergleicht die Wärme- und Stromtagesprofile des Winter- und Sommerwerktages exemplarisch für das Einfamilienreferenzgebäude in der Baualtersklasse 1971 -1980. Bei der Auslegung der KWK-Anlage sollte eine möglichst hohe Betriebszeit angestrebt werden, so dass eine Auslegung auf die Grundlastwärme erfolgt. Für die Wirtschaftlichkeit bei Eigenstromoptimierung ist zudem die Gleichzeitigkeit von Strom- und Wärmebedarf entscheidend.



Quelle: Eigene Berechnung auf Basis VDI-4655 (2008)

Abbildung 27: Vergleich der Wärme- und Stromprofile in Sommer- und Winterwerktyptage für EFH-Referenzgebäude Baualtersklasse 1971 - 1980

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der optimalen Auslegung für die einzelnen Referenzgebäude. Der Anteil der dezentralen KWK-Anlage an der Wärmebedarfsdeckung beträgt in den Gebäuden zwischen 24 % und 58 %. Der verbleibende Wärmebedarf sowie die Differenzheizlast muss über einen Spitzenlastkessel abgedeckt werden, der in der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt wird.

Tabelle 12: Auslegung dezentraler KWK-Anlagen für einzelne Referenzgebäude

Gebäude	Heiz-	KWK		Wärmeb	KWK-	Stromerzeugung	
	last	Auslegung		edarf	Betrieb	Eigenverbrauch	
	[kWth]	[kWth]	[kWel]	[%]	[h/a]	[kWh/a]	[%]
EFH Bis 1919	25	9	3	58%	2723	8169	28%
EFH 1919-1945	20	2,5	1	24%	3237	3237	64%
EFH 1946-1960	24	9	3	57%	2534	7603	28%
EFH 1961-1970	16	2,5	1	31%	3237	3237	64%
EFH 1971-1980	12	2,5	1	40%	3113	3113	64%
EFH 1981-1990	13	2,5	1	38%	3113	3113	64%
EFH 1991-2000	10	2,5	1	46%	2858	2858	65%
EFH 2001-2008	10	2,5	1	44%	2858	2858	65%
EFH 2009-2012	10	2,5	1	49%	1877	1877	64%
EFH Neu ab 2013	10	2,5	0,3	51%	1263	1263	66%
MFH Bis 1919	38	12,5	6	35%	1821	10014	19%*
MFH 1919-1945	37	12,5	6	36%	1821	10014	23%*
MFH 1946-1960	48	12,5	6	44%	2908	15993	25%*
MFH 1961-1970	42	12,5	6	42%	2497	13735	35%*
MFH 1971-1980	35	12,5	6	36%	1723	9475	47%*
MFH 1981-1990	27	2,5	1	37%	6690	6690	100%*
MFH 1991-2000	28	2,5	1	37%	6715	6715	100%*
MFH 2001-2008	30	9	3	44%	2326	6977	78%*
MFH 2009-2012	18	2,5	1	58%	5223	5223	100%*
MFH Neu ab 2013	14	2,5	1	57%	2833	2833	100%*

*Sofern Eigenstromnutzung durch entsprechende Gründung von Vertriebs- oder Nutzungsgesellschaft möglich ist

5.2.2 Wirtschaftlichkeit gegenüber alternativer Wärmeversorgungsoptionen

Im Folgenden werden die Wärmebereitstellungskosten verschiedener dezentraler Wärmeversorgungsoptionen verglichen, um die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlagen in den verschiedenen Referenzgebäuden zu bewerten. Folgende Wärmeversorgungssysteme werden in der Analyse verglichen:

- Mini-KWK-Anlage mit Erdgas-Verbrennungsmotor und Spitzenlastkessel
- Erdgas-Brennwertkessel
- Holzpelletskessel
- Sole/ Wasser Wärmepumpe
- Luft/ Wasser Wärmepumpe

Für einen umfangreichen Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener Wärmeversorgungsvarianten sei auf Lichtmeß and Viktor (2014) verwiesen.

Die Wärmebereitstellungskosten umfassen dabei die kapital-, betriebs- und verbrauchsgebundenen Kosten.

Die Berechnung der Wärmebereitstellungskosten umfasst folgende Kostenkomponenten (VDI 2067-1, 2000):

- Kapitalgebundene Kosten
- Verbrauchsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene und sonstige Kosten
 - Wartung und Instandsetzung
 - Schornsteinfeger

Tabelle 13 gibt einen Überblick über ökonomischen Rahmenbedingungen. Bei der Berechnung wird ein einheitlicher Zinssatz von 4 %³ angesetzt mit dem sich die kapitalgebundenen Kosten aus der Annuität der Investitionen ergeben. Bei den verbrauchsgebundenen Kosten wird die zukünftige Änderung der Energiekosten durch eine angenommene Steigerung der Energiepreise entsprechend Abbildung 10 ebenfalls über die Annuitätenmethode berücksichtigt.

³ Dies entspricht der Diskontierungsrate, die im Standardfall im Rahmen der Kostenoptimalitätsberechnung für Luxemburg angesetzt wird (vgl. Lichtmeß and Viktor, 2014).

Tabelle 13: Ökonomische Rahmenbedingungen der Wirtschaftlichkeitsberechnung

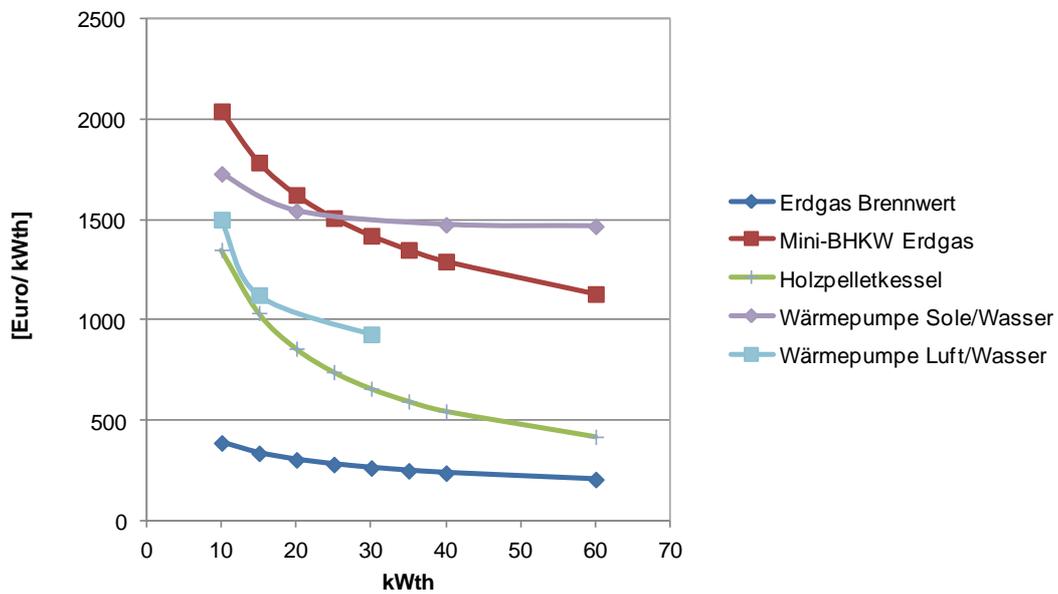
Rahmenbedingungen	
Wirtschaftlichkeitsberechnung	
Nutzungsdauer dezentrale KWK-Anlage	15 Jahre
Nutzungsdauer andere Wärmeerzeuger	20 Jahre
Zinssatz	4 %
Energiepreise inkl. eingerechneter Preissteigerung	
Erdgas	5,74 [ct/kWh]
Holzpellets	5,29 [ct/kWh]
Strom Haushalte	18,41 [ct/kWh]
Strom Großhandel (KWK Netzeinspeisung)	4,42 [ct/kWh]
Betriebskosten	
Wartung/ Instandsetzung KWK-Anlage kleiner 9 kWth	15 [ct/Stunde] ⁴
Wartung und Instandsetzung größer 9 kWth	41 [ct/Stunde] ⁴
Wartung und Instandsetzung andere Wärmeerzeuger	2 % Investitionen/a

*Wärmepumpen inklusive Wärmequellenerschließung

Quelle: (Dengler et al., 2011; Hofmann et al., 2011; sirAdos, 2016)

Abbildung 28 zeigt die spezifischen Investitionen pro Kilowatt installierter thermischer Leistung der verschiedenen Wärmeversorgungssysteme. Bei den dezentralen KWK-Anlagen werden zusätzlich noch Investitionen für einen Erdgas-Brennwertkessel zur Spitzenlastabdeckung entsprechend der dargestellten Auslegung berücksichtigt. Die Wirtschaftlichkeit des Systems wird gegenüber der ungekoppelten fossilen Wärmeversorgung mit einem Brennwertkessel ermittelt.

⁴ Vollwartungsvertrag entsprechend Herstellerangaben. Bezugsgröße sind die Betriebsstunden.



*Wärmepumpen inklusive Wärmequellenschließung

Quelle: (Dengler et al., 2011; Hofmann et al., 2011; sirAdos, 2016)

Abbildung 28: Spezifische Investitionskosten gängiger Wärmeversorgungssysteme

Die resultierenden Jahreskosten der Wärmebereitstellung der dezentralen KWK-Systeme nach den unterschiedlichen Kostenarten sind in Abbildung 29 für die einzelnen Referenzgebäude dargestellt.

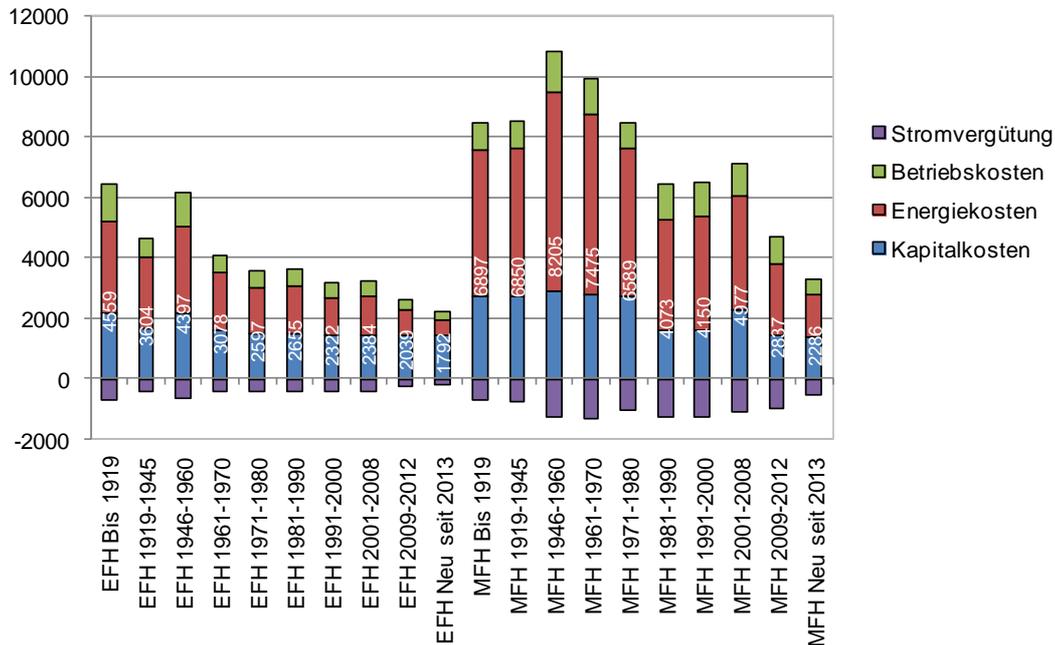


Abbildung 29: Jahreskosten der Wärmebereitstellung dezentraler KWK-Systeme

Die Berechnung wird für alle Vergleichstechnologien durchgeführt, wobei die Wirtschaftlichkeit anhand der spezifischen Wärmebereitstellungskosten mit Bezug auf den jährlichen Nutzwärmebedarf in den einzelnen Gebäuden dargestellt wird. Die folgenden Abbildungen fassen die Ergebnisse der Analyse zusammen, welche keine finanzielle Förderung für erneuerbare Wärmeversorgung berücksichtigt.

Abbildung 30 unterstellt dabei, dass eine Eigenstromnutzung in Mehrfamilienhäusern aus den genannten Gründen nicht möglich ist. Es zeigt sich, dass der Erdgas-Brennwertkessel in allen untersuchten Referenzgebäudevarianten die wirtschaftlichste Variante darstellt⁵. Bei den Einfamilienhäusern, die vor der ersten Wärmeschutzverordnung errichtet worden sind sowie bei Mehrfamilienhäusern, die nach 1980 errichtet worden sind, liegen die Wärmebereitstellungskosten der dezentralen KWK-Anlagen ungefähr auf dem Niveau des jeweils günstigsten EE-Wärmeversorgungssystems. Die spezifischen Mehrkosten der KWK-Systeme gegenüber Erdgas-Brennwertkessel liegen zwischen 2,2 €/ct/kWh und 14,6 €/ct/kWh.

⁵ In der Berechnung werden die Primärenergieanforderungen aus der Energieeinsparverordnung für Neubauten nicht berücksichtigt. Diese führt dazu, dass in den Neubauvarianten der Einsatz des Erdgas-Brennwertkessels ohne die zusätzliche Nutzung erneuerbarer Energien (z.B. Solarthermie oder PV) entweder aufgrund der Anforderung nicht möglich ist oder aufgrund höherer Energieeffizianzforderung an die Gebäudehülle wirtschaftlich nicht darstellbar ist.

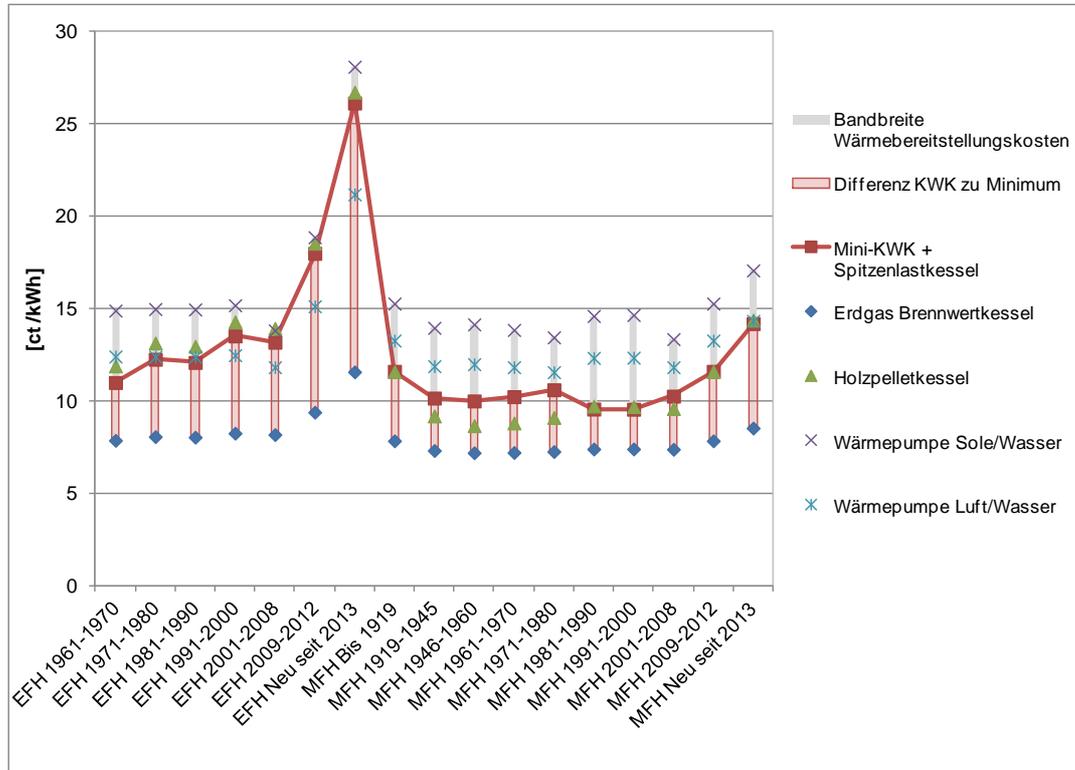


Abbildung 30: Spezifische Wärmebereitstellungskosten und Wirtschaftlichkeit der dezentralen KWK-Versorgung ohne Eigenstromnutzung in MFH

Sofern eine Eigenstromnutzung auch in Mehrfamilienhäusern möglich ist, erhöht sich die Wirtschaftlichkeit, da die Vermeidung des Strombezugs mit dem Haushaltsstrombezugspreis bewertet wird, der viermal so hoch ist wie der Großhandelsstrompreis, der bei einer Netzeinspeisung realisiert wird (Abbildung 31). Dabei wurde mit mittleren Strompreisen über die Lebensdauer gerechnet, die auch die zukünftige erwartete Entwicklung der Strompreise mit berücksichtigt (vgl. auch Kapitel 3). Ein wirtschaftliches Potenzial zeigt sich dabei in Mehrfamilienhäusern der Baujahrsklassen 1981 bis 2000, bei denen die Mehrkosten gegenüber der Erdgas-Brennwertvariante bei unter 1 €-ct/kWh liegen.

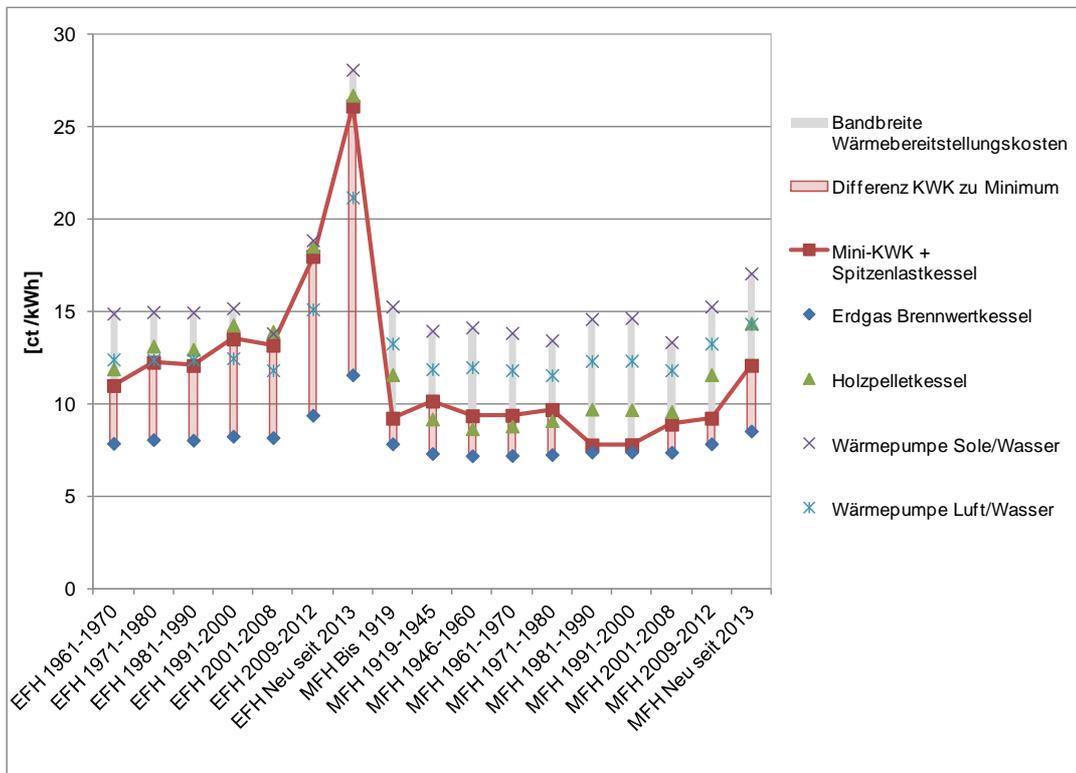


Abbildung 31: Spezifische Wärmebereitstellungskosten und Wirtschaftlichkeit der dezentralen KWK-Versorgung mit Eigenstromnutzung in MFH

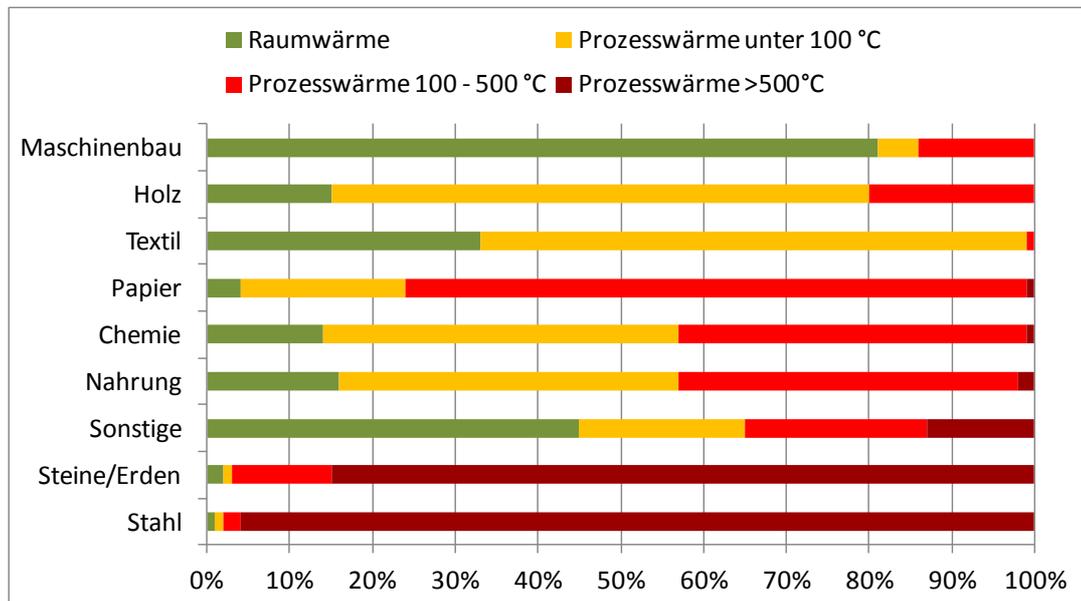
6 Potenzialabschätzung für KWK in der Industrie

6.1 Entwicklung des Industrierwärmebedarfs bis 2030

Die Fortschreibung des Endenergiebedarfs in der Industrie basiert auf den Abschätzungen aus dem „Dritten Nationalen Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg“ (Ministère de L'Économie, 2014), in dem für die einzelnen Industriesektoren die Entwicklung der Wertschöpfung als auch der Energieeffizienz abgeleitet wurde. Die Wertschöpfung in den Industriesektoren bzw. in der Industrieproduktion wird mit einem Wachstum von 0,5 %/a abgebildet. Ausnahmen bilden der Stahlsektor und die Glasindustrie, für die kein Wachstum der Wertschöpfung (Stahlindustrie) bzw. ein Rückgang (Glasindustrie) unterstellt wird. Während der Wirtschaftskrise in 2009 ist die Wertschöpfung in der Industrie stark gefallen und seitdem auf diesem niedrigeren Niveau verblieben. Einige Branchen wie die Chemie und Pharmaindustrie sind seitdem jedoch wieder gewachsen, in andere Branchen wie der Stahl- oder Glasindustrie ist die Wertschöpfung weiter gesunken.

Basierend auf der Energieintensität im Verhältnis zur Wertschöpfung der Sektoren erfolgt dann eine Fortschreibung des Energiebedarfs, der allerdings durch eine Steigerung der Energieeffizienz in den einzelnen Sektoren abgeschwächt wird. Für die energieintensiven Branchen wird dabei in der Baseline autonom mit einer jährlichen Verbesserung der Energieeffizienz von 0,5 %/a und für die sonstigen Branchen von 0,2 %/a gerechnet. Bei ambitionierteren Anforderungen an die Energieeffizienz wird mit einer stärkeren Effizienzsteigerung von 1,7 %/a bis 2020 gerechnet, die etwa durch eine freiwillige Vereinbarung mit der Industrie umgesetzt werden könnte.

Der Brennstoffeinsatz in der Industrie dient wie in Kapitel 4 bereits gezeigt fast ausschließlich der Bereitstellung von Wärme. KWK-Anlagen können Wärme bis zu einem Temperaturniveau von ca. 500 °C bereitstellen. Für die Abschätzung des KWK-Potenzials in der Industrie ist daher der Wärmebedarf für Hochtemperaturanwendungen nicht zu berücksichtigen. Dieser findet sich insbesondere in der Stahl- und Glasindustrie (siehe Abbildung 32).

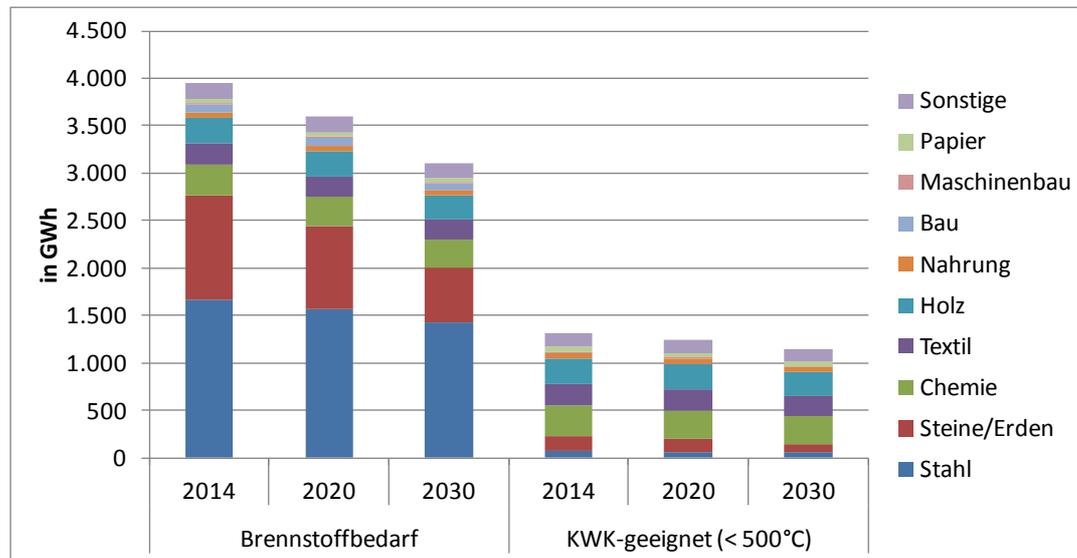


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Fleiter 2012, Temming 2005

Abbildung 32: Wärmebedarf nach Temperaturniveau und Industriesektor

Der Endenergiebedarf im Industriebereich ist mit den getroffenen Annahmen trotz eines leichten Wachstums der Wertschöpfung auf Grund der Effizienzfortschritte insgesamt rückläufig (siehe Abbildung 33). Er fällt von knapp 4.000 GWh in 2014 auf ca. 3.100 GWh in 2030. Damit setzt sich der Rückgang des Endenergiebedarfs in der Industrie im Vergleich zu den letzten 10 Jahren weiter fort, aber er verlangsamt sich dabei.

Ein Großteil des Endenergiebedarfs fällt in den Bereichen Stahl und Steine/Erden an (Glas/Zement), die Hochtemperatur-Wärme benötigen. Daher macht der Brennstoffbedarf für Wärme unter 500 °C, der durch KWK-Anlagen gedeckt werden könnte, nur ca. ein Drittel des Wärmebedarfs aus.



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 33: Entwicklung des Brennstoffbedarfs und des KWK-geeigneten Brennstoffbedarfs in der Industrie in 2014, 2020 und 2030 nach Sektoren

Von dem für KWK-Anlagen geeigneten Wärmebedarf von 1.146 GWh in 2030 fallen 264 GWh auf Raumwärme (siehe Tabelle 14). Dies entspricht nur etwa 8 % des Endenergieeinsatzes in der Industrie. Betrachtet man zusätzlich noch den Wärmebedarf unter 100 °C, so steigt der Anteil auf knapp 22 % des Endenergieeinsatzes bzw. auf 777 GWh.

Tabelle 14: Brennstoffbedarf in der Industrie insgesamt und nach Temperaturniveau für 2014, 2020 und 2030

in GWh	2014	2020	2030
Brennstoffbedarf	3.952	3.592	3.107
KWK-geeignet (< 500°C)	1.315	1.245	1.146
Raumwärme	297	283	264
unter 100°C (ohne Raumwärme)	561	542	513
100°C-500°C	458	420	369
>500°C	2.637	2.347	1.961

Quelle: eigene Darstellung

6.2 Wirtschaftlichkeit von industriellen KWK-Anlagen

Die wirtschaftliche Bewertung und Vorteilhaftigkeit von KWK-Anlagen ergibt sich aus dem Vergleich der Erzeugungskosten einer KWK-Anlage mit der getrennten Erzeugung von Wärme und Strom. Dabei werden sämtliche Kostenbestandteile als auch verschiedene Erlösmöglichkeiten berücksichtigt (siehe Tabelle 15). Als Referenz auf der Stromseite dient bei Selbstverbrauch des erzeugten KWK-Stroms der jeweilige Endkundenstrompreis für eine externe Strombeschaffung. Hier sind ggf. auch die Umlagen und Steuern, die bei einer externen Beschaffung anfallen mit zu berücksichtigen. Wird der erzeugte KWK-Strom ins Netz eingespeist und verkauft, wird dafür der mittlere Strompreis der Strombörse als Referenz verwendet.

Auf der Wärmeseite stellt eine alternative Wärmeerzeugung auf Erdgasbasis die Referenztechnologie dar. Eine wichtige Einflussgröße ist dafür der Erdgaspreis. Auch hier spielen Steuern und weitere Preisbestandteile wie Netzentgelte eine wichtige Rolle.

Für die Bewertung der Industriestrompreise wird die aktuelle Preissituation in Luxemburg auf Basis der Entwicklung der Großhandelsstrompreise in die Zukunft fortgeschrieben. Ausgehend von der aktuellen Basis wird ein jährlicher Preisanstieg von 2,4 % angenommen, so dass die Industriestrompreise von heute ca. 100 €/MWh (inklusive Umlagen und Steuern) auf ca. 115 €/MWh in 2030 ansteigen. Für den ins Netz eingespeisten KWK-Strom wird eine Vergütung von ca. 35 €/MWh (Großhandelspreis 2015) angenommen, der bis 2030 auf 53 €/MWh ansteigt. Die Preisentwicklung orientiert sich dabei an Abschätzungen auf EU-Ebene (WEO 2015, Primes 2014) und wurde speziell an die Situation in Luxemburg angepasst (siehe auch Kapitel 3).

Die Wärmegutschrift wird aus den eingesparten Brennstoffkosten für eine reine Wärmeerzeugung mit 85 % Wirkungsgrad abgeleitet. Damit ergibt sich bei einem Gaspreis für Industriekunden von ca. 39 €/MWh (2015) in Luxemburg eine Wärmegutschrift von ca. 46 €/MWh_{th}. Zur Ableitung der Wirtschaftlichkeit wird mit einem mittleren Strom- und Brennstoffpreis über die erwartete Laufzeit gerechnet. Der Zertifikatepreis steigt im Betrachtungszeitraum in Anlehnung an das Referenzszenario der EU Kommission (Primes 2014) von aktuell 5 €/t auf 10 €/t in 2020 und auf 31 €/t in 2030. Hier wird mit einem mittleren Zertifikatepreis von 12 €/t über die Laufzeit gerechnet. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind lediglich Anlagen mit

mehr als 20 MW Feuerungsleistung von den Zertifikatepreisen betroffen. Bei kleineren Anlagen sind diese Kosten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung nicht relevant.

Tabelle 15: Betrachtete Kosten und Erlöse zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von industriellen KWK-Anlagen

Kosten		
Investitionen	Anlagen-spezifisch	Sämtliche Investitionen und Planungskosten (12 – 20 Jahre Lebensdauer, 6,5 % realer Zinssatz)
Betriebskosten	Anlagen-spezifisch	fixe Kosten (u.a. Personal- und Wartungskosten variable Kosten (u.a. verbrauchsabhängige Instandhaltungskosten)
Brennstoffkosten Erdgas	Endkunden-spezifisch	Preise frei Grenze zzgl. Umlagen und Steuern, Anwendungsspezifische Aufschläge nach Abnahmemengen
CO ₂ -Zertifikate	12 €/t	Großhandelspreise für EUA (European Emission Allowance) für Anlagen >20 MW _{th}
Erlöse		
Stromvergütung (Netzeinspeisung)	44,2 €/MWh	KWK-Stromvergütung (auf Basis Großhandelsstrompreis)
Stromvergütung (Selbstverbrauch)	Endkunden-spezifisch	Vermiedener Strombezug (Basis Endkundenstrompreis inkl. Umlagen, Entgelte)
Wärmevergütung	Endkunden-spezifisch	Kosten alternativer Wärmeerzeugung, insbesondere Brennstoffkosten
KWK-Förderung		Vergütungszahlungen für die Einspeisung von KWK-Strom bzw. Wärme, weitere Fördermöglichkeiten (u.a. Investitionszuschüsse)

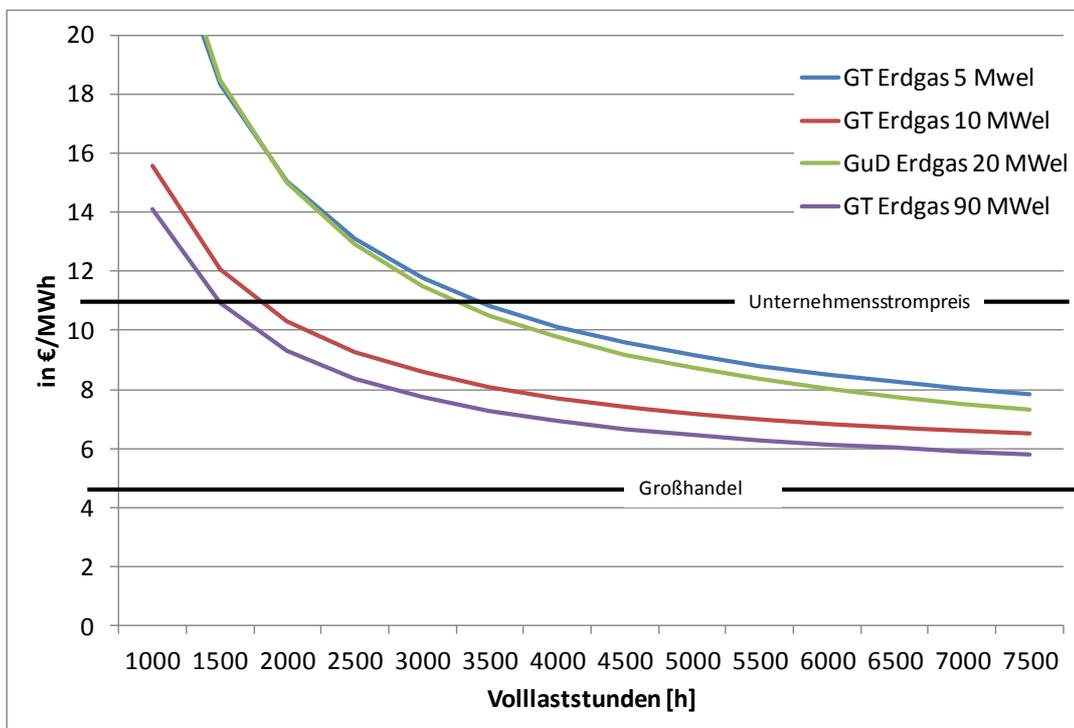
Quelle: eigene Darstellung

Ein Großteil der Industrie in Luxemburg hat einen Endenergiebedarf von weniger als 20 GWh. Nur knapp 40 Unternehmen in Luxemburg weisen einen Endenergiebedarf von mehr als 20 GWh/a aus. Vor diesem Hintergrund sind vor allem KWK-Anlagen kleiner als 20 MW elektrischer Leistung für Luxemburg interessant. Wird Dampf als Prozesswärme eingesetzt, sind vor allem Gasturbinen mit Abhitzeessel bzw. GuD-

Anlagen geeignet. Für den Einsatz in Branchen mit vornehmlich Warmwasserbedarf wie z.B. in der Lebensmittelindustrie sind auch BHKWs als KWK-Anlagen geeignet.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird mit mittleren Strom- und Brennstoffpreisen gerechnet, die über die Lebensdauer der Anlagen anfallen.

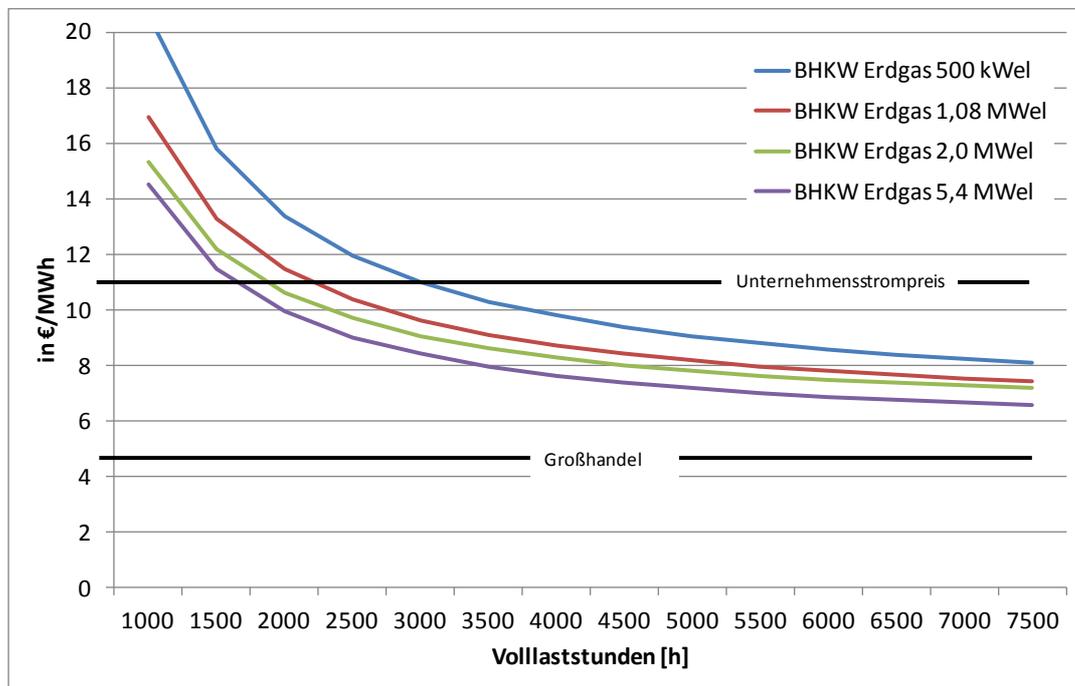
Größere GT-Anlagen über 10 MW_{el} auf Basis von Erdgas erreichen bei einer Auslastung von 5.000 Stunden im Jahr Stromerzeugungskosten von ca. 65 bis 71 €/MWh (siehe Abbildung 34). Für Unternehmen mit einem entsprechend hohen Energiebedarf, die eine solche Anlage installieren könnten, liegen die Strombezugskosten näher am Großhandelspreis, so dass eine Wirtschaftlichkeit erst bei hohen Auslastungen der Anlage gegeben ist.



Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 34: Stromerzeugungskosten für GT mit Wärmenutzung bzw. GuD-Anlagen in Abhängigkeit der Auslastung

Bei BHKWs liegen die Stromerzeugungskosten etwas höher zwischen 71 €/MWh und 91 €/MWh bei 5.000 Vollaststunden (siehe Abbildung 35). Hier ist die Wirtschaftlichkeit auch nur bei vergleichsweise hohen Auslastungen gegeben. Für kleinere Unternehmen, die höhere Strombezugskosten haben, können sich KWK-Anlagen ggf. eher rechnen, wenn dadurch vergleichsweise teure Strombeschaffung vermieden werden kann.



Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 35: Stromerzeugungskosten für BHKW-Anlagen in Abhängigkeit der Auslastung

Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen in der Industrie zeigt sich, dass diese in der Regel höhere Stromerzeugungskosten im Vergleich zum Stromgroßhandel aufweisen, selbst wenn sehr hohe Auslastungen erreicht werden. Im Vergleich zu einem Fremdbezug können die betrachteten KWK-Anlagen jedoch die Wirtschaftlichkeit erreichen.

6.3 Entwicklung des zusätzlichen KWK-Potenzials durch Modernisierung und Neubau von industriellen KWK-Anlagen

Ausgehend vom aktuellen und zukünftigen Nutzwärmebedarf in der Industrie sowie den Wirtschaftlichkeitsüberlegungen lassen sich die zusätzlichen KWK-Potenziale im Vergleich zum Status-Quo abschätzen. Der Bestand wurde durch größere Anlagen, die auch unter den europäischen Emissionshandel fielen, geprägt (CEGYCO, CEDUCO). Die KWK-Anlage CEDUCO, eine Kooperation der Enovos mit Dupont, war 2013 nicht mehr in Betrieb (Enovos 2014). In 2015 ist auch die Anlage CEGYCO nicht mehr im Einsatz gewesen. Neuere Anlagen sind auf Grund der fehlenden Wirtschaftlichkeit in

der jüngeren Vergangenheit in der Industrie nicht gebaut worden. Veröffentlichungen zu einzelnen Anlagen zeigen auch, dass die Auslastung von KWK-Anlagen auf der Stromseite eher zurückgegangen ist (Enovos 2014).

Auf Basis der Wirtschaftlichkeitsberechnungen lässt sich der Mindestwärmebedarf aus den notwendigen Volllaststunden und der Anlagengröße ableiten. Dabei stellt die im Rahmen der Richtlinie genannte Größe eines Energiebedarfs von 10 GWh eine untere Abschätzung dar. Ein Nutzwärmebedarf von 10 GWh kann beispielsweise durch ein BHKW mit 2 MW thermischer Leistung und einer Volllaststundenzahl von 5.000 h erreicht werden. Aktuell ist davon auszugehen, dass insgesamt ca. 36 Unternehmen einen Endenergiebedarf von mehr als 20 GWh haben und damit mehr als 700 GWh des Endenergiebedarfs ausmachen. Für diese Unternehmen kann sich eine Wirtschaftlichkeit durch Vermeidung von Fremdbezug ergeben, wenn längere Amortisationszeiten akzeptiert werden. Bei größeren Unternehmen liegen die Strombezugsbedingungen allerdings häufig näher an den Großhandelspreisen. Die Wirtschaftlichkeit ist dadurch geringer, so dass verbunden mit den geforderten kurzen Amortisationszeiten in der Industrie eine Umsetzung des Potenzials nicht zu erwarten ist.

Insgesamt wird in der Industrie mit einem wirtschaftlichen Potenzial von ca. 500 GWh an Endenergie bzw. 425 GWh Nutzenergie gerechnet, die durch KWK-Wärme gedeckt werden könnte (siehe Tabelle 16). Dies entspricht im Vergleich zum Jahr 2014, in dem knapp 190 GWh KWK-Wärme erzeugt wurden, etwas mehr als einer Verdoppelung der bereitgestellten KWK-Wärme. Mittlerweile sind diese Anlagen allerdings stillgelegt worden. Das identifizierte Potenzial ließe sich daher erst realisieren, wenn die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen deutlich verbessert wären.

Relevante Branchen sind dabei vor allem die Chemieindustrie sowie die Holzindustrie und die Nahrungsmittelindustrie. Für die weiteren Branchen wurden keine detaillierten Potenziale abgeschätzt, da hier auf Grund der Unternehmensgröße und des damit verbundenen Wärmebedarfs die notwendige Anlagengröße nicht erreicht wurde. Für einzelnen Standorte kann sich eine Wärmeversorgung mit KWK-Anlagen (insbesondere mit BHKW) dennoch als wirtschaftlich darstellen, wenn die Randbedingungen (hohe Strombezugskosten, kontinuierlicher Wärmebedarf, lange Amortisationszeiten möglich) besonders günstig sind. Im Rahmen der Studie konnte eine derartige Einzelfallbetrachtung nicht durchgeführt werden.

Tabelle 16: Abschätzung des zusätzlichen Potenzials für KWK-Wärme in der Industrie bis 2030 bezogen auf Endenergieeinsatz in der Industrie

	Brennstoffbedarf in GWh		KWK-geeignet (< 500°C) in GWh		KWK- Bestand in GWh	Ausbaupot enzial in GWh
	2014	2030	2014	2030	2014	2030
in GWh						
Stahl	1.670	1.422	67	57		
Steine/Erden	1.094	589	164	88		
Chemie	319	295	316	292		210
Textil	226	208	226	208		
Holz	274	253	274	253	65	150
Nahrung	61	57	60	56		25
Bau	77	71	0	0		
Maschinenbau	13	12	13	12		
Papier	51	47	50	46		
Sonstige	167	154	145	134	122	115
Summe	3.952	3.107	1.315	1.146	187	500
	<i>KWK-Wärme*</i>					425
	<i>KWK-Strom**</i>					255

Quelle: eigene Abschätzung, * Umrechnung Endenergie in KWK-Nutzwärme mit 0,85, ** KWK-Strom mit Stromkennzahl 0,6 berechnet

7 Potenzialabschätzung für Wärmenetzversorgung und zentrale KWK-Anlagen

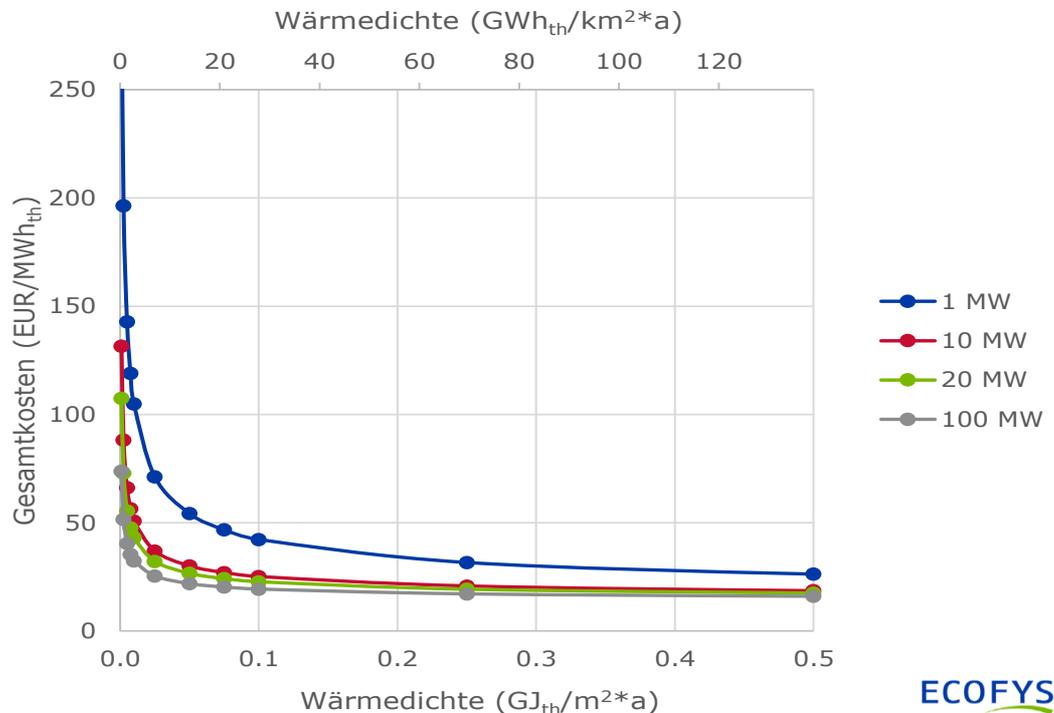
Die Energieeffizienzrichtlinie definiert eine Geschossflächenzahl von mindestens 0,3 für Gebiete in denen ein mögliches Potenzial für eine Wärmenetzversorgung besteht. Aus der Analyse des Gebäudebestandes wird ersichtlich, dass dieses Kriterium in keiner Gemeinde in Luxemburg erreicht wird (vgl. 4.4.). Für eine Potenzialabschätzung ist die Geschossflächenzahl als alleiniges Kriterium jedoch problematisch. Diese stellt zwar einen Indikator für den Wärmebedarf bereit, allerdings hängen Wärmedichten und –bedarfe auch von der Verteilung der Gebäudestruktur ab. Des Weiteren können sich in einer höher aufgelösten geographischen Differenzierung hohe Geschossflächenzahlen innerhalb der Gemeinde ergeben. Es wird daher eine detaillierte Wärmebedarfsanalyse für alle Gemeinden in Luxemburg durchgeführt, welche den Wärmebedarf auf einem 250 m x 250 m Raster für das Jahr 2012 und das Jahr 2030 untersucht.

Das mögliche Potenzial wird dabei nicht nur anhand der Geschossflächenzahl beurteilt.

Als weitere Kriterien werden die spezifische Wärmedichte und der jährliche Wärmebedarf herangezogen, deren Grenzwerte für eine technische Realisierung nach Büchle et al. (2015) angesetzt werden. Zusätzlich wird der Grenzwert für die Geschossflächenzahl auf 0,1 herabgesetzt:

- Nutzwärmedichte > 10 GWh/(km²a)
- Nutzwärmebedarf > 10 GWh/a
- Plot-Ratio > 0,1

Die Mindestwärmedichte ergibt sich aus der Tatsache, dass mit Wärmedichten unter 10 GWh die Wärmeverteilungskosten aufgrund höherer Verluste stark ansteigen (Büchle et al., 2015; Klobasa et al., 2008). Die Größe des Netzes hat hingegen nur bei sehr kleinen Anlagen von 1 MW einen signifikanten Einfluss auf die Verteilungskosten (Abbildung 36).



Quelle:(Büchle et al., 2015)

Abbildung 36: Wärmeverteilungskosten in Abhängigkeit der Wärmedichte

7.1 Ermittlung der lokalen Wärmebedarfe und -dichten

Grundlage zur Ermittlung der lokalen Wärmebedarfe und -dichten stellen die Simulationsergebnisse zur Entwicklung des Wärmebedarfs in Luxemburg dar. Die Ergebnisse werden zunächst auf Gemeindeebene und dann auf Einzelgebäude herunter gebrochen. Auf Gemeindeebene wird dabei die Verteilung der unterschiedlichen Gebäudetypen und Nutzungsarten von Wohn- und Nichtwohngebäuden berücksichtigt sowie die Verteilung der Baualtersstruktur bei Wohngebäuden, um jeweils einen spezifischen Nutzwärmebedarf pro Quadratmeter Grundfläche zu ermitteln. Über die Katasterdaten fließen die genauen Gebäudestandardorte in das Modell ein. Der Wärmebedarf der Neubauten im Simulationszeitraum bis zum Jahr 2030 wird entsprechend der Bevölkerungsentwicklung der letzten zehn Jahre auf die Gemeinden verteilt.

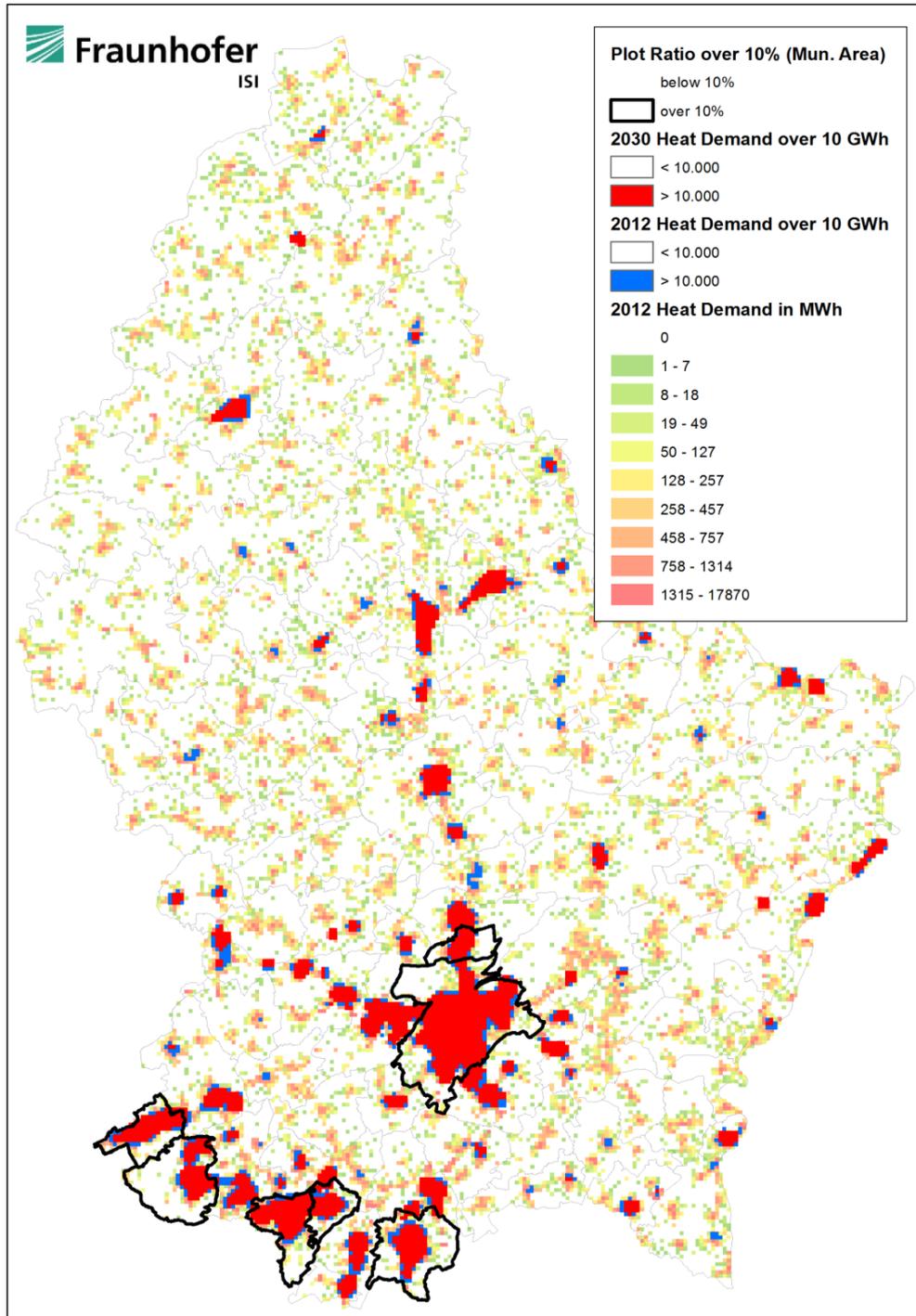
Die Verteilung erfolgt dabei basierend auf den vorhandenen Hausumringen innerhalb einer GIS-Umgebung. Dabei wird nach Wohn- und Nichtwohngebäuden unterschieden.

Im Folgenden wird über die gesamte Landesfläche ein Vektorgitter von 250 x 250m angelegt und die Bedarfe der einzelnen Gebäude aggregiert. Für das Jahr 2030 wurden zusätzlich die Neubauten auf diese Kacheln verteilt. In einem weiteren Arbeitsschritt werden im Umkreis jeder Kachel die Wärmebedarfe innerhalb eines Quadratkilometers aufaddiert und geprüft, ob die kritische, jährliche Wärmebedarfsmenge von 10 GWh/a erreicht wird. Dieses Verfahren wird für das Jahr 2012 sowie 2030 angewendet. Die betroffenen Gitter werden bei Erfüllung des Kriteriums kodiert und anschließend der gesamte Wärmebedarf innerhalb dieser Areale aufaddiert.

7.2 Ergebnisse der Wärmebedarfskarten für die Jahre 2012 und 2030 für Luxemburg

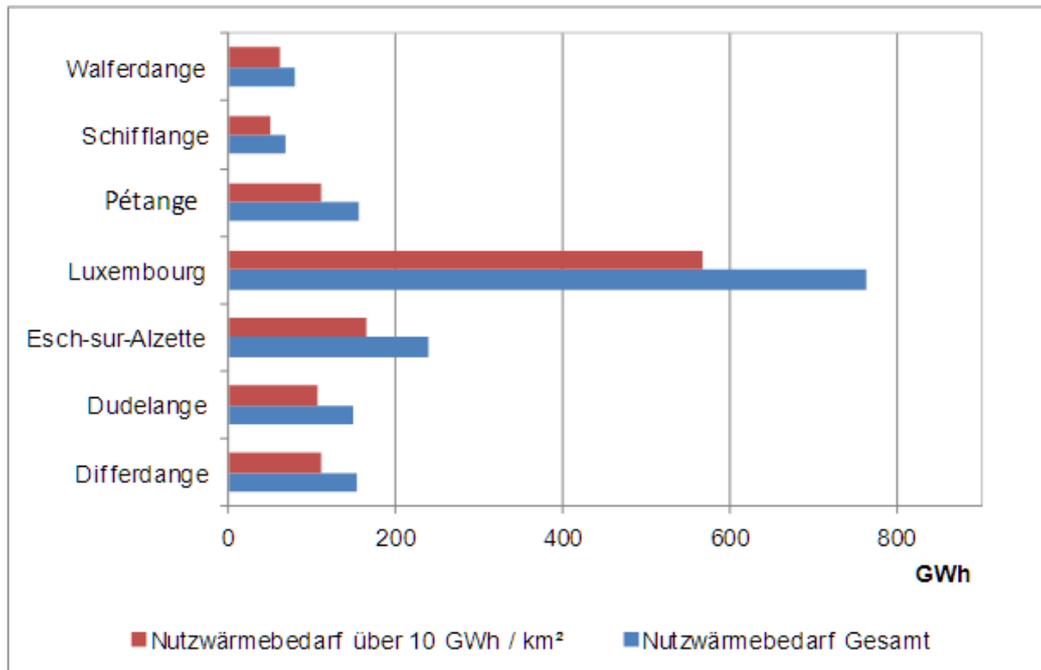
In den sieben Gemeinden, die eine Geschossflächenzahl über 0,1 erreichen, sind große Gebiete vorhanden, welche eine Wärmedichte und Wärmeabsatz über 10 GWh im Jahr erreichen. Darüber hinaus gibt es weitere Gemeinden, die zwar eine niedrige Geschossflächenzahl aufweisen, jedoch trotzdem relevante Gebiete aus der Wärmebedarfsanalyse aufweisen. Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse hinsichtlich der Verteilung des Wärmebedarfs und weist die Gebiete aus, welche die zuvor definierten Bedingungen erfüllen. Die Karte zeigt darüber hinaus, welche Gebiete in den einzelnen Gemeinden aufgrund des Wärmebedarfsrückgangs für eine wirtschaftliche Erschließung durch Wärmenetze wegfallen (blau markiert).

Den größten Wärmebedarf von über 700 GWh weist dabei die Gemeinde Luxemburg-Stadt aus gefolgt von Esch-sur-Alzette (siehe Abbildung 38). Insgesamt beträgt der durch Wärmenetze erschließbare Wärmebedarf in den sieben Gemeinden, die die Potenzialgrenzen erfüllen rund 1.606 GWh im Jahr 2012, der bis zum Jahr 2030 auf 1.170 GWh absinkt. Dies entspricht im Jahr 2030 einem Anteil von 5 % am Wärmebedarf des Gebäudebereichs.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 37: Verteilung des Nutzwärmebedarfs und Gebiete wirtschaftlichem Potenzial für Wärmeversorgung

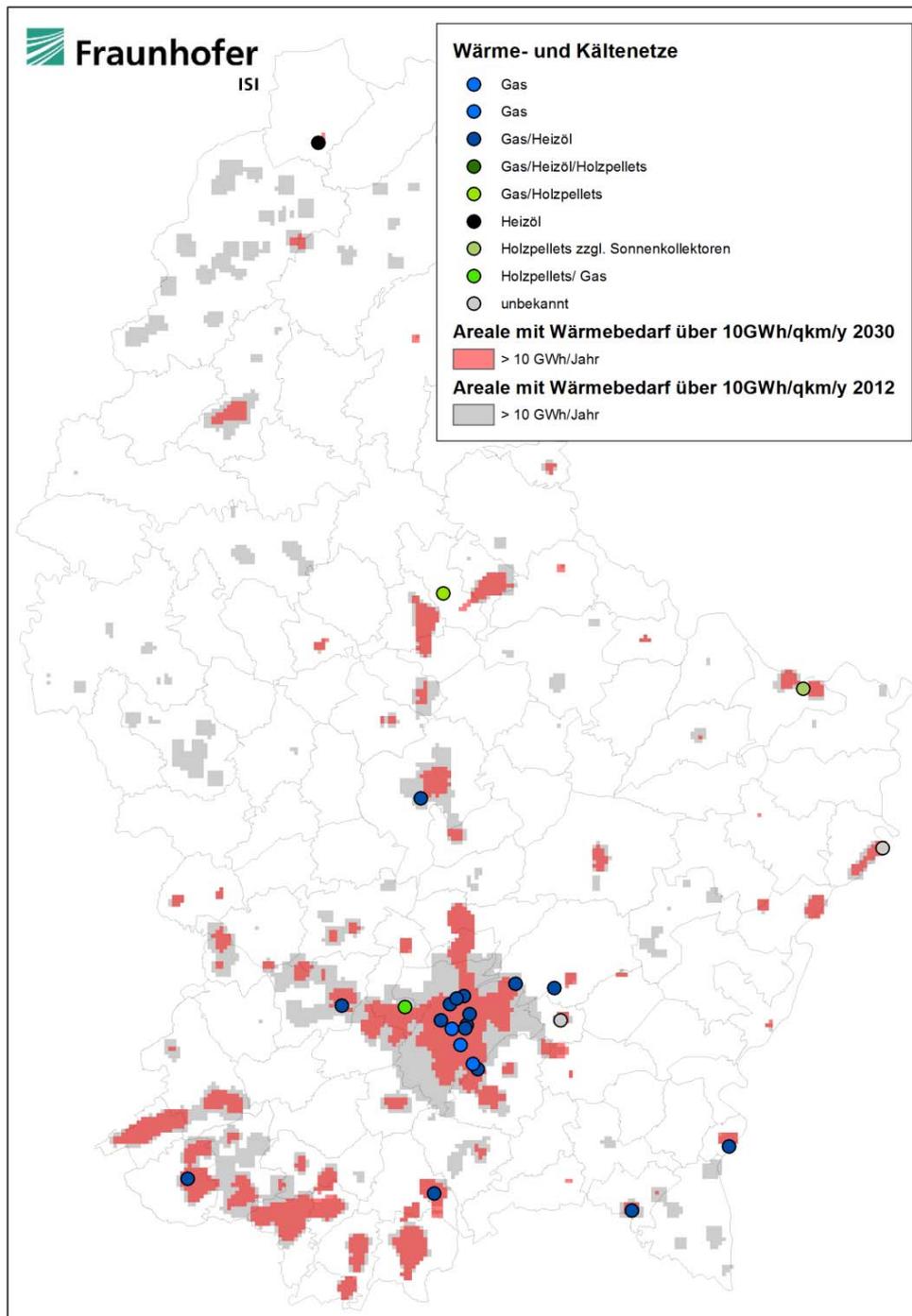


Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 38: Potenziell erschließbarer Wärmebedarf in den Wärmenetzregionen

Die Analyse der derzeitigen Wärmenetze⁶ zeigt, dass der überwiegende Anteil der Netze in den Gemeinden mit wirtschaftlichem Wärmenetzpotenzial liegt. Die meisten Netze befinden sich dabei im Großraum Luxemburg-Stadt mit den angrenzten Gemeinden (Abbildung 39). Es zeigt sich jedoch auch, dass kleinere Wärmenetze in Gemeinden vorhanden sind, die zwar nicht das Kriterium der Geschossflächenzahl erfüllen, jedoch nach der durchgeführten Wärmebedarfsanalyse auch noch im Jahr 2030 Wärmedichten von über 10 GWh/km² pro Jahr mit einem entsprechenden Mindestwärmeabsatz aufweisen.

⁶ Die Analyse umfasst die von LuxEnergie betriebenen Wärme- und Kältenetze (LuxEnergie, 2016)

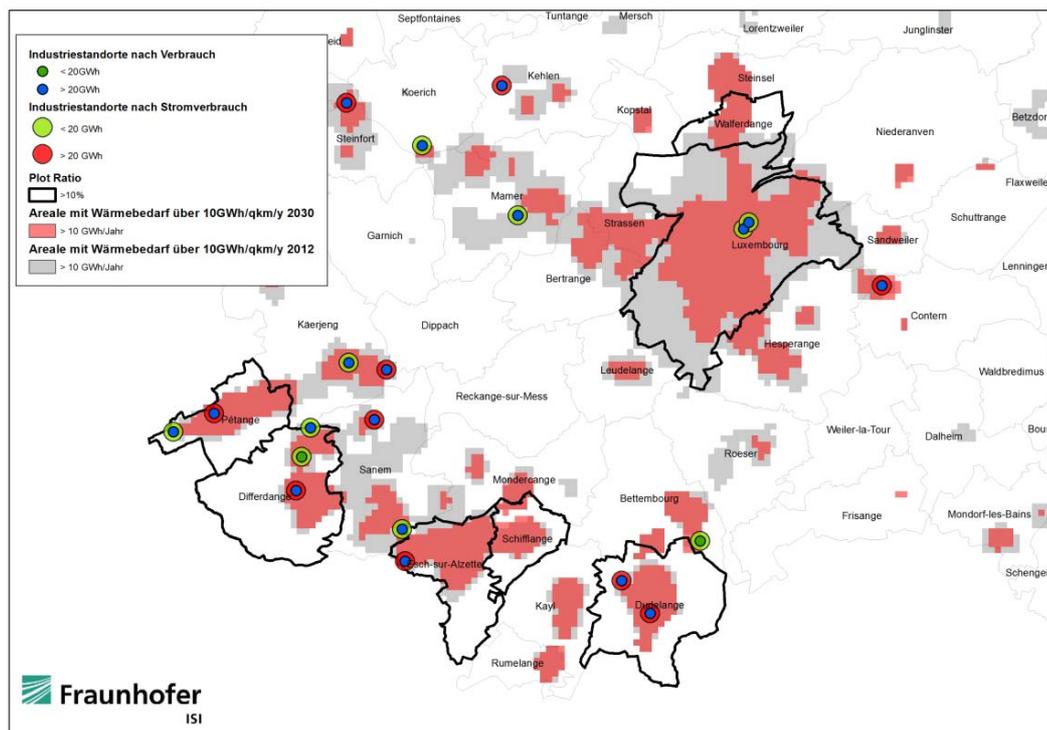


Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 39: Wirtschaftliches Wärmenetzpotenzial und derzeitige Wärmenetze

7.3 Detaillierte Wärmebedarfskarten für Gemeinden mit wirtschaftlichem Wärmenetzpotenzial

Die detaillierte Analyse der ermittelten Wärmenetzregionen macht deutlich, welche Gebiete bis zum Jahr 2030 unter die Mindestgrenze der benötigten Wärmedichte fallen. Allerdings wird auch deutlich, dass sich Möglichkeiten für eine zusammenhängende Wärmenetzversorgung auch außerhalb der Gemeindegrenzen ergeben. So wird beispielsweise die Gemeinde Sanem nicht als Wärmenetzregion ausgezeichnet, da die Mindestgeschossflächenzahl nicht erreicht wird. Die Wärmebedarfskarte zeigt jedoch, dass sich ein zusammenhängendes Gebiet mit ausreichender Wärmedichte zusammen mit den angrenzenden Gemeinden ergibt. Abbildung 40 zeigt zudem die Industriestandorte in den Gemeinden, die je nach gefordertem Temperaturniveau als zusätzliche Wärmeabnehmer oder -einspeiser von Abwärme bei einer Wärmenetzversorgung eingebunden werden könnten.



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 40: Detaillierte Darstellung der Wärmebedarfe und der Industriestandorte in den Wärmenetzregionen

7.4 Fazit zu Potenzial für hocheffiziente KWK-Anlagen

Insgesamt zeigt sich, dass ein deutlicher Anteil des verfügbaren KWK-Potenzials im Gebäudebereich durch bestehende Nahwärmekonzepte bereits erschlossen ist. Zukünftig besteht jedoch nach den Analysen der Studie noch ein Potenzial, den aktuellen Stand weiter auszubauen. Aktuell werden in den Sektoren Haushalte und GHD nach der Energiebilanz 2014 insgesamt 908 GWh Wärme (Endenergie) eingesetzt. Dem steht in den sieben identifizierten Gemeinden ein Potenzial von 1.606 GWh an Nutzwärme im Gebäudebereich gegenüber. Unterstellt man einen Nutzwirkungsgrad von 85 %, ergibt sich ein Endenergiebedarf für diese Nutzwärme von 1.889 GWh. Das wirtschaftliche Potenzial im Gebäudebereich wird damit zu ca. 50 % ausgeschöpft. Mittelfristig sinkt durch eine verbesserte Energieeffizienz im Gebäudebereich der Nutzwärmebedarf auf 1.170 GWh (Nutzwärme) in 2030 bzw. auf 1.376 GWh (Endenergie). Damit ist mittelfristig noch eine weitere Steigerung um 50 % ausgehend vom aktuellen Stand möglich. Weitere Potenziale, die über die 1.170 GWh Nutzwärme hinausgehen, bestehen dabei jedoch durch die Erschließung von Nachbargemeinden der sieben identifizierten, die alleine die notwendige Wärmedichte nicht erreicht haben (u.a. die Gemeinde Sanem).

Im Industriebereich liegt der KWK-geeignete Endenergiebedarf in 2014 bei ca. 1.315 GWh, wovon heute geschätzt ca. 187 GWh⁷ durch KWK-Wärme gedeckt werden. Dies entspricht ca. 14 % des technischen Potenzials. Eine Wirtschaftlichkeit für eine weitere Erschließung ist derzeit nicht gegeben, wie die Stilllegung der bestehenden Industrie-KWK-Anlagen CEDUCO, CEGYCO und TwinERG zeigen. Mittelfristig wird die Wirtschaftlichkeit ebenfalls nur für eine begrenzte Ausweitung der Industrie-KWK erwartet, so dass dann ca. 500 GWh an KWK-Wärme (Endenergie) erzeugt werden könnten. Hierzu sind allerdings gute Standortbedingungen, d.h. lange Laufzeiten der Anlagen, notwendig. Ebenso müssen längere Amortisationszeiten akzeptiert werden.

⁷ Die Energiebilanz 2014 weist 157 GWh netzgebundene Wärme aus, hier ist zusätzlich noch selbstverbrauchte Wärme mit eingerechnet

8 Handlungsempfehlungen und Strategien zur zukünftigen Deckung des Wärmebedarfs

Für die Ableitung zukünftiger Strategien zur Rolle von KWK-Technologien und Fernwärme und zur Deckung des Wärmebedarfs ist zwischen Gebieten, die eine hohe Wärmedichte und z.T. bereits Nah- oder Fernwärmesysteme besitzen sowie Gebiete mit niedriger Wärmedichte zu unterscheiden. Weitere zentrale Punkte sind die Fragen nach den eingesetzten Energieträgern (erneuerbare bzw. fossile) sowie die Art des Gebäudebestandes (Neubau bzw. Altbau) sowie die Gebäudesanierungsmöglichkeiten.

8.1 Handlungsempfehlungen für Gebiete mit hoher Wärmedichte

Gebiete mit hoher Wärmedichte sind im Rahmen der Studie identifiziert worden und umfassen in der Regel auch die Gebiete, in denen heute bereits Nah- beziehungsweise Fernwärmenetze gebaut worden sind. Dies betrifft vor allem die 7 Gemeinden mit einer Plot ratio $> 0,1$. Auf Grund der hohen Wärmedichten in diesen Gebieten sind die Möglichkeiten für die Erreichung einer Wirtschaftlichkeit für zentrale KWK-Anlagen mit einer netzbasierten Wärmeverteilung deutlich besser als in Gebieten mit niedriger Wärmedichte.

In Gebieten mit hoher Wärmedichte kann demnach eine zentrale Wärmeversorgung mit KWK-Erzeugern gegenüber anderen Wärmeversorgungsoptionen eine wirtschaftliche Option sein. Dies ist insbesondere der Fall, wenn große zentrale Wärmeerzeuger als günstige Wärmeerzeugungsoptionen auf Grund des vorhandenen Wärmebedarfs eingesetzt und ausgelastet werden können. Durch Skaleneffekte sinken die spezifischen Investitionen für Wärmeerzeuger je größer die Anlagen werden. Bei gleicher Auslastungsdauer sind dann die Kosten für die erzeugte MWh Wärme bei einem großen Wärmeerzeuger günstiger als bei einer kleinen Anlage.

Darüber hinaus können Wärmenetze mit KWK-Erzeugern mittelfristig auch dort eine interessante Option sein, wo die Sanierungssituation (Altbaubestand) schwierig ist und gleichzeitig auch der Einsatz von dezentralen erneuerbaren Energien (z.B. Wärmepumpe, Pelletkessel) schlecht möglich ist

Umgekehrt bedeutet dies allerdings auch, dass in Gebieten, in denen eine Sanierung des Gebäudebestands gut möglich ist und gleichzeitig auch die Installation von dezentralen Erneuerbaren Energien erfolgen kann, ein Ausbau bzw. Neubau von Wärmenetzen nicht empfohlen wird. Von daher sollte einer Entscheidung zu einem

weiteren Ausbau bzw. einer Neuinstallation von Wärmenetzen immer auch eine Prüfung der Sanierungsmöglichkeiten als auch der dezentralen Erzeugung von erneuerbarer Wärme voraus gehen. Erst eine solche ganzheitliche Betrachtung ermöglicht eine effiziente Wärmeversorgung.

Als technologische Option für die Versorgung eines Wärmenetzes sollte jeweils geprüft werden, ob der Einsatz von erneuerbaren Energien möglich ist. Hier bieten sich Pellet- bzw. Hackschnitzelkessel in Kombination mit Dampfturbinen an, die allerdings nur eine geringe Stromerzeugung ermöglichen. Andere Technologien wie etwa die Holzvergasung und anschließende Verstromung in einem BHKW haben sich bisher nur bedingt etabliert, würden aber eine höhere Stromerzeugung ermöglichen. Ist eine Versorgung auf Basis erneuerbarer Energien nicht möglich, z.B. weil lokal keine Biomasse verfügbar ist, ist auch der Einsatz erdgasbasierter KWK-Anlagen möglich.

Für eine konkrete Umsetzung in einzelnen Projekten sollten tiefergehende Analysen durchgeführt werden, um die Vorteilhaftigkeit zu bewerten. Dafür ist eine Analyse der lokalen Gegebenheiten notwendig, die u.a. die Topologie aber auch bereits geplante andere Maßnahmen, die Einfluss auf den langfristigen lokalen Wärmebedarf haben, aufgreift. Allerdings dürfte die Wirtschaftlichkeit sich ohne eine finanzielle Förderung für die Wärmeproduktion und/oder das Nah- oder Fernwärmenetz, unabhängig davon, ob auf fossile oder erneuerbare Energie zurückgegriffen wird, in der Regel nicht darstellen lassen.

Gute Anknüpfungsmöglichkeiten für wirtschaftliche Lösung dürften sich insbesondere dann ergeben, wenn eine Abwärmenutzung aus bestehenden industriellen Anlagen möglich ist, so wie dies beispielsweise in einem größeren geplanten Vorhaben in einem neu entstehenden Stadtteil von Luxemburg Stadt (« *Cloche d'Or* ») durch die Nutzung von Abwärme aus einer Müllverbrennungsanlage umgesetzt werden soll.

Vor dem Hintergrund der Transformation des Strom- und Wärmesystems zu einer überwiegend auf erneuerbaren Energien basierten Versorgung sollte eine Strategie für die zentrale Wärmeversorgung jedoch nicht den Ausbau zentraler KWK Erzeugungskapazitäten in den Vordergrund stellen, sondern den Ausbau von Wärmenetzen, die als flexibles Strom- Wärmesystem dienen. Zentrale KWK-Anlagen sind in diesem System nur eine von verschiedenen Optionen. In den identifizierten Gebieten mit hoher Wärmedichte stellen in der Regel zentrale KWK-Anlagen auf Grund von Skaleneffekten allerdings die günstigere Option im Vergleich zu dezentralen KWK-Anlagen für Einzelobjekte dar.

Rolle der Wärmenetze im zukünftigen Energiesystem

Wärmenetze können eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung des Energiesystems übernehmen. Insbesondere in städtischen und dichtbesiedelten Gebieten mit Geschosswohnungsbauten sind die Potenziale für den Einsatz dezentraler erneuerbarer Energien zur Wärmeversorgung wie Wärmepumpen, Solaranlagen und Biomassekessel stark limitiert. Gleichzeitig sind ambitionierte Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs aufgrund verschiedener Dämmrestriktionen wie Denkmalschutz oder Abstandsregelungen nur bedingt umsetzbar. Wärmenetze bieten unmittelbar und perspektivisch eine wirtschaftliche Wärmebereitstellung, die überwiegend oder ausschließlich über erneuerbare Energien gedeckt werden kann. Auch wird die Erschließung von Abwärmepotenzialen aus der Industrie wie bereits im vorherigen Abschnitt diskutiert ermöglicht.

Wärmenetze stellen in Gebieten mit hoher Wärmedichte, die ungünstige Bedingungen für eine Sanierung bzw. für einen Einsatz dezentraler erneuerbarer Energien haben, zudem die zentrale Infrastruktur bei der Kopplung des Strom- und Wärmebereichs dar. Durch den Einsatz von Wärmespeichern kann eine strombedarfsorientierte Erzeugung durch KWK-Anlagen ermöglicht werden. Auch kann überschüssiger Strom aus Wind- und PV-Anlagen gespeichert werden oder effizient durch Power-to-Heat Optionen wie Großwärmepumpen genutzt werden. Daher wird empfohlen, in den identifizierten 7 Gemeinden sowie im Einzelfall auch in anderen Regionen mit hoher Wärmedichte einen Ausbau der Wärmenetze zu prüfen. In Kombination mit einer ambitionierten Sanierungsstrategie kann dies eine effiziente Möglichkeit für eine Dekarbonisierung des Wärmebereichs vor allem auch für Bestandsgebäude darstellen. Wärmenetze stellen damit eine zusätzliche Maßnahme zur Dekarbonisierung neben der Gebäudesanierung dar. Dabei sollte eine enge Abstimmung mit Sanierungsmaßnahmen erfolgen. Die Gebäudesanierung stellt eine wichtige Säule im Bereich der Klimaschutzstrategie dar, da insbesondere hier langfristig deutliche Effizienzsteigerungen erreicht werden müssen. Daher sollte bei der weiteren Entwicklung von Wärmenetzen und KWK-Technologien zunächst immer geprüft werden, welcher mittelfristige Rückgang beim Wärmebedarf sich durch Sanierungsmaßnahmen im Bereich der Gebäudeeffizienz in den betrachteten Gebieten ergibt. Zeichnet sich hier ab, dass auch mittelfristig ein hoher Wärmebedarf besteht, der nicht oder nur schwierig durch dezentrale erneuerbare Energien gedeckt werden kann, ist zu prüfen, ob eine Wirtschaftlichkeit für eine wärmenetzbasierte Versorgung gegenüber anderen Wärmeoptionen gegeben ist. Übergeordnetes Ziel sollte dabei sein, möglichst kostengünstige Pfade zur Reduktion der Emissionen im Wärmebereich zu identifizieren.

Sollten sich zukünftig Eigenversorgungskonzepte mit PV und Speichersystemen auf Grund von deutlich gesunkenen Speicherkosten als wirtschaftlich erweisen, stellt dies keine Konkurrenz zum empfohlenen Ausbau der Wärmenetze in Gebieten mit hoher Wärmedichte und schwieriger Sanierungssituation dar. Der Ausbau der Wärmenetze würde vornehmlich Bestandsgebäude in dichtbesiedelten Gebieten betreffen, in denen Eigenversorgungskonzepte mit PV und Speichern schwierig zu realisieren sind. Derartige Konzepte sind eher im Neubau und bei Einfamilienhäusern umsetzbar und daher eine passfähige Ergänzung zu einem möglichen Wärmenetzausbau.

Anforderungen an ein modernes Strom-Wärme-System

Zentrale KWK-Anlagen sind nur ein möglicher Bestandteil eines modernen Strom-Wärme-Systems. Weitere Erzeugungsoptionen stellen ungekoppelte EE-Wärmeerzeuger dar, wie große Solarkollektorfelder oder Großwärmepumpen. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden volatilen Stromerzeugung durch Wind und PV ist die wichtigste Anforderung an ein modernes Strom-Wärme-System die Bereitstellung von Flexibilität und Abdeckung der Residuallast im Stromsystem bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs durch geringen Primärenergieeinsatz. Dies kann durch multivalente Systeme erreicht werden, welche unterschiedliche Energieformen systemdienlich kombinieren, beispielsweise durch die Integration einer stromerzeugenden Wärmeversorgung (KWK-Anlage) mit einer stromverbrauchenden Wärmeversorgung (Wärmepumpe, Elektrodenheizkessel).

Fazit

Die Wärmebedarfsanalyse hat gezeigt, dass in Gebieten mit hoher Wärmedichte und dabei vor allem in 7 Gemeinden mit einer Plot-ratio größer als 0,1 ein gewisses Potenzial für eine wärmenetzbasierte Versorgung in Luxemburg besteht, welches auf rund 5 % des Wärmebedarfs des Gebäudebereichs im Jahr 2030 abgeschätzt wird. Das realisierbare ökonomische Potenzial hängt dabei von weiteren lokalen Randbedingungen ab und inwieweit hohe Anschlussgrade erzielt werden können. Eine wichtige Maßnahme zur genaueren Abgrenzung des ökonomischen Potenzials und zu dessen Realisierung stellen kommunale Wärme- und Kälteversorgungspläne dar, welche nicht nur die Versorgungsseite sondern auch kommunale Sanierungsstrategien einbeziehen. Förderinstrumente, die auf den Ausbau von Wärmenetzen abzielen, sollten die dargestellten erzeugungsseitigen Anforderungen an ein modernes Strom-Wärme-System berücksichtigen.

8.2 Handlungsempfehlung für Gebiete mit niedriger Wärmedichte und für dezentrale KWK-Anlagen

Die Analyse des Wärmebedarfs hat gezeigt, wo Gebiete mit hoher Wärmedichte bestehen, in welchen Möglichkeiten bestehen könnten, Wärmenetze mit zentraler Wärmeproduktion wirtschaftlich zu betreiben. Dies betrifft insbesondere 7 Gemeinden in Luxemburg. Außerhalb dieser Gemeinden gibt es ebenfalls Gebiete, die ggf. für Einzelanlagen einen ausreichenden Wärmebedarf aufweisen, um auch hier KWK-Anlagen wirtschaftlich zu betreiben. Mittelfristig reduzieren sich diese Gebiete auf Grund von Gebäudesanierungsmaßnahmen jedoch deutlich. Eine Ausweitung der Wärmenetze und eine Installation von zentralen KWK-Anlagen werden für diese Gebiete daher nicht empfohlen. In Einzelfällen und bei bestehenden KWK-Anlagen ist jedoch zu prüfen, in welchem Umfang eine lokale Ausweitung bestehender Netze wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Auf Grund der lokalen Gegebenheiten z.B. einer hohen lokalen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien wie Biomasse (Holz) können auch kleine Netze sinnvoll sein.

Derartige kleine Wärmenetze stellen auch eine Option für eine stärkere Nutzung von Biomasse auf Basis von Holz bzw. Pellets dar und eröffnen auch eine Nutzung z.B. von Pelletimporten, wenn über diese Option ein größerer Beitrag zur Erneuerbaren Stromerzeugung erreicht werden soll.

Im Rahmen dieser Studie ist nicht untersucht worden, ob der Einsatz dezentraler KWK-Anlagen aus volkswirtschaftlicher Sicht eine sinnvolle und wichtige Technologie für die Transformation des Gesamtsystems darstellt oder ob im Bereich der dezentralen Versorgung eine Umstellung auf ungekoppelte erneuerbare Wärmetechnologien angestrebt werden sollte. Dazu wäre eine umfassende Analyse auch der nicht-gekoppelten Erzeugungsoptionen sowie der mittelfristigen Entwicklung des Stromsystems einschließlich der erneuerbaren Energien im europäischen Strommarkt notwendig gewesen.

Sofern dezentrale KWK-Anlagen jedoch als zentraler Bestandteil des zukünftigen Energiesystems gesehen werden, können folgende Handlungsempfehlungen hinsichtlich der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen und zur Ausgestaltung eines Fördersystems gegeben werden.

Im Bereich der Wohngebäude ist das wirtschaftliche Potenzial für den Einsatz dezentraler KWK-Anlagen unter den derzeitigen Rahmenbedingungen in Luxemburg als gering einzuschätzen. Sofern KWK-Anlagen im Energiesystem möglichst zur Eigenstromdeckung eingesetzt werden sollen, können ökonomische Potenziale im Mehrfamilienhausbereich erschlossen werden. Dies kann insbesondere durch

Förderungen von Contracting und Abschaffung rechtlicher und informatorischer Hemmnisse beim Verkauf von Mieterstrom und bei der Schaffung von Nutzersgesellschaften erreicht werden. Wirtschaftliche Potenziale für eine systemdienliche Netzeinspeisung mit geringem Eigenstromverbrauch sind aufgrund der hohen Differenz zwischen Großhandelsstrompreis und Endkundenpreis im Bereich der Wohngebäude nicht zu sehen.

Im Bereich der Industrie sind die wirtschaftlichen Potenziale auf Grund der erwarteten niedrigen Großhandelspreise ebenfalls sehr begrenzt. Auch hier ergeben sich insbesondere durch die Vermeidung von Fremdstrombezug und dem Selbstverbrauch in einem begrenzten Ausmaß zusätzliche Potenziale für einen Ausbau der industriellen KWK-Stromerzeugung. Hierfür sind längere Amortisationszeiten notwendig, die in der Industrie auf Grund der Unsicherheit bei der zukünftigen Entwicklung meist nicht umgesetzt werden können. Daher können folgende Handlungsempfehlungen für dezentrale KWK-Anlagen in gewerblichen und industriellen Anwendungen gegeben werden.

Für fossile Bestandsanlagen in der Industrie ist die Wirtschaftlichkeit in der letzten Zeit deutlich schlechter geworden, was zur Stilllegung der meisten bestehenden industriellen KWK-Anlagen geführt hat. Auch die erwartete Entwicklung der Erdgas- und Strompreise verbessert die Wirtschaftlichkeit mittelfristig nicht substantiell. Insgesamt geht die Auslastung fossiler KWK-Anlagen wie auch die von anderen Stromerzeugungsanlagen zurück. Die Analysen haben jedoch gezeigt, dass bei Standorten mit einem kontinuierlichen Wärmebedarf und damit hohen Auslastungen die Erzeugungskosten nahe an den Großhandelsstrompreisen und unter den Strombezugskosten für Unternehmen liegen. Um diese hocheffizienten Potenziale zu erschließen, sollten klare Rahmenbedingungen für den Selbstverbrauch geschaffen werden, die den Selbstverbrauch im Rahmen der vertretbaren Möglichkeiten weiterhin erlauben und dabei jedoch einen flexiblen Betrieb fördern. In diesem Kontext könnte die Prüfung der Wirkung von Investitionszuschüssen eine interessante Option sein.

Ein Fokus sollte dabei auf Standorten liegen, an denen auch eine Einbindung in Fernwärmenetze möglich ist bzw. wo eine hohe Wärmedichte in der Umgebung auftritt. Industrielle Standorte können bei einer Einbindung in ein Fernwärmenetz die Wärmedichte bzw. die Wärmeabnahme erhöhen und damit die Wirtschaftlichkeit von Fernwärmenetzen verbessern. Darüber hinaus ist über ein Fernwärmenetz mittelfristig auch eine Bereitstellung von erneuerbarer Wärme im Industriebereich einfacher möglich. Umgekehrt können Industriestandorte mit Abwärmepotenzialen bzw. eigenen Wärmeerzeugungsanlagen ihre Wirtschaftlichkeit verbessern, indem sie Wärme in ein Fernwärmenetz einspeisen.

Literatur

- Atanasiu, B., Maio J., Staniaszek, D., Kouloumpi, I., Kenkmann, T. (2014): OVERVIEW OF THE EU-27 BUILDING POLICIES AND PROGRAMS. FACTSHEETS ON THE NINE ENTRANZE TARGET COUNTRIES. Report published within the ENTRANZE project. Co-funded by the Intelligente Energy Europe Programme of the European COMMISSION.
- BDH (2013): Efficient systems and renewable energies. Federal Industrial Association of Germany, House, Energy and Environmental Technology.
- Büchle, R., Haas, R., Hartner, M., Hirner, R., Hummel, M., Kranzl, L., Müller, A., Bons, M., Grave, K., Slingerland, E., Deng, Y., Blok, K. (2015): Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK und effizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung. Technische Universität Wien, Ecofys beauftragt durch BMWF, Österreich, Wien.
- Circulaire no. 3178: Circulaire aux administrations communales, aux syndicats de communes, aux établissements publics places sous la surveillance des communes, Concerne: Fonds pour la protection de l'environnement, online verfügbar unter: <http://www.myenergy.lu/fr/mediatheque/telechargements/telecharger/860>
- Dengler, J., Kost, C., Henning, H.-M., Schnabel, L., Jochem, E., Torro, F., Reitze, F., Steinbach, J. (2011): Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie Arbeitspaket 1 - Bestandsaufnahme und Strukturierung des Wärme- und Kältebereichs. Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, IREES, Öko-Institut, Bremer-Energie-Institut, TU Wien. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Freiburg, Karlsruhe.
- Enovos (2014): Annual Report 2013 Enovos Luxembourg, online verfügbar unter <http://www.enovos-invest.lu/en/annual-report/>
- Eurostat (2015): Eurostat Energiedaten, Daten zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) 2005 – 2013, online verfügbar unter <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/4956229/CHP+data+2005-2013/62e87958-0b9a-4195-af70-356493e12233>
- Fleiter, T. et al. (2012): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008. (Auswertung für das Jahr 2008). Im Auftrag des Umweltbundesamts, online unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4267.pdf> (20 May, 2016).

- Fleiter, T.; Steinbach, J.; Ragwitz, M. (projekt coordination) et al. (2016): Mapping and analyses for the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel development (fossil/renewables). Brussels: European Commission, DG Energy.
- FPE (1999): Loi modifiée du 31 mai 1999 portant institution d'un fonds pour la protection de l'environnement
- GeoPortalLuxembourg (2016): BASE DE DONNEES TOPO-CARTOGRAPHIQUE DU GRAND DUCHE DE LUXEMBOURG (BD - L - TC) [WWW Document]. Adm. du Cadastre la Topogr. Gd. DUCHE Luxemb.
- Guide (2012): Ministère de l'Economie et du Commerce extérieur, 2012. Guide du requérant – loi environnement.
<http://www.guichet.public.lu/entreprises/de/publications/exploitation-environnement/guide-requerant/index.html>.
- Hofmann, F., Schimschar, S., Bettgenhäuser, K., Weissleder, U., Fröhlich, J., Horst, J., Hoffmann, P., Mahler, M., Breitschopf, B., Steinbach, J., Ragwitz, M., Bürger, V., Becker, L., Klinski, S. (2011). Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichtes gemäß § 18 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz.
- ILR (2016): Statistiques, Institut Luxembourgeois de Régulation online verfügbar unter <http://www.ilr.public.lu/electricite/statistiques/index.html>
- Klauß, S. (2010): Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) sowie des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), Kassel, Deutschland.
- Klobasa, M., Eikmeier, B., Schulz, W. (2008): Endbericht für die Potenzialstudie hocheffizienter KWK-Anlagen in Luxemburg. FraunhoferISI, Bremer Energie Insitiut, Karlsruhe.
- Kranzl, L., Hummel, M., Müller, A., Steinbach, J. (2013): Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. Energy Policy 59, 44–58.
- Lichtmeß, M. (2008): Neue Energieeinsparverordnung in Luxemburg – LuxEeB Chaux de Contern. Globlet Lavnadier & Associés.

- Lichtmeß, M., Knissel, J. (2014): Nationaler Plan zur Erhöhung der Zahl der Niedrigstenergiegebäude. Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur Direction générale de l'Énergie 19-21, Luxembourg.
- Lichtmeß, M., Viktor, S. (2014): Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz für neue und bestehende Wohn- und Nichtwohngebäude. Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg Ministère de l'Économie Direction générale de l'Énergie.
- LuxEnergie (2016): LuxEnergie Referenzen - Wärme- und Kältenetze [WWW Document]. URL <http://www.luxenergie.lu/de/referenzen> (accessed 3.31.16).
- Ministère de L'Économie (2014): Dritter Nationaler Energieeffizienzaktionsplan Luxemburg. Luxembourg.
- Primes (2014): EU Energy, Transport and GHG Emissions – Trends to 2050, Reference Scenario 2013, im Auftrag der European Commission, DG Energy online <http://ec.europa.eu/transport/media/publications/doc/trends-to-2050-update-2013.pdf>
- Prognos AG (2014): Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014 im Auftrag des BMWI, Prognos, Fraunhofer IFAM, IREES.
- RGD 2012: Règlement grand-ducal du 26 décembre 2012 relatif à la production d'électricité basée sur la cogénération à haut rendement, online unter: <http://eli.legilux.public.lu/eli/etat/leg/rgd/2012/12/26/n17>
- RGD 2014: Règlement grand-ducal du 1er août 2014 relatif à la production d'électricité basée sur les sources d'énergie renouvelables et modifiant, online unter: <http://eli.legilux.public.lu/eli/etat/leg/rgd/2014/08/01/n1>
- Schimschar, S., Boermans, T., Urban, D. (2010a): Energetische Anforderungen und flankierende Maßnahmen für den Gebäudebestand in den mitteleuropäischen Nachbarländern, BMVBS-Online-Publikation, Nr. 23/2010 Energetische. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).
- Schimschar, S., Boermans, T., Urban, D. (2010b): Energetische Anforderungen und flankierende Maßnahmen für den Gebäudebestand in den mitteleuropäischen Nachbarländern. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).

Sebi, C., Lapillonne, B., Routin, G. (2013): Guideline on the databases and web- tool, Deliverable 6.14 of WP6 from the IEE project Entranze. Energy Economics Group, Natitonal Consumer Research Centre, Fraunhofer ISI, CENER, Politecnico di Milano, Öko-Institut e.V., Sofena, BPIE, Enerdata, SEVEN.

sirAdos (2016): Baupreise.de – Die deutsche Baupreisdokumente als Online Datenbank [WWW Document]. WEKA MEDIA GmbH Co. KG. URL <https://baupreise.de>

Statec (2011a): Immeubles occupés selon le type d'immeuble au 1er février 2011, Recensement général de la population 2011. Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg, Luxembourg.

Statec (2011b): Logements occupés par type d'immeuble, année d'achèvement et surface pour les ménages privés au 1er février 2011, Recensement général de la population 2011. Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg, Luxembourg.

Statec (2013):

http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=9919&IF_Language=fra&MainTheme=4&FldrName=1&RFPath=9796

Statec (2016a): Nombre de bâtiment par commune, genre du bâtiment et année de construction. Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg, Luxembourg.

Statec (2016b): Nombre de logement par commune, genre du bâtiment et année de construction. Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg, Luxembourg.

Statec (2016c): Surface moyenne (en m²) des pièces d'habitation par commune et type de bâtiment. Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg, Luxembourg.

Statec (2016d): Nombre de bâtiment par commune, genre du bâtiment et type de combustible. Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg, Luxembourg.

Statec (2016e): Number, builded volume, floor area of finished buildings by type 1970 - 2013. Institut national de la statistique et des études économiques du Grand-Duché de Luxembourg.

Statec A4100: Energy balance by type of energy products 2000 – 2014, The Statistics Portal of Luxembourg STATEC online verfügbar unter:

http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableViewHTML.aspx?ReportId=4089&IF_Language=eng&MainTheme=1&FldrName=4&RFPath=50

Statec A4201: Net maximum power of the power stations (in MWe) 1960 – 2014, The Statistics Portal of Luxembourg STATEC online verfügbar unter:

http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableViewHTML.aspx?ReportId=6140&IF_Language=eng&MainTheme=1&FldrName=4&RFPath=54

Statec A4203: Electricity generation 1928 – 2014, The Statistics Portal of Luxembourg STATEC online verfügbar unter:

http://www.statistiques.public.lu/stat/TableViewer/tableViewHTML.aspx?ReportId=6142&IF_Language=eng&MainTheme=1&FldrName=4&RFPath=54

Steinbach, J. (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Fraunhofer Verlag, Stuttgart.

Suttor, W. (2009): Blockheizkraftwerke: Ein Leitfaden für den Anwender, 7., vollst. ed. Solarpraxis Ag.

Temming, H. V. (2005): Analysen und Simulationen zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten und Marktpotenziale von Brennstoffzellen in der Industrie. LEE, Bochum.

VDI 2067-1 (2000): VDI Richtlinie: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. Beuth Verlag, Berlin.

VDI-4655 (2008): Reference load profiles of single-family and multi-family houses for the use of CHP systems. Assoc. Ger. Eng. Beuth Verlag. Düsseldorf.

WEO (2015): Internationale Energy Agency (IEA) – World Energy Outlook 2015

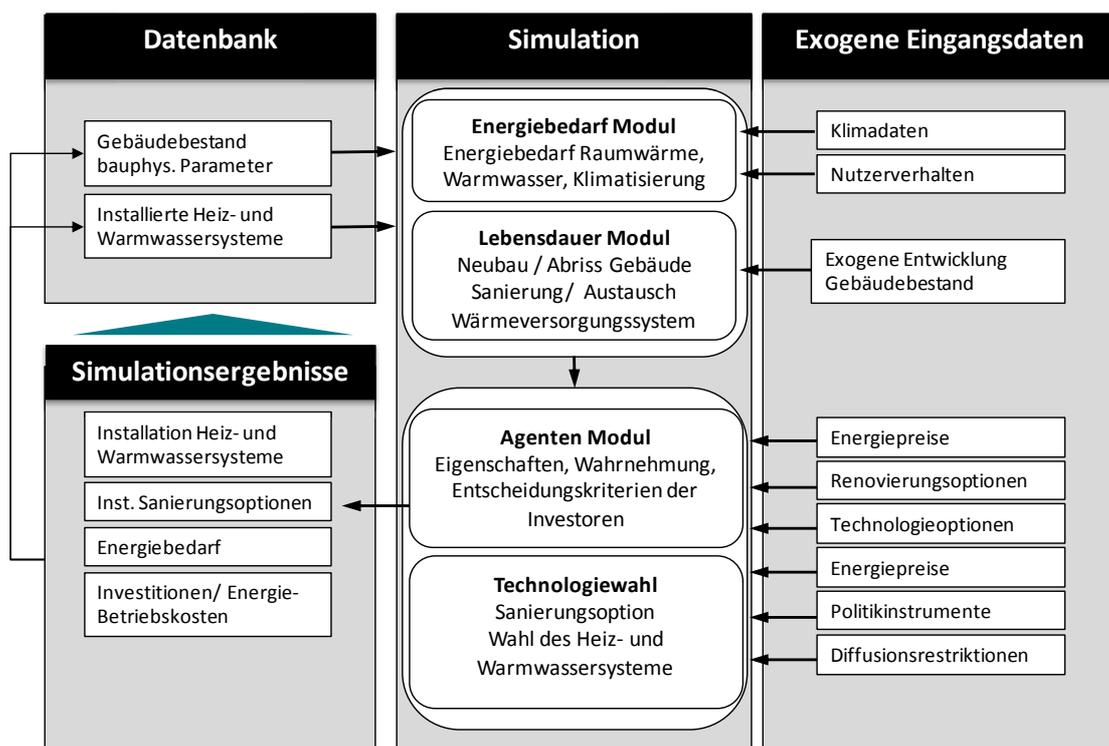
WiMi Lux (2016): Detaillierte Angaben zur installierten Leistung von KWK-Anlagen. Daten bereitgestellt durch das Ministerium für Wirtschaft Luxemburg, Januar 2016

9 Anhang

9.1 Modellbeschreibung Invert/EE-Lab

Zur Ermittlung der Wärmebedarfsentwicklung wird das Simulationsmodell Invert/ EE-Lab eingesetzt, welche von der *Energy Economics Group* der TU Wien entwickelt wurde und gemeinsam mit dem Fraunhofer ISI im Rahmen vieler nationaler und europäischer Projekte eingesetzt und weiterentwickelt worden.

Methodisch stellt Invert/ EE-Lab ein dem *bottom-up*-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen von verschiedenen Förderinstrumenten in Jahresschritten abgebildet werden können (Abbildung 41).



Quelle: (Steinbach, 2015) basierend auf Kranzl et al. (2013)

Abbildung 41: Struktur des Simulationsmodells Invert/ EE-Lab

Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur

Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotenzialen ermittelt.

Mit INVERT/EE-Lab ist es möglich die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren. Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden u.a. folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.

Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, hier besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.

Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem werden entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude die solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.

Politikinstrumente zur Förderung von EE Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.

Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

9.2 Zusätzliche Wärmebedarfskarten

