Wissenschaftliche Beratung zu Fragen der Energiestrategie Luxemburgs mit besonderem Fokus auf Erneuerbare Energien

Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien

Im Auftrag für das luxemburgische Ministerium für Wirtschaft

Michael Schön & Felix Reitze

IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien

Mario Ragwitz

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

Karlsruhe, 18. Dezember 2015

Autoren:

Dipl.-Ing. Michael Schön & Dr. rer. nat. Felix Reitze,
Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES GmbH)

Prof. Dr. Mario Ragwitz ,
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fh-ISI)

Grafik-Bearbeitung: Holger Klein

Bitte beachten Sie, dass dieses Dokument aus Umweltschutzgründen auf den zweitseitigen Druck ausgelegt ist.

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung und Definition von Potenzialen 1
1.1 Aufgabenstellung 1
1.2 Potenzialdefinition 2
2 Detaillierte Potenzial-Analysen für ausgewählte Bereiche der Erneuerbaren Energien 3
2.1 Windenergie 3
2.2 Photovoltaik 10
2.3 Biomasse 17
2.3.1 Feste biogene Energieträger 17
2.3.1.1 Energieholz 17
2.3.1.2 Alt- und Restholz 18
2.3.1.3 Landwirtschaftliche Reststoffe 20
2.3.1.4 Energiepflanzen 20
2.3.1.5 Biogener Müllanteil 22
2.3.1.6 Klärschlamm 22
2.3.2 Flüssige biogene Energieträger 23
2.3.2.1 Energiepflanzen 23
2.3.2.2 Altspeiseöle und -fette 24
2.3.3 Gasförmige biogene Energieträger 25
2.3.3.1 Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflegeholz 27
2.3.3.2 Bioabfälle 27
2.3.3.3 Schlachtabfälle 28
2.3.3.4 Gülle 31
2.3.3.5 Klär- und Deponiegas 33
3 Kurze Analyse der Potenziale für die sonstigen erneuerbaren Energien 34
3.1 Solarthermie 34
3.2 "Tiefe" Geothermie 38
3.3 Wärmepumpen 38
3.4 "Kleine" Wasserkraft 40
4 Zusammenfassung 41
5 Literatur 44

1 Aufgabenstellung und Definition von Potenzialen

1.1 Aufgabenstellung

Das Programm der Regierung Luxemburgs sieht vor, dass "die Regierung eine Aktualisierung der Potenzialstudie über die Erneuerbaren Energien durchführen wird, mit dem Ziel, den Rahmen für die Förderung der Erneuerbaren Energien zu verbessern."

Ziel des Gesamtprojekts des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) und des Instituts für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) ist in diesem Sinne die Aktualisierung der Potenzialstudie über die Erneuerbaren Energien in Luxemburg aus dem Jahr 2007 (ISI/EEG/BSR) - im Folgenden wird meist die in Fachkreisen gebräuchliche Bezeichnung "LuxRes-Studie" gewählt - sowie die Überarbeitung der aktuellen Förderinstrumente für Erneuerbare Energien im Stromsektor und die Beratung zu Fragen der Entwicklung und Umsetzung einer Energiestrategie für Luxemburg.

Der vorliegende Teilbericht beschreibt die Aktualisierung der Potenzialanalyse. Es sollte geprüft werden, in welchen Bereichen sich eine Aktualisierung als notwendig und sinnvoll erweist. Dazu sollten die Daten zu Kosten und Potenzialen der EE-Technologien aus der LuxRes-Studie von 2007 kritisch hinterfragt werden. Hierzu waren besonders dynamisch veränderte Annahmen und Rahmenbedingungen zu identifizieren, welche eine signifikante Veränderung der realisierbaren Potenziale zur Folge haben.

Nach Identifizierung des wesentlichen Aktualisierungsbedarfs erfolgte eine partiell quantitative Betrachtung der Auswirkungen für die relevanten Technologien und für die substanziellen Veränderungen der Rahmenbedingungen.

1.2 Potenzialdefinition

Um die Verständlichkeit und Bewertung dieser Analyse zu erleichtern, werden an dieser Stelle die Definition der verschiedenen Potenziale aus der LuxRes-Studie (ISI/EEG/BSR 2007) wiederholt:

- **Theoretisches Potenzial:** Das theoretische Potenzial beschreibt das in einer Region innerhalb eines bestimmten Zeitraumes theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot unter der Berücksichtigung einzelner wesentlicher struktureller Restriktionen wie der geografischen Flächenstrukturen. Das theoretische Potenzial ist damit weitestgehend physikalisch bestimmt, wobei Landesstrukturen (Waldflächen, urbane Flächen,…) berücksichtigt und die strukturelle Mehrfachnutzung von Ressourcen vermieden wird. In diesem Sinne wird die nutzbare Landesfläche von Luxemburg bezüglich jener Technologien zur Nutzung Erneuerbarer Energieträger, welche auf Flächennutzung angewiesen sind, aufgeteilt. Das theoretische Potenzial kann in der Regel wegen technischer, ökologischer, struktureller und administrativer Randbedingungen auch langfristig nur zu sehr geringen Teilen erschlossen werden.
- **Technisches Potenzial:** Das technische Potenzial beschreibt jenen Anteil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung gegebener technischer (konkrete Technologien) und ökologischer Randbedingungen nutzbar ist. Zusätzlich werden hier detaillierte strukturelle Restriktionen berücksichtigt. Einige der genannten Einflussfaktoren auf die Höhe des technischen Potenzials können sich mit der Zeit ändern, wie dies beispielsweise bei technischen Wirkungsgraden der Fall ist. Diese allfälligen Änderungen werden in entsprechenden Modellen berücksichtigt.
- **Realisierbares Potenzial:** Unter dem realisierbaren Potenzial erneuerbarer Energie wird der Anteil des technischen Potenzials verstanden, der unter Berücksichtigung von weiteren Hemmnissen und fördernden Faktoren genutzt werden kann. Diese Faktoren sind struktureller (tatsächliche Eignung von Flächen), legaler (Gesetze, Verordnungen), ökonomischer (Entwicklung der Kosten), soziologischer (Technologiediffusion) und psychologischer (wahrgenommene Vorteile bzw. Nachteile) Natur. Das realisierbare Potenzial wird ferner stark von konventionellen Vergleichssystemen beeinflusst, mit welchen erneuerbare Energie im Wettbewerb steht. Das realisierbare Potenzial ist in der Regel deutlich geringer als das theoretische und das technische Potenzial.

In der LuxRes-Studie werden die realisierbaren Potenziale für die Jahre 2010 und 2020 berechnet und dargestellt. Die vorliegende Aktualisierung bezieht sich auf die Ergebnisse für das Jahr 2020 und berücksichtigt den mittlerweile erreichten Status-quo; in der Regel ist dies der Stand des Jahres 2013, für den gesicherte Statistiken vorliegen.

2 Detaillierte Potenzial-Analysen für ausgewählte Bereiche der Erneuerbaren Energien

Einer detaillierten Überprüfung wurden die in der LuxRes-Studie von 2007 ermittelten Potenziale der Windenergienutzung, der Photovoltaik sowie der Biomasse Potenziale unterzogen.

2.1 Windenergie

Die grundlegenden Annahmen zur Abschätzung des theoretischen und des technischen Potenzials der Stromerzeugung aus Windenergie der vorliegenden Potenzialschätzungen aus dem Jahr 2007 (ISI/EEG/BSR 2007) sind auch aus heutiger Sicht noch zutreffend und plausibel. Sie können somit weitgehend unverändert übernommen werden. Lediglich bezüglich der mit großen Neuanlagen erzielbaren Auslastung an guten Windstandorten (Vollaststundenzahlen) wurden für die Abschätzung des technischen Potenzials Anpassungen nach oben als sinnvoll erachtet.

Für die Abschätzung des **theoretischen Potenzials** gilt:

- Wie in 2007 wurde davon ausgegangen, dass die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche Luxemburgs von 1.266 km^2 zur Windstromerzeugung geeignet ist.
- Als Berechnungsgrundlage wird von einer mittleren Windgeschwindigkeit von 5 m/s und einer Vollaststundenzahl der Windkraftanlagen von 1.800 h/a ausgegangen.
- Für die Rechenvariante ("Szenario-5 MW-Anlagentyp") mit Anlagen der im Betrachtungszeitraum als verfügbar erachteten 5 MW-Klasse ergibt sich auch unter Berücksichtigung der aus den angenommenen Rotordurchmessern von 124 m abgeleiteten Mindestabstände und damit einer geringeren Gesamtzahl der Anlagen gegenüber der Rechnung für 2 MW-Anlagen ein geringfügig höherer Wert, der als theoretisches Potenzial betrachtet wird.

  Das theoretische Potenzial der Stromerzeugung aus Windenergie in Luxemburg beträgt somit 20.584 GWh/a (siehe Abbildung 1). Dieser Wert wird unverändert aus der Studie von 2007 übernommen.

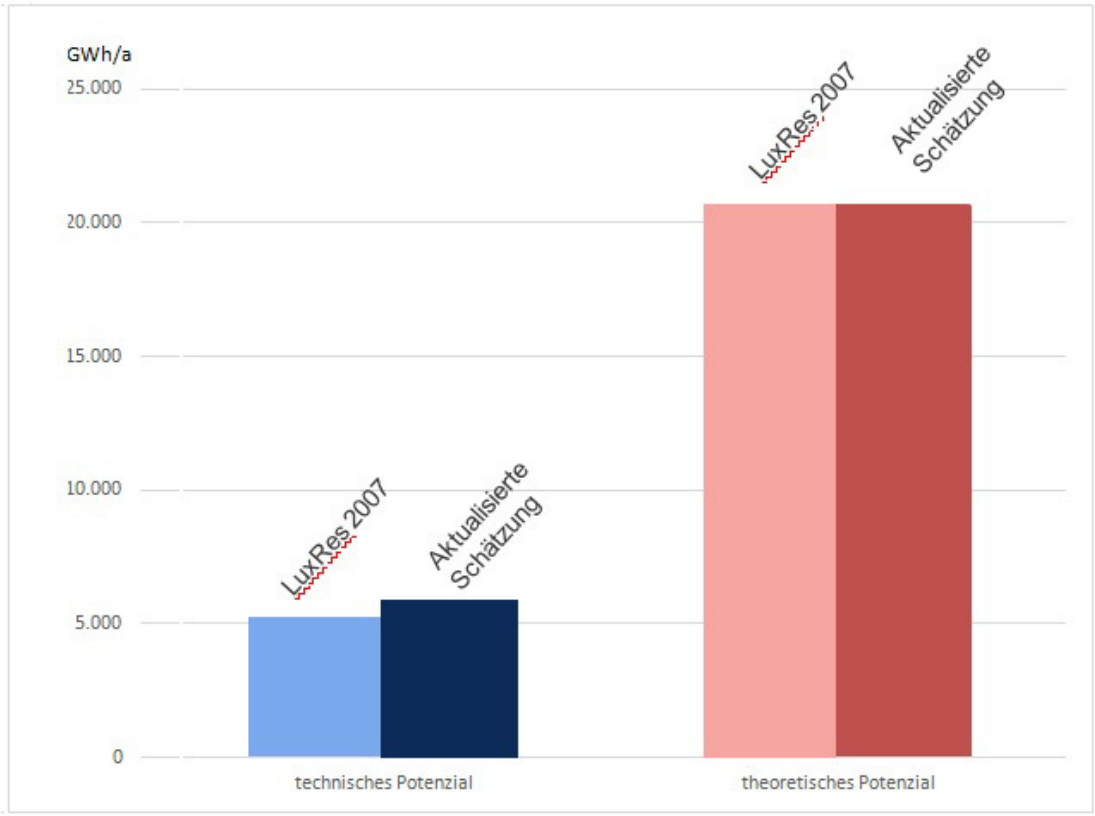
Für die Abschätzung des **technischen Potenzials** gilt:

- Es werden nur diejenigen Standorte in Betracht gezogen, an denen mittlere Windgeschwindigkeiten oberhalb des landesweiten Durchschnittswertes von 5 m/s vorliegen. Es wird angenommen, dass dies für 50 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche zutrifft.
- Ferner wird angenommen, dass 50 % der verbleibenden Fläche aufgrund topografischer Restriktionen nicht nutzbar sind.

  Gegenüber der Potenzialstudie 2007 werden folgende veränderte Annahmen getroffen:

- Als Konsequenz der rechnerischen Beschränkung auf "gute" Windlagen erscheint es naheliegend, höhere Vollastundenzahlen als für den theoretischen Durchschnitt der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche zu Grunde zu legen. Insbesondere zeigte sich in den letzten Jahren ein starker Trend zu höheren Türmen von über 100m, was zu einer substanziellen Erhöhung der jährlichen Auslastung führt. Eine Vollaststundenzahl von 2.000 h/a für diese Anlagenklasse stellt nach Ansicht der Autoren eine plausible Mindestgröße dar.

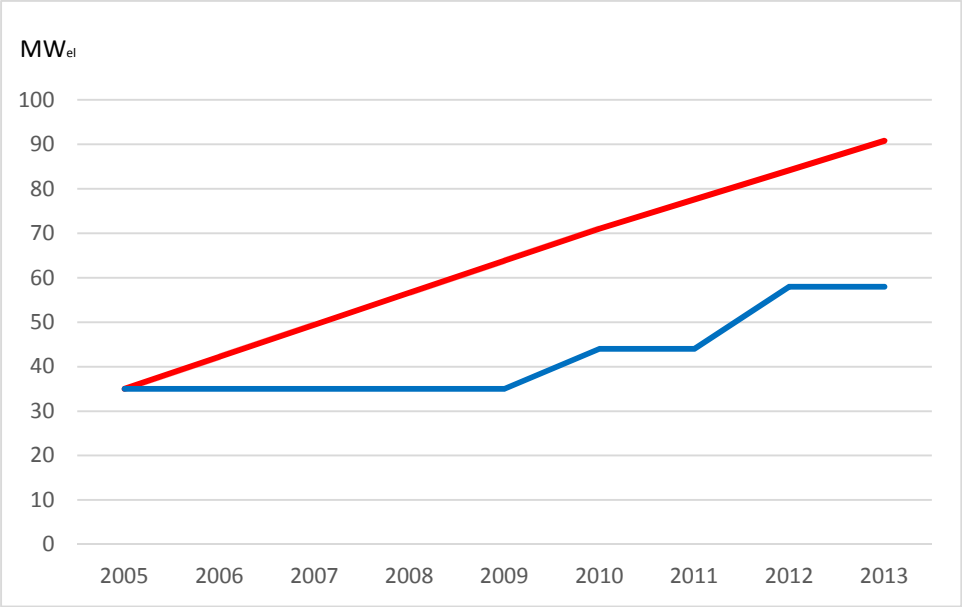
Mit diesen Annahmen erhöht sich der errechnete Wert für das technische Potenzial der Windstromerzeugung in Luxemburg um gut 11 % von 5.146 GWh/a auf 5.718 GWh/a (siehe Abbildung 1).



Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

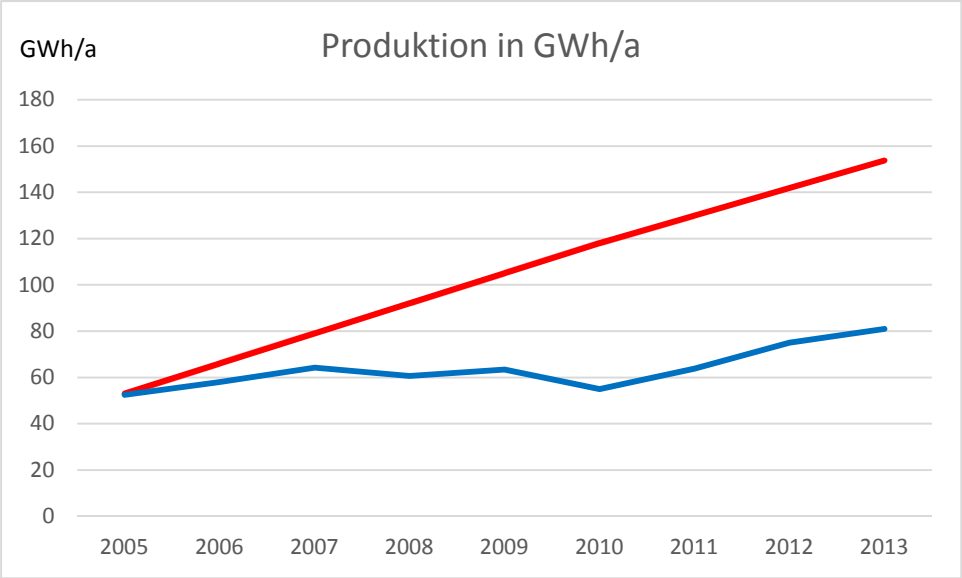
Abbildung 1: Vergleich der alten (ISI/EEG/BSR 2007) und neuen Annahmen über technisches (links) und theoretisches (rechts) Potenzial

Nach Angaben des luxemburgischen Ministeriums für Wirtschaft (Quelle: Institut Luxembourgeois de Régulation) waren Ende 2013 in Luxemburg Windenergieanlagen mit einer Leistung von insgesamt 58,3 MW installiert (vgl. Abbildung 2). Diese Anlagen können bei unterstellten 1.800 h/a rund 105 GWh/a erzeugen (die tatsächliche Erzeugung lag niedriger; vgl. Abbildung 3). Damit wurde nur rund 2/3 des in 2007 für das Jahr 2013 als realisierbar angesehenen Potenzials ausgeschöpft. Gemäß den damaligen Schätzungen war nämlich bis 2013 ein Zuwachs der installierten Leistung auf rund 90 MW, entsprechend einer Erzeugung von gut 150 GWh/a als realisierbar erachtet worden. Das bereits für 2010 anvisierte energiepolitische Ziel lag mit gut 65 MW, entsprechend einer Erzeugung von knapp 120 GWh/a, immer noch deutlich über dem erst drei Jahre später erreichten Ist-Wert (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3).



Quelle: EWEA 2010-2015,

Abbildung 2: Entwicklung der installierten Wind-Stromerzeugungskapazität in Luxemburg in MW (blaue Kurve), Vergleich mit der Schätzung LuxRes 2007 (rote Kurve)



Quelle: IEA 2013, Institut Luxembourgeois de Régulation 2014

Abbildung 3: Entwicklung der Wind-Stromerzeugung in Luxemburg in GWh/a (blaue Kurve), Vergleich mit der Schätzung LuxRes 2007 (rote Kurve)

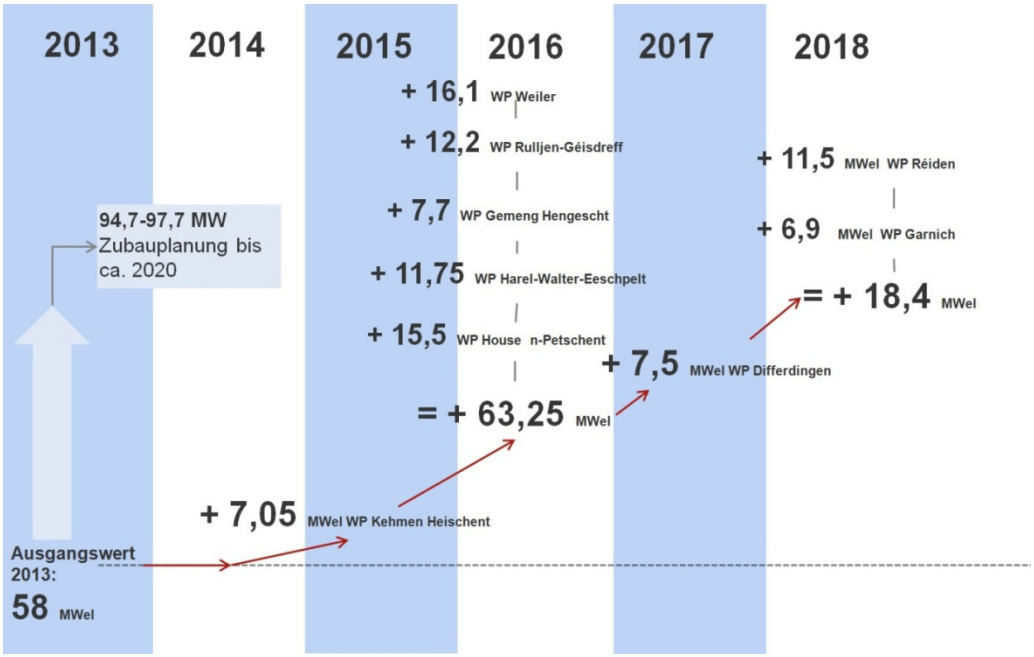
Die Abschätzung des **realisierbaren Potenzials** bis 2020 setzt auf dem heutigen Stand (Ende 2013) auf. Die aktualisierte Schätzung basiert auf folgenden Daten und Annahmen:

- Derzeit liegen konkrete Ausbauplanungen von unterschiedlichen Investoren vor. Gemäß Stand vom Februar 2015 ist bis 2020 ein Zubau um insgesamt rund 96 MW im Rahmen folgender Projekte in konkreter Planung):

Installierte Leistung	Ort	Jahr der Inbetriebnahme
7,05 MW	Kehmen-Heischent	2014
12,2 MW	WP Rulljen-Géisdreff	2016
7,7 MW	WP Gemeng Hengescht	2016
11,75 MW	WP Harel-Walter-Eeschpelt	2016
15,5 MW	WP Housen-Petschent	2016
16,1 MW	WP Weiler	2016
3 x 2 bis 3 MW	WP Differdingen	2017
11,5 MW	WP Réiden	2018
6,9 MW	WP Garnich	2018

Quelle: Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie, persönliche Mitteilung Februar 2015

- Zusätzlich zu diesen bereits in Planung befindlichen Projekten wurde bis zum Jahr 2020 ein weiterer Zubau um 10 MW sowie ein Repowering bestehender Anlagen, welches bis dahin zu einem Plus von 35 MW führt, als maximal realisierbares Potenzial unterstellt.
- Als erreichbare Vollaststundenzahl wurde - analog zu den Überlegungen zum technischen Potenzial - ein Wert von 2.000 h/a angenommen. Durch die Repoweringmaßnahmen ist eine Erhöhung der Vollaststundenzahl des betroffenen bisherigen Bestandes zu erwarten. Vereinfachend wurde dieser Rechenwert auch für den verbleibenden Rest des heutigen Bestandes angenommen.
- Da die Potenzialschätzung von konkreten Ausbauplanungen dominiert wird, kann auf eine Unterscheidung zwischen einem oberen und einem unteren Diffusionspfad ("konservative" und "ambitionierte" Schätzung) verzichtet werden.



Quelle: Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie, persönliche Mitteilung Februar 2015

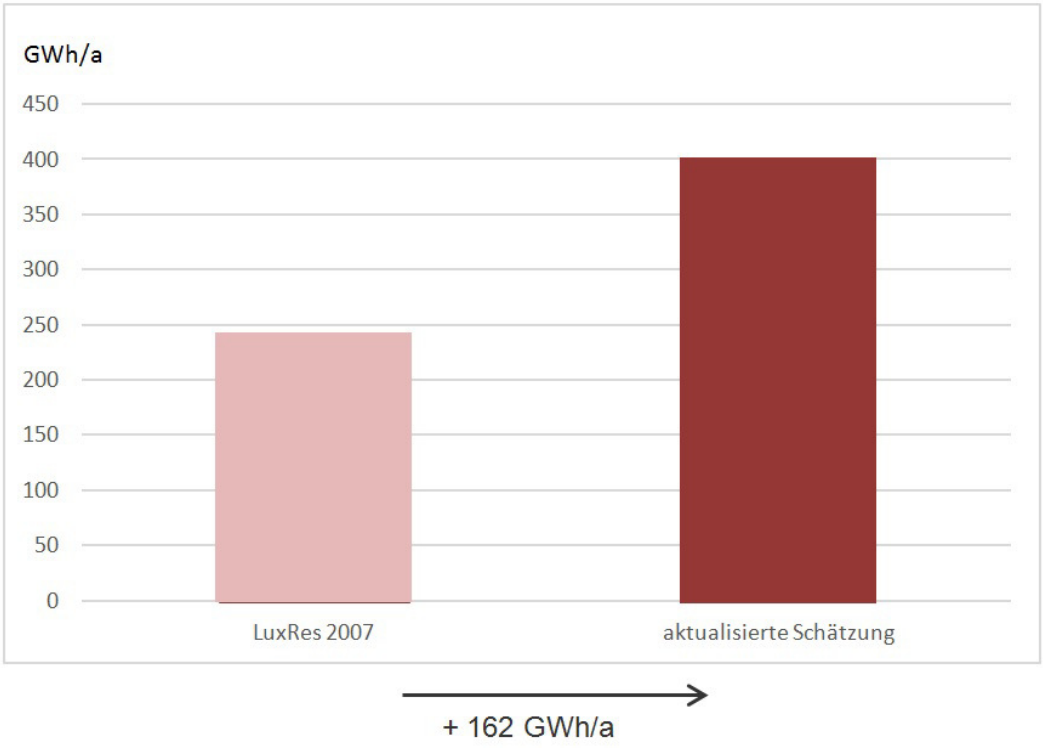
Abbildung 4: Anfang 2015 geplanter Zubau an Windparks in Luxemburg

Damit ergibt sich für das Jahr 2020 eine als realisierbar erachtete installierte Leistung von knapp 200 MW (vgl. Tabelle 1), die zu einer Stromerzeugung in Luxemburg von knapp 400 GWh/a führt (siehe Abbildung 5. Dieses auf Basis der aktuellen konkreten Planungen ermittelte Potenzial entspricht fast dem Fünffachen der Erzeugung im Jahr 2013 (81 GWh; Institut Luxembourgeois de Régulation 2014) und ist fast 70% höher als im Jahr 2007 mit 237 GWh/a angenommen.

Tabelle 1: Realisierbares Potenzial der Windenergie in Luxemburg für 2020

	Inst. Kapazität [MW]	**Erzeugung [GWh/a]**
Bestandsanlagen, zum Teil betroffen von Repowering	58,3	116,6*
Geplante Projekte 2014-2020	96,2	192,4
Abschätzung für weiteren Zubau ohne konkrete Planung	10,0	20,0
Abschätzung Zuwachs durch Repowering	35,0	70,0
Summe des realisierbaren Potenzials in 2020	**199,5**	**399,0**

Quelle: IREES/ISI 2015; * vereinfachende Annahme 2.000 h/a

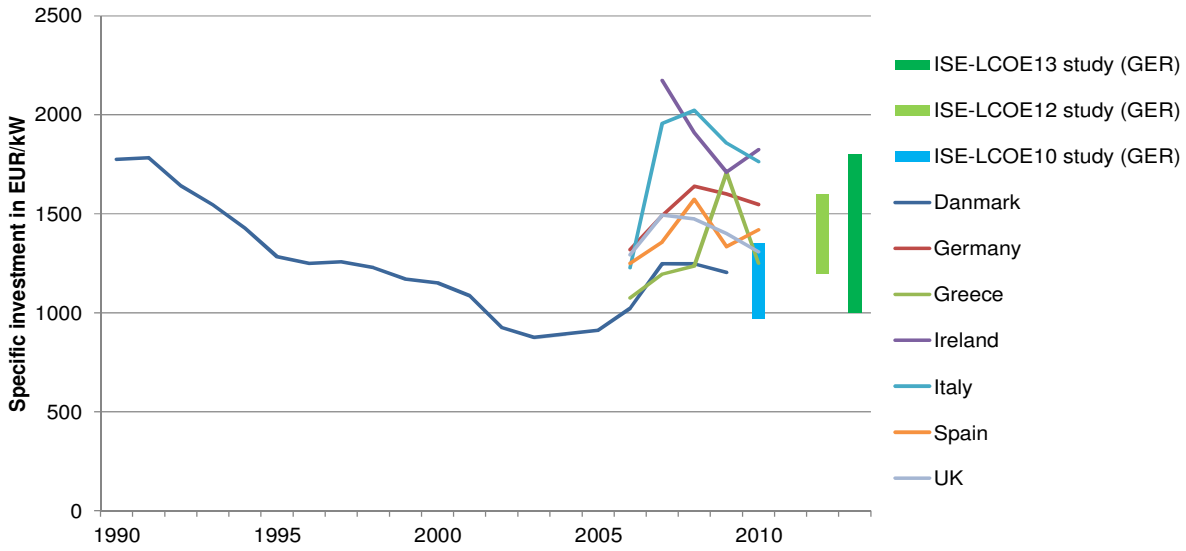


Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

Abbildung 5: Vergleich der alten (ISI/EEG/BSR 2007) und aktualisierten Schätzung über das realisierbare Potenzial der Windkraft in Luxemburg

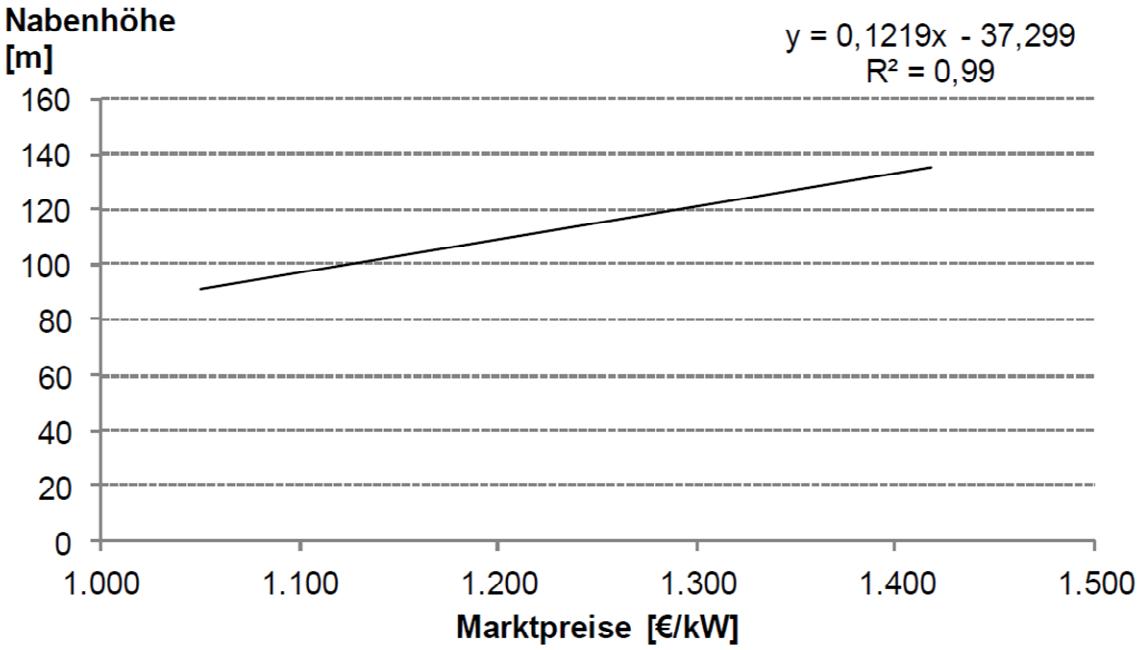
Das energiepolitische Ziel einer Steigerung der Windenergieproduktion auf 237 GWh im Jahr 2020 erscheint damit sehr gut erreichbar (vgl. Abbildung 5). Gleichwohl bleibt die tatsächliche Realisierung der aus heutiger Sicht geplanten Anlagen abzuwarten, nicht zuletzt auch unter dem Einfluss der öffentlichen Akzeptanz von Windenergieanlagen. Die Entwicklung der Kosten der Windenergie innerhalb der vergangenen Jahre entspricht grundsätzlich den Erwartungen aus dem Jahr 2007. Damals wurde von einer moderaten Reduktion der Erzeugungskosten um etwa 10 % im Zeitraum von 2007 bis 2015 ausgegangen. Auf Basis aktueller Studien wurde diese Kostenreduktion in etwa erreicht.

Die Entwicklung der spezifischen Investitionen für Windenergieprojekte in verschiedenen EU-Ländern ist in Abbildung 6 dargestellt. Dabei zeigt sich im Mittel eine konstante Entwicklung zwischen 2007 und 2013. Gleichzeitig sind allerdings die energetischen Erträge pro installierte Leistung substanziell angestiegen, was insbesondere auf größere Nabenhöhen und ein Anwachsen des Verhältnisses aus Rotorfläche und Generatorleistung der Anlagen zurückzuführen ist. Der Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Nabenhöhe und spezifischen Investitionen der Anlagen ist in Abbildung 7 dargestellt. Für die Analyse des realisierbaren Potenzials für das Jahr 2020 sind die höheren Erträge pro installierte Leistung durch die Erhöhung der angenommenen Vollaststunden von ursprünglich 1.800 auf 2.000 berücksichtigt (s. o.). Die hieraus resultierende Kostenreduktion um etwa 11% entspricht auch in etwa der im Jahr 2007 angenommenen Senkung der spezifischen Erzeugungskosten innerhalb einer Dekade.



Quelle: Fraunhofer ISI, 2013

Abbildung 6: Entwicklung der spezifischen Investitionen der Windenergie in verschiedenen EU Ländern



Quelle: IE Leipzig 2013

Abbildung 7: Zusammenhang zwischen den Marktpreisen für Windturbinen in Deutschland und der durchschnittlichen Nabenhöhe

2.2 Photovoltaik

Die grundlegenden Annahmen zur Abschätzung des theoretischen und des technischen Potenzials der Stromerzeugung aus Photovoltaik der vorliegenden Potenzialschätzungen aus dem Jahr 2007 (ISI/EEG/BSR 2007) sind auch aus heutiger Sicht noch zutreffend und plausibel. Sie können somit weitgehend unverändert übernommen werden, lediglich in einzelnen Fällen sind geringfügige Anpassungen erforderlich.

Für die Abschätzung des **theoretischen Potenzials** gilt (siehe Abbildung 8):

- Es wurde von einer durchschnittlichen Globalstrahlungssumme von 1.043 kWh/m^2*a ausgegangen. Marginale Veränderungen dieses Werts infolge vorliegender verlängerter Zeitreihen wären in Anbetracht der zu fordernden Rechengenauigkeit völlig ohne Belang.
- Gleiches gilt für die angesetzte nutzbare Landesfläche von 212 km^2, die die Flächenkonkurrenz zur solarthermischen Nutzung mit einer hälftigen Aufteilung auf die beiden Nutzungsformen Photovoltaik und Solarthermie berücksichtigt.
- Der angenommene mittlere Verstromungswirkungsgrad von 15 % von Photovoltaikanlagen wurde ebenso beibehalten.

Das theoretische Potenzial der photovoltaischen Stromerzeugung in Luxemburg kann somit - wie schon im Jahr 2007 - mit rund 33.000 GWh/a beziffert werden.

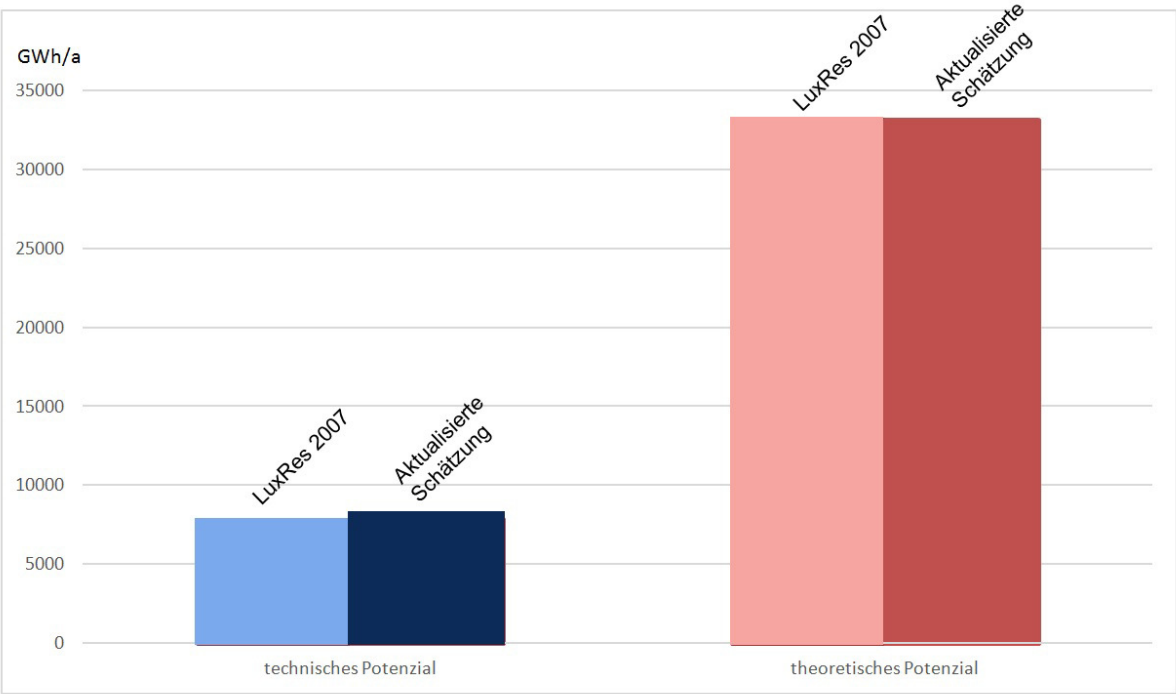
Für die Abschätzung des **technischen Potenzials** gilt (siehe Abbildung 8):

- Für das Jahr 2005 war von einem Gesamtbestand in Luxemburg von ca. 127.000 Gebäuden ausgegangen worden. Gemäß Angaben des Institut National de la Statistique et des Études Économiques betrug von 2005 bis 2013 die Zunahme des Wohnungsbestandes 18 %; dies spiegelt insbesondere das hohe Bevölkerungswachstum in Luxemburg wider. Bis 2020 wird eine Zunahme um 39 % gegenüber 2005 erwartet. Aus der Statistik der Baugenehmigungen lässt sich ein Zubau von rund 2 Wohnungen pro Gebäude ableiten, womit die Anzahl der Gebäude für 2013 bereits auf etwa 140.000 und für das Jahr 2020 auf gut 160.000 geschätzt werden kann. Zur Abschätzung des technischen Potenzials wurde somit von 160.000 Gebäuden ausgegangen.
- Die Annahmen zu Dach- und Wandflächen blieben unverändert.
- Die Annahmen zur Abschätzung des Potenzials auf Freiflächen blieben ebenfalls unverändert, insbesondere die Annahme, dass 42 km^2, also 10 % der nach Abzug von Konkurrenznutzungen verfügbaren Landesfläche für Freiflächen-Photovoltaik nutzbar sind.

Mit diesen Annahmen erhöht sich der errechnete Wert für das technische Potenzial auf Dachflächen von 1.002 GWh/a auf 1.262 GWh/a und für Fassaden von 34 GWh/a[1] auf 43 GWh/a. Der mit Abstand größte Anteil entfällt nach wie vor auf das Freiflächen-Potenzial mit rechnerisch 6.571 GWh/a. In der Summe ergibt sich ein technisches PV-

[1] Von ISI/EEG/BSR (2007) wurden in der Berichtsfassung 60 GWh/a genannt; hierbei handelt es sich offensichtlich um einen Schreibfehler.

Potenzial für Luxemburg in Höhe von 7.876 GWh/a.[2] Dies entspricht knapp einem Viertel des theoretischen Potenzials.



Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

Abbildung 8: Vergleich der alten (ISI/EEG/BSR 2007) und neuen Annahmen über technisches (links) und theoretisches (rechts) Potenzial

Bei der Abschätzung des **realisierbaren Potenzials** wurden zum einen die seit 2007 tatsächlich eingetretene Entwicklung berücksichtigt und zum anderen die maßgeblichen Determinanten einer möglichen künftigen Entwicklung kritisch analysiert.

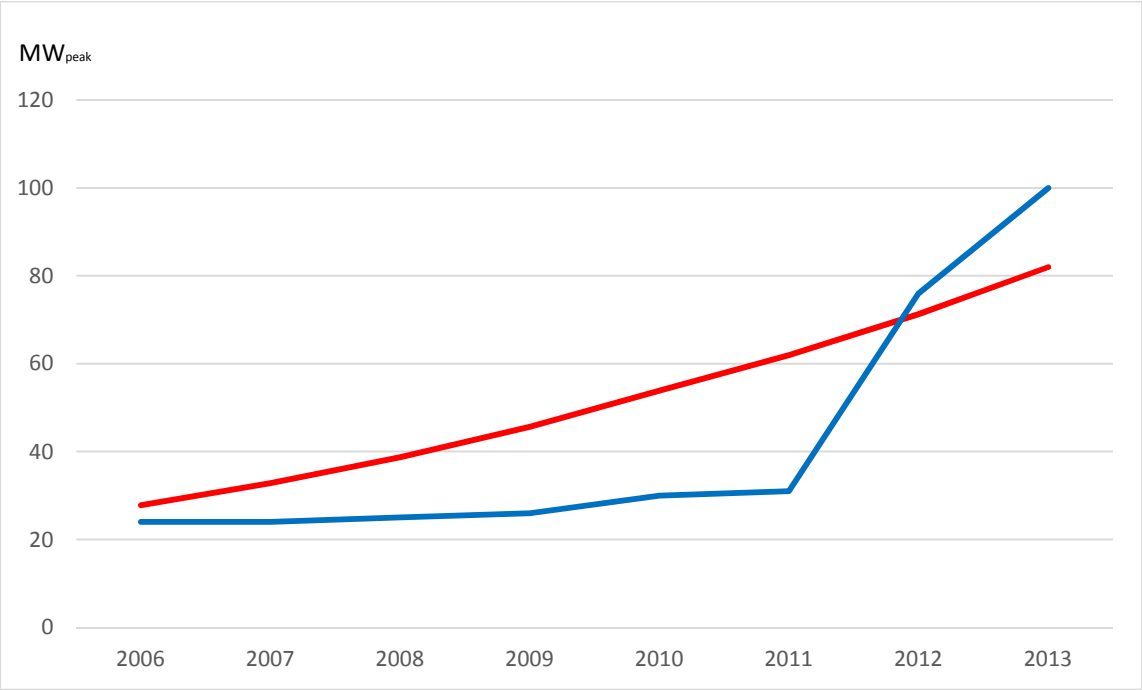
Dies sind insbesondere

- die Preisentwicklung auf dem PV-Markt sowie
- die hohe gesellschaftliche Akzeptanz und Relevanz, die diese Technologie in Luxemburg genießt.

Nach Angaben des luxemburgischen Ministeriums für Wirtschaft (Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie) war im Jahr 2013 in Luxemburg eine Photovoltaikleistung von rund 95 MW_{peak} installiert (vgl. Abbildung 9), welche zu einer Stromproduktion von 73 GWh führte (Institut Luxembourgeois de Régulation 2014; bei Rechnung mit dem spezifischen Ertragswert von 806 kWh/kW_{peak}*a, der 2007 zu Grunde gelegt wurde, ergibt sich eine Produktion von 77 GWh). Das sind etwa 13 MW_{peak} mehr, als in der Studie von 2007 für den oberen Diffusionspfad zur Bestimmung des

[2] Um die Auswirkung der modifizierten Annahmen auf das Gesamtergebnis darzustellen, sind ungerundete Zahlenangaben erforderlich; dies soll keineswegs Präzision der Potenzialschätzungen implizieren.

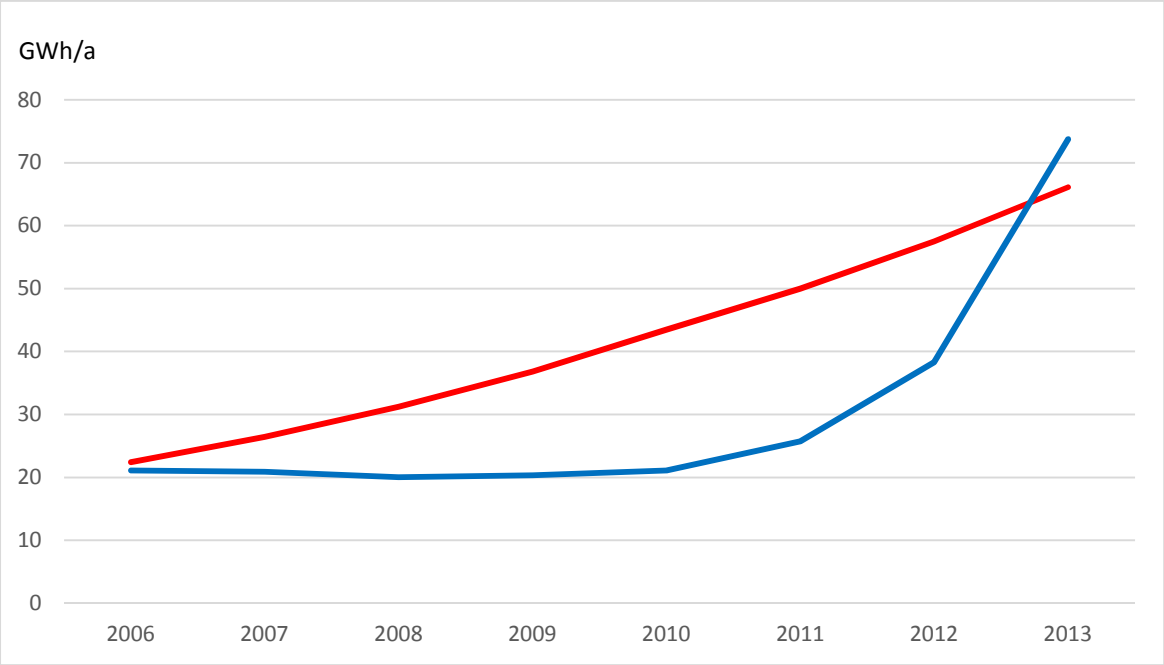
realisierbaren Potenzials angenommen[3]. Gegenüber dem unteren Diffusionspfad von 2007 sind die tatsächlich installierten Leistungen wesentlich stärker angestiegen, wobei der wesentliche Zuwachs erst ab dem Jahr 2011 erfolgte (vgl. Abbildung 10).



Quelle: Photovoltaic energy barometer 2007 - 2014 – EurObserv'ER

Abbildung 9: Entwicklung der installierten PV-Stromerzeugungskapazität in Luxemburg in MW_{peak} (blaue Kurve); Vergleich mit realisierbarem Potenzial gemäß dem oberen Diffusionspfad von 2007 (rote Kurve)

[3] Im Rahmen der Potenzialstudie 2007 wurde für die Photovoltaik ein oberer und ein unterer Diffusionspfad angenommen, wobei für die Aufstellung der Bandbreite insbesondere Varianten in der globalen Kostenentwicklung der Technologie und der Akzeptanz von zusätzlichen Differenzkosten in Luxemburg berücksichtigt wurden.

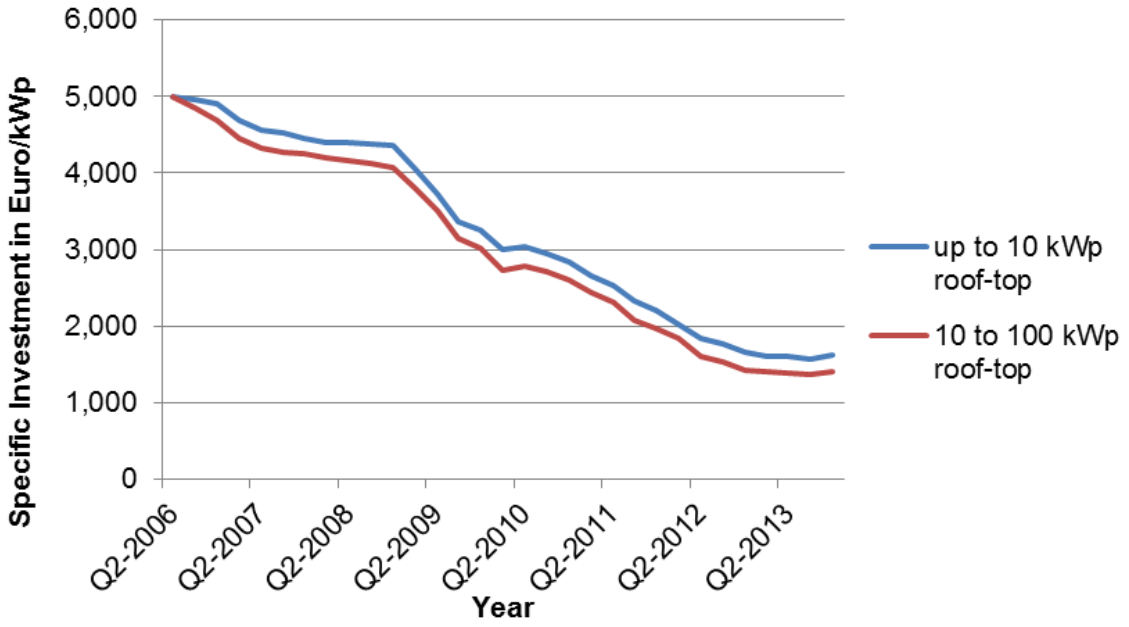


Quelle: IEA 2013

Abbildung 10: Entwicklung der PV-Stromerzeugung in Luxemburg in GWh/a (blaue Kurve); Vergleich mit realisierbarem Potenzial gemäß dem oberen Diffusionspfad von 2007 (rote Kurve)

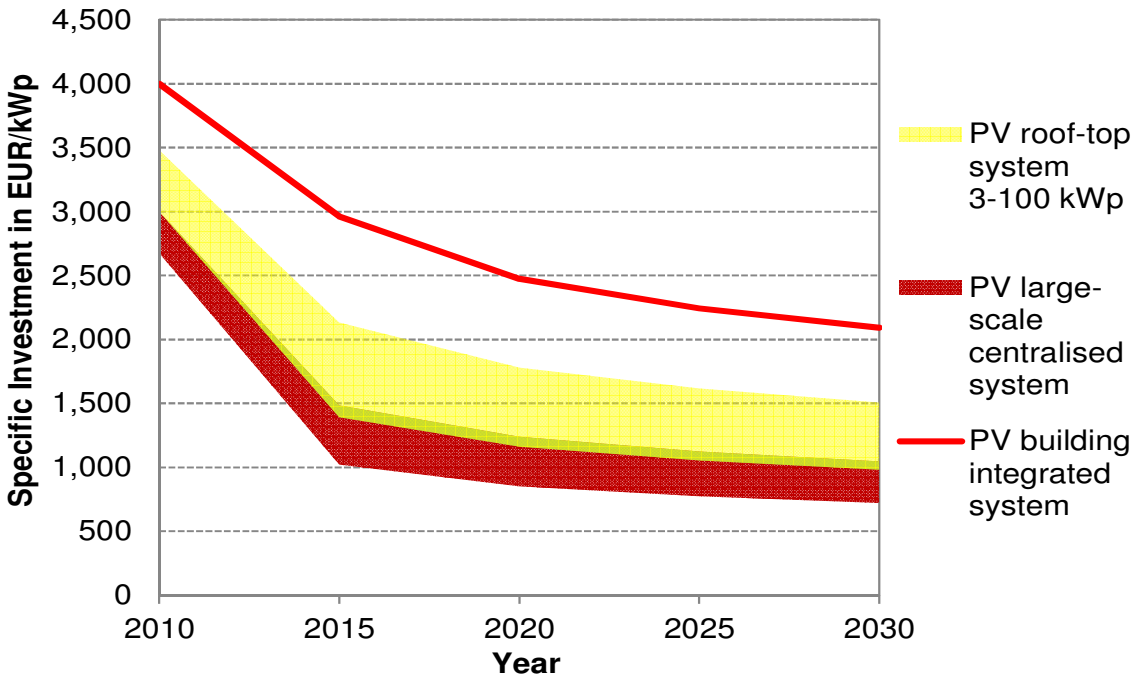
Maßgeblichen Einfluss auf diese Entwicklung hatte sicherlich die Preisentwicklung auf dem PV-Markt. In Deutschland wurden in den Jahren 2013/2014 Gesamt-Systempreise von 1.500 €/kW_{peak} und, insbesondere bei Großanlagen, deutlich weniger erreicht. Wenn auch in Luxemburg der Preis etwas höher liegen dürfte, da die Handwerksbetriebe höhere Kostensätze haben, war auch hier ein "Preisverfall" etwa um den Faktor vier seit dem Jahr 2006 zu beobachten. Künftig wären Preissenkungen um weitere 20 bis 30 % denkbar, womit für Großanlagen ein Preis von etwa 1.000 €/kW_{peak} denkbar erscheint.

In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die spezifischen Investitionen für Photovoltaik in der Vergangenheit und für die Zukunft gezeigt. Dabei konzentriert sich die Darstellung der vergangenen Entwicklung auf PV-Aufdach-Anlagen in Deutschland. Es zeigt sich die substanzielle Reduktion der spezifischen Investitionen seit der Erstellung der ursprünglichen Potenzialstudie im Jahr 2007. Diese Kostenreduktion beruhte vor allem auf einem außerordentlich starken Wachstum der Märkte in Deutschland und später in Asien, welches zu diesem Zeitpunkt nur von wenigen Experten vorhergesehen wurde. Somit fand innerhalb der vergangenen Dekade eine Art Regime-Wechsel statt, indem sich die Photovoltaik von einer der teuersten Technologien im Portfolio der erneuerbaren Energien im Strombereich zu einer der günstigsten Technologien wandelte. Dies erfordert eine Anpassung der realisierbaren Potenziale, worauf im Folgenden eingegangen wird.



Quelle: EuPD 2014

Abbildung 11: Entwicklung der spezifischen Investitionen für PV-Aufdach-Anlagen in Deutschland von 2006 bis 2013



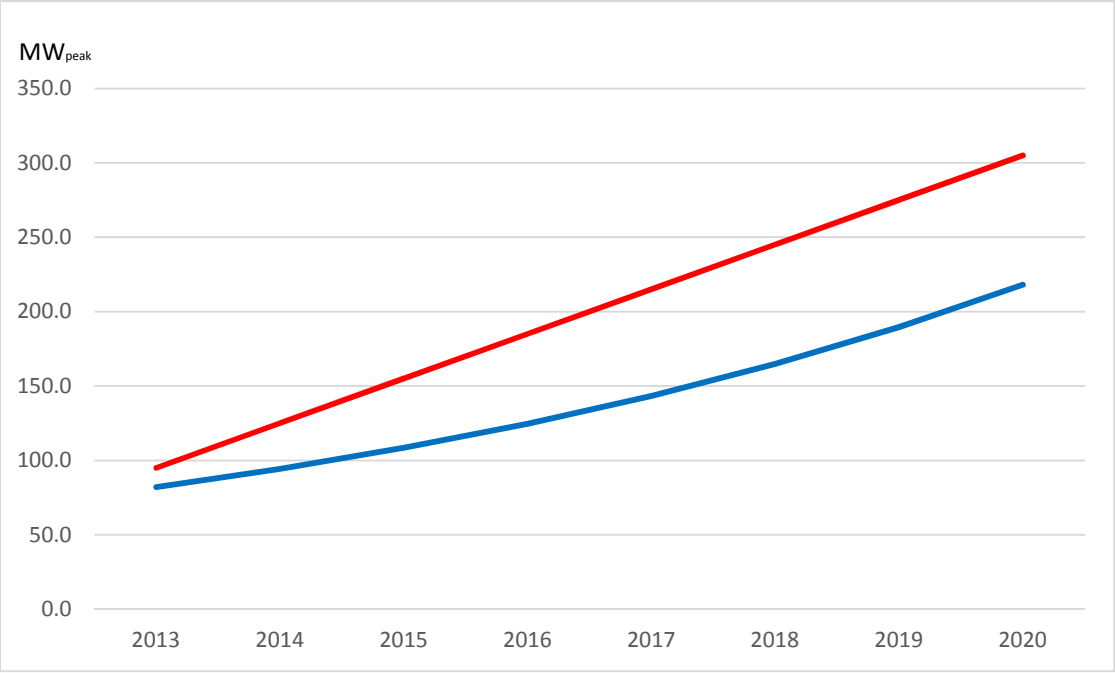
Quelle: Source: TU Wien, Green-X model (http://www.green-x.at/)

Abbildung 12: Entwicklung der spezifischen Investitionen für PV-Anlagen von 2010 bis 2030

Da selbst die Schätzungen für den oberen Diffusionspfad aus dem Jahr 2007 von der "Realität überholt" wurden, geht die vorliegende Studie nur von einer Fortschreibung dieses ambitionierten Pfades zur Ermittlung des bis 2020 realisierbaren Potenzials aus und trifft weiterhin die folgenden Annahmen:

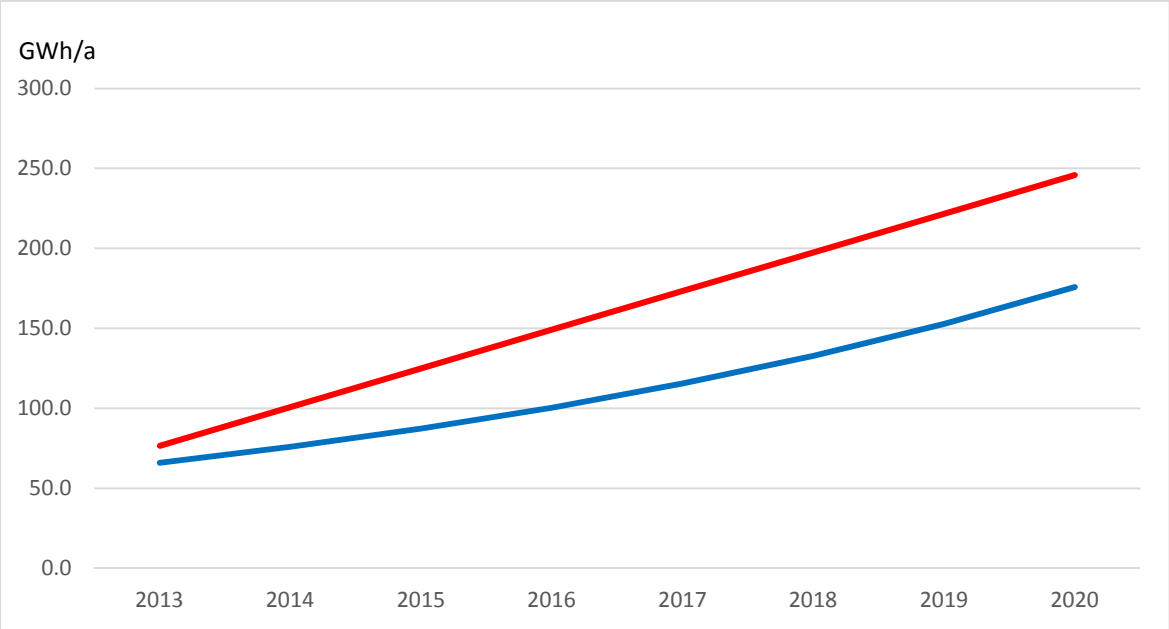
- Ausgehend vom dem höher als damals erwartet liegenden Ist-Wert 2013 wird ein jährlicher Zubau von Anlagen mit insgesamt + 30 MW_{peak} pro Jahr bis zum Jahr 2020 unterstellt (ursprüngliche Annahme für den oberen Diffusionspfad zum Vergleich: prozentuales Wachstum um 15 %/a entsprechend + 12 bis + 28 MW_{peak} pro Jahr).
- Beibehaltung des spezifischen Ertrags (806 kWh/kW_{peak} pro Jahr) aus dem Jahr 2007, da bei diesen Zubauraten die Nutzung auch weniger günstiger Dachflächen wahrscheinlich wird. Gleichwohl darf diese Annahme als eher "vorsichtig" betrachtet werden.

Damit ergibt sich als realisierbares Potenzial für das Jahr 2020 eine installierte Leistung von rund 305 MW_{peak} und eine Stromerzeugung von rund 246 GWh/a. Das sind stark 3 % des technischen Potenzials. (oberer Schätzwert aus dem Jahr 2007 zum Vergleich: rund 218 MW_{peak} installierter Leistung und rund 176 GWh/a Stromertrag; vgl. Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15).



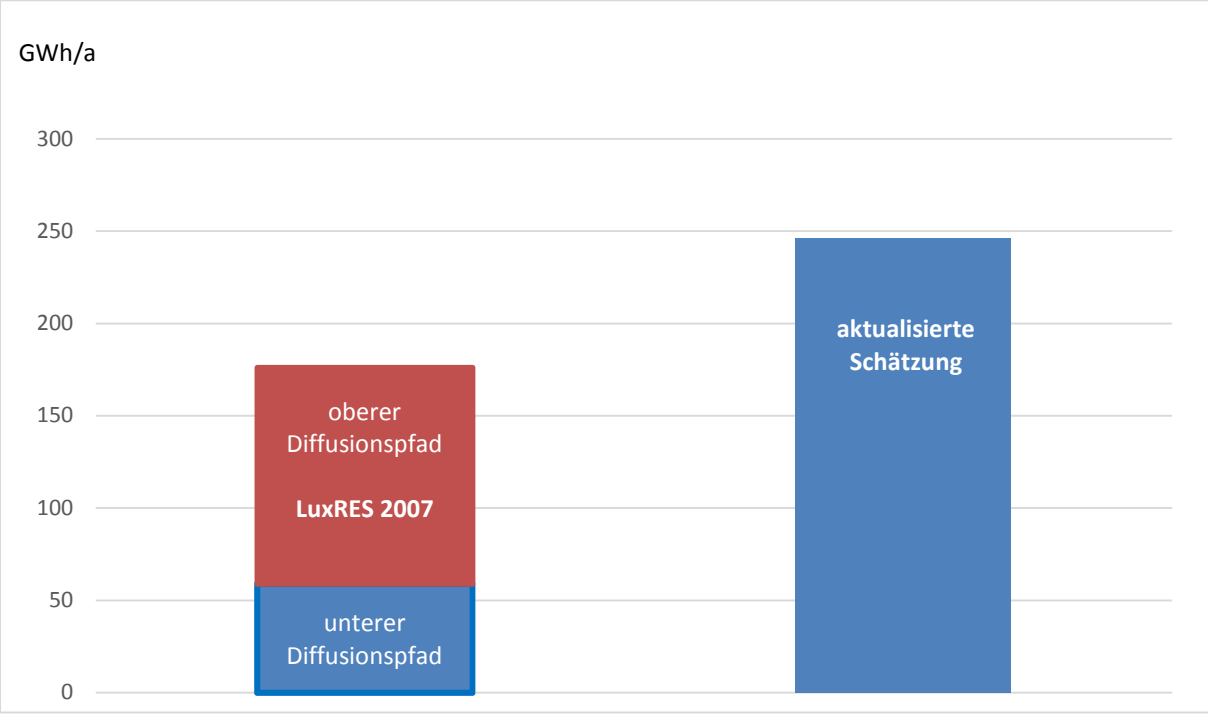
Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

Abbildung 13: PV-Stromerzeugungskapazität in MW_{peak}. Aktualisierte Schätzung des realisierbaren Potenzials (rote Kurve ausgehend vom Ist-Wert 2013) im Vergleich zur ursprünglichen Schätzung (blaue Kurve)



Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

Abbildung 14: PV-Stromerzeugung in GWh/a. Aktualisierte Schätzung des realisierbaren Potenzials (rote Kurve ausgehend vom Ist-Wert 2013) im Vergleich zur ursprünglichen Schätzung (blaue Kurve)



Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

Abbildung 15: Vergleich der alten (ISI/EEG/BSR 2007) und aktualisierten Schätzung über das realisierbare Potenzial 2020 der Photovoltaik in Luxemburg

Auf Freiflächen würden in der Regel Anlagen mit optimaler Ausrichtung errichtet werden. Sollte das Wachstum der Photovoltaik in Luxemburg also verstärkt von Freiflächenanlagen getragen werden - die Flächenkonkurrenz zum Anbau von Biomasse dürfte keine gravierende begrenzende Rolle spielen, wäre doch ein Zubau von 200 MW_{peak} auf nur 0,3 % der grundsätzlich geeigneten Landesfläche möglich - wäre für die neuen Freiflächenanlagen ggf. die Annahme höherer spezifischer Erträge von rund 950 kWh/kW_{peak} pro Jahr gerechtfertigt. In diesem Fall wäre die o. g. Stromerzeugung von 246 GWh/a auch mit einer weit geringeren installierten Anlagenleistung erreichbar. Da für Freiflächenanlagen keine Einspeisevergütung gewährt wird, werden derzeit nach Angaben des luxemburgischen Ministeriums für Wirtschaft keine Freiflächenanlagen installiert. Aufgrund des Landschaftsbild-prägenden Einflusses von Freiflächen-PV-Anlagen sollten diese Vorteile gegen die optischen Effekte abgewogen werden. Gut geeignete Dachflächen in räumlichem Zusammenhang mit Stromverbrauchern sollten auf alle Fälle immer eine Option darstellen.

Grundsätzlich stellt sich die Frage einer künftigen Fördernotwendigkeit bzw. der Ausgestaltung von Förderinstrumenten. Sinnvoll erscheint es auch unter diesen günstigen preislichen Rahmenbedingungen, den Betreibern auskömmliche Erlöse für nicht selbstgenutzten PV-Strom zu ermöglichen. Anreize, etwa zur Installation aufwändiger Speichersysteme zur Erhöhung der Eigennutzung von PV-Strom aus Kleinanlagen, die aber in nicht notwendigerweise zu optimalen Konfigurationen aus Sicht des Gesamtsystems führen, gilt es vor einer Einführung genau zu prüfen, u.a. auf deren ökonomische Effizienz.

2.3 Biomasse

Die bestehenden und zukünftigen Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse ergeben sich aus der Summe von festen (Abschnitt 2.3.1), flüssigen (Abschnitt 2.3.2 und gasförmigen Energieträgern (Abschnitt 2.3.3).

2.3.1 Feste biogene Energieträger

Das Potenzial fester Biomasse in Luxemburg setzt sich aus nachfolgenden Teilbereichen zusammen:

- Energieholz
- Alt- und Restholz
- Landwirtschaftliche Reststoffe
- Energiepflanzen
- Biogener Müllanteil und
- Klärschlamm

2.3.1.1 Energieholz

Das theoretische Potenzial an Energieholz fußt auf der verfügbaren Luxemburger Waldfläche. Die bewaldete Fläche beträgt 91.400 ha, dies sind 35 % der Landesfläche des Großherzogtums (Zweite Landeswaldinventur 2010). Ein knappes Drittel (32 %) der Waldfläche besteht aus Nadelholz, vorwiegend Fichte mit 19 %, gefolgt von Doug-

lasie 3 % und Kiefer 1 %, sowie Lärche und anderen Nadelhölzern mit jeweils 0,5 %. 8 % der Waldfläche sind mit Mischbeständen bestockt. (Zweite Landeswaldinventur 2010. Insgesamt handelt es sich bei etwa 70 % des Waldes um Laubwald und bei ca. 30 % um Nadelwald.

Alle Potenziale (theoretisch, technisch, realisierbar) der LuxRes-Studie bis 2020 bleiben weiterhin auf gleichem Niveau bestehen. So bleiben die aktuell existierenden forstwirtschaftlichen bzw. landwirtschaftlichen Flächen (Gesamtwaldfläche) in ihrer Verteilung und Größe nahezu erhalten; einzig die Art der Nutzung (Wiederaufforstungsrate, Anteil des im Wald verbleibenden Restholz, etc.) und deren Intensität (Einschlag) ändern sich leicht. Da weiterhin nur nachhaltig nutzbare Potenziale betrachtet werden, wird der Baumbestand an sich nicht zum Potenzial gezählt, sondern nur die nachwachsende Holzmasse (m^3) in der Kalkulation berücksichtigt (ISI/EEG/BSR 2007). Bekannt ist, dass sich die Leistung der Holzheizungen in Luxemburg seit 2010 fast verdreifacht hat. Bei der Art und Weise der Nutzung bzw. bei den Volllaststunden der installierten Feuerungsanlagen, die mit Holz befeuert werden, ist in Luxemburg in den letzten Jahren keine essentielle Veränderung zu beobachten gewesen. Beibehalten werden auch die Annahmen zur nutzbaren Waldfläche.

Etwas schwieriger abzuschätzen ist die Entwicklung beim Import von Holz-Pellets nach Luxemburg. Prinzipiell ähnelt die Entwicklung des Pelletmarkts in Luxemburg der Entwicklung auf dem deutschen Markt. So kann von einem Pelletbedarf von etwa 10 kg Pellets pro Jahr und Einwohner ausgegangen werden. Somit wird der jährliche Gesamtbedarf an Holzpellets in Luxemburg auf etwa 5.000 Tonnen geschätzt (Junginger M. & Sikkema R. 2009). Insgesamt ist die physikalische Produktion an Pellets seit 2007 in Luxemburg um gut 10 % zurückgegangen (Junginger M. & Sikkema R. 2009). Neuere Daten zeigen im Gegensatz dazu ein vollständig konträres Bild. Nach Angaben des Betreibers der zuletzt in Betrieb gegangenen Pelletproduktionsanlage (Kiowatt) werden alleine in dieser einzigen Anlage pro Jahr etwa 35.000 Tonnen an Pellets produziert. Rechnet man diese Pelletmenge zu den Produktionsmengen der übrigen Pelletproduzenten hinzu, dürften heute in Luxemburg über 41.000 Tonnen an Holzpellets produziert werden. D.h. die heutige Pelletproduktion in Luxemburg sollte sich gegenüber 2007 um gut 105 % gesteigert haben.

Das realisierbare Potenzial von Energieholz bis 2020 wird dennoch weiterhin auf knapp 520 GWh in 2020 eingestuft. Zu beachten ist, dass das theoretische und das technische Potenzial deutlich höher liegen und sich auf etwa 2.540 bzw. 2.170 GWh in 2012 belaufen. Insbesondere nachfrageseitige Restriktionen bedingten im Rahmen der LuxRES-Studie die Differenz zwischen realisierbarem und technischem Potenzial.

2.3.1.2 Alt- und Restholz

In Luxemburg sind wenige belastbare statistische Daten zum Anfall von Alt- und Restholz vorhanden. Daher muss weiterhin mit Annahmen und Schätzungen aus der holzverarbeitenden Industrie gearbeitet werden. Es wird geschätzt, dass jährlich etwa 3.100 Tonnen Abfallholz in Luxemburg anfallen. Nach den Ergebnissen jüngster Abfallanalysen sind im luxemburgischen Hausabfall rund 0,9 Gew.- % und im Sperrmüllrund 34 Gew.- % Holz enthalten (Administration de l'environnement 2009). So belief

sich die im Abfall gesammelte Gesamtholzmenge im Jahr 2005 auf ca. 10.200 Tonnen (Administration de l'environnement 2009).

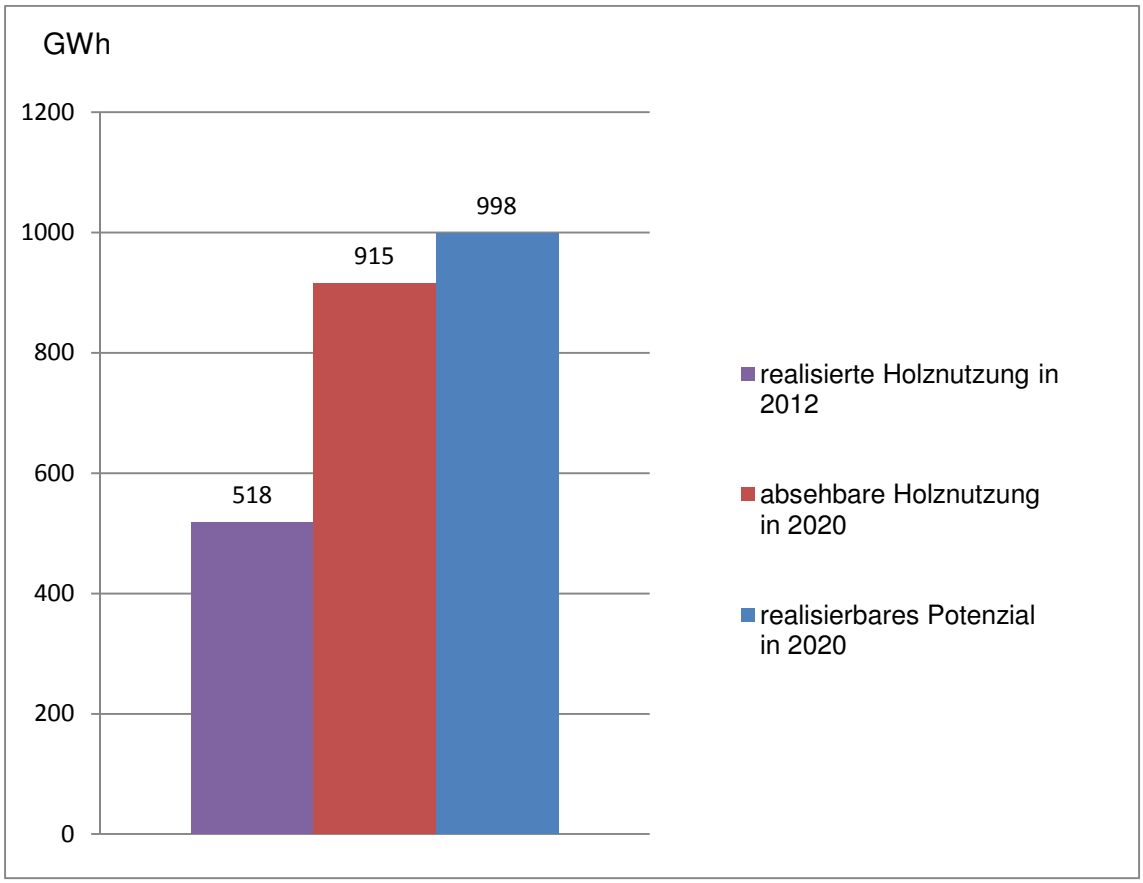
Aufgrund der Unschärfe bei der statistischen Erfassung der elektrischen und thermischen Nutzung von Holz in Luxemburg lassen sich Aussagen zur weiteren Gültigkeit der realisierbaren Potenziale nur für die Summe aus Energieholz und Alt- und Restholz treffen. So wurden in Luxemburg im Jahr 2013 in zentralen Anlagen 36 GWh und in dezentralen Anlagen 219 GWh thermisch genutzt. Hinzu kommen 256 GWh für die Anlage einer grossen industriellen Anlage im Bereich der Spanplattenproduktion. Somit ergeben sich für die thermische Nutzung in Summe 511 GWh. Hinzu kommen etwa 1,95 GWh Stromerzeugung aus Altholz. Nimmt man hierfür eine reine Stromerzeugung mit einer Effizienz von 30% an, ergibt sich eine Altholznutzung in Höhe von 6,5 GWh. Somit resultiert für die Summe aus Energieholz sowie Alt- und Restholz eine Nutzung von 517,5 GWh im Jahr 2013. Dieser Wert liegt unterhalb des Diffusionspfades zwischen dem realisierbaren Potenzial für 2010 in Höhe von 387 GWh und dem realisierbaren Potenzials für 2020 in Höhe von 998 GWh. Somit ergibt sich für diese beiden Biomassekategorien kein Bedarf für die Anpassung der realisierbaren Potenziale.

Was die zukünftige Nutzung betrifft, so betreiben einzelne Betriebe verstärkt die energetische Nutzung sowohl von Energieholz als auch von Rest/Altholz das bei Produktionsprozessen anfällt.

So plant ein großer privater Akteur in den nächsten Jahren eine Reihe von neuen Projekten auf Basis von Energieholz, die bei der Erstellung der LuxRes-Studie noch nicht bekannt waren:

2015:	Holzvergasung 260 kW_{th} und 165$kW_{e,}$
2016:	ca. 300 kW_{th} – ca. 2.300 kW_{th}, 80% der Wärme soll aus Biomasse produziert werden,
2017:	Kirchberg 9 MW_{th} und 2,8 MW_{e},
2018:	ca. 300 kW_{th} – ca. 4.300 kW_{th}, 80% der Wärme soll aus Biomasse produziert werden

Eine industrielle Anlage mit 8 MW_{e} und 32 MW_{th} zur innerbetrieblichen Wärmeproduktion aus Alt- und Restholz ist geplant. Auch der Import von Pellets kann zukünftig zur stärkeren Nutzung von Energieholz in Luxemburg beitragen, wobei dies nicht auf der Nutzung heimischer Biomassepotenziale basieren würde. Insgesamt ergibt sich aus den obigen Zahlen rechnerisch eine zusätzliche Holznutzung von 398 GWh pro Jahr (bei einer Annahme von etwa 7.000 Volllaststunden pro Jahr; dargestellt in Abbildung 16). Addiert man diese zur aktuellen Holznutzung in Höhe von 517,5 GWh/a ergibt sich ein derzeit bereits aus der Projektpipeline absehbare Holznutzung von ca. 915 GWh pro Jahr in 2020. Bei Vergleich mit dem realisierbaren Potenzial von 998 GWh in 2020 ergibt sich in etwa eine Übereinstimmung mit der tatsächlich absehbaren dezentralen Biomassenutzung in 2020 (vgl. Abbildung 16). Eventuell bleibt eine geringfügige Differenz von etwas über 80 GWh bestehen. Daran zeigt sich, dass eine Erreichung des gesamten realisierbaren Holzpotenzials bis 2020 als wahrscheinlich erachtet werden kann.



Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

Abbildung 16: Heutige und zukünftige thermische Holznutzung in GWh

2.3.1.3 Landwirtschaftliche Reststoffe

Die thermische Verwertung fester landwirtschaftlicher Reststoffe ist international hauptsächlich durch die Verbrennung von Stroh in Heizwerken oder KWK-Anlagen charakterisiert (ISI/EEG/BSR 2007).

In den letzten Jahren hat sich in Luxemburg keine gravierende Änderung bei den landwirtschaftlichen Nutz- und Agrarflächen (ca. 61.500 ha Ackerflächen) oder der Massentierhaltung ergeben. Zudem fanden keine essentiellen Veränderungen beim Anbau und dem Ertrag (inklusive Strohertrag) entsprechender Getreide (z.B. Weizen) statt.

Somit können die unterstellten Potenziale aus der LuxRes-Studie (280 GWh/a) auch zukünftig als korrekte obere Abschätzung angesehen werden.

2.3.1.4 Energiepflanzen

Aus heutiger Sicht sind die in der LuxRes-Studie berechneten realisierbaren Potenziale der Energiepflanzen in Luxemburg im Jahr 2020 (284 GWh/a) als leicht überhöht anzusehen, obwohl wichtige Grundannahmen der Vorgängeranalyse (z.B. Gesamtfläche an angebauten Energiepflanzen, Ertrag, Energiegehalt, etc.) beibehalten wurden. Dennoch sind ähnliche Gründe, wie bei den flüssigen biogenen Energieträgern, für die

niedrigeren Potenzialabschätzungen im Jahr 2020 verantwortlich (vgl. Abschnitt 2.3.2.1). Andere Studien im Gegensatz dazu geben die Potenziale, die durch derartige Energiepflanzen zu realisieren sind, noch deutlich niedriger ein.

In Tabelle 2 sind die Anbauflächen einiger bekannter Energiepflanzen (Mais, Miscanthus, Feldfutter, Sudangras, etc.) dargestellt. Mais („Silage-Mais“) zur Erzeugung von Biogas weist von den verschiedenen Energiepflanzen den bei weitem größten Flächenbedarf auf. Dieser lag in den Jahren 2011-2014 zwischen etwa 500 und 590 Hektar.

Tabelle 2: Kenndaten zum Anbau und Ertrag von Energiepflanzen in Luxemburg in den Jahren 2011 bis 2014, die zum Potenzial der festen, gasförmigen bzw. flüssigen Biomasse beitragen

Energiepflanzen 2011	**Anbaufläche (ha)**	**Ertrag (dt/ha)**	**Erntemenge (t)**	**Energiegehalt (t RÖE)**
Getreidekörner (Energie)	0,0	0,0	0	
GPS (Energie)(TM')	59,1	150,0	887	229
Feldfutter (Energie)(TM')	32,0	63,0	201	49
Miscanthus (Energie) (TM')	35,5	135,0	479	182
Sudangras (Energie) (TM')	16,3	75,1	122	29
sonstige Energiepflanzen	0,0	0,0	0	0
Silomais für Biogas (TM)	569,1	129,4	7.365	1.962
Energiepflanzen 2012	**Anbaufläche (ha)**	**Ertrag (dt/ha)**	**Erntemenge (t)**	**Energiegehalt (t RÖE)**
Getreidekörner (Energie)	0,0	0,0	0	
GPS (Energie)(TM')	85,3	150,0	1.280	330
Feldfutter (Energie)(TM')	81,5	108,9	888	216
Miscanthus (Energie) (TM')	41,0	151,0	620	236
Sudangras (Energie) (TM')	22,0	88,4	194	46
sonstige Energiepflanzen	0,0	0,0	0	0
Silomais für Biogas (TM)	581,2	140,6	8.171	2.177
Energiepflanzen 2013	**Anbaufläche (ha)**	**Ertrag (dt/ha)**	**Erntemenge (t)**	**Energiegehalt (t RÖE)**
Getreidekörner (Energie)	0,0	0,0	0	
GPS (Energie)(TM')	32,5	150,0	488	126
Feldfutter (Energie)(TM')	121,5	102,2	1.241	302
Miscanthus (Energie) (TM')	46,5	151,0	702	267
Sudangras (Energie) (TM')	19,4	88,4	172	40
sonstige Energiepflanzen	0,0	0,0	0	0
Silomais für Biogas (TM)	498,0	134,6	6.703	1.786
Energiepflanzen 2014	**Anbaufläche (ha)**	**Ertrag (dt/ha)**	**Erntemenge (t)**	**Energiegehalt (t RÖE)**
Getreidekörner (Energie)	0,0	0,0	0	

GPS (Energie)(TM')	97,6	150,0	1.465	378*
Feldfutter (Energie)(TM')	36,1	92,0	332	81
Miscanthus (Energie) (TM')	46,9	151,0	708	270
Sudangras (Energie) (TM')	9,3	95,3	89	21
sonstige Energiepflanzen	0,0	0,0	0	0
Silomais für Biogas (TM)	493,8	158,3	7.817	2.083

*provisorisch

TM: Trockenmasse; Die Daten betreffen nur die Hauptkulturen, Zwischenkulturen und Fruchtfolgen wurden nicht mit einbezogen

Quelle: SER-Abteilung Agrarstatistik, Außenbeziehungen und landwirtschaftliche Märkte; 2015-01-06

2.3.1.5 Biogener Müllanteil

Das im Jahr 2020 realisierbare Potenzial des biogenen Müllanteils wird ebenso unverändert beibehalten, da

- zwar der absolute Müllanfall im Vergleich zur ursprünglichen Potenzialstudie leicht angestiegen ist;
- der biogene Müllanteil seit der Erstellung der LuxRes-Analyse im Jahr 2007 mit ca. 37 % auf konstantem Niveau verharrt,
- die Verstromung von Biomüll somit nur leicht angestiegen ist auf einen Wert von 31 GWh pro Jahr, was in etwa einer Biomasse-Input von etwa 100 GWh entspricht
- somit die primärenergetische Nutzung von festem biogenem Müll weiterhin deutlich unterhalb des realisierbaren Potenzials für 2010 in Höhe von 138 GWh liegt.

2.3.1.6 Klärschlamm

Die in Luxemburg produzierten Klärschlammmengen werden im „Jahresbericht der klärschlammspezifischen Abfälle“ dokumentiert (Administration de l’environnement 2013).

Insgesamt wurden im Jahr 2012 37 Kläranlagen ausgewertet; es fiel eine Gesamtklärschlammmenge von 8.733 Tonnen Trockensubstanz an. Von dieser Menge wurden ungefähr 8.684 Tonnen Trockensubstanz entweder thermisch verwertet und verbrannt oder kompostiert und als Dünger auf die Felder aufgebracht oder anderweitig landwirtschaftlich verwertet. 2012 wurden etwa 49 % des angefallenen Klärschlammes landwirtschaftlich verwertet, ca. 37 % wurden kompostiert und knapp 14 % thermisch verwertet (Administration de l’environnement 2013).

Im Vergleich dazu wurden im Jahr 2009 etwa 42 % (- 11 % gegenüber 2008) der Trockenmasse an anfallendem Klärschlamm landwirtschaftlich verwertet; 49 % des trockenen Klärschlammes wurden kompostiert und nur 8 % wurden thermisch verwertet. Im Jahr 2004 wurden im Gegensatz dazu sogar 18 % des anfallenden Klärschlammes verbrannt (Administration de l’environnement 2010).

Aufgrund der zunehmenden Kompostierung von Klärschlamm und der Möglichkeit des Exportes von Klärschlamm z.B. nach Deutschland wird davon ausgegangen, dass die Potenzialangaben der LuxRes-Studie im Jahr 2020 von 24 GWh im Jahr allenfalls leicht nach unten auf etwa 22 GWh pro Jahr zu korrigieren wären. Aufgrund der Un-

schärfe in der statistischen Datenlage wird der Wert aber für die weiteren Arbeiten konstant gehalten.

2.3.2 Flüssige biogene Energieträger

Das Potenzial flüssiger Biomasse in Luxemburg setzt sich aus nachfolgenden Rohstoffbereichen zusammen:

- Energiepflanzen und
- Altspeiseöle und –fette

Die zugehörigen Endenergieträger sind Biodiesel (RME), Bioethanol und Altspeiseölmethylester (AME). Generell lässt sich festhalten, dass in diesem Bereich keine oder nur sehr wenige Daten für Luxemburg zur Verfügung stehen.

2.3.2.1 Energiepflanzen

Im Bereich Energiepflanzen steht die Produktion von Bioethanol und Biodiesel zur Diskussion. Welche Flächenpotenziale diesen beiden Produktionslinien jeweils zugeordnet werden, ist eine Frage der Strategie (ISI/EEG/BSR 2007).

Das theoretische Potenzial zur Erzeugung von Biokraftstoffen aus „Energiepflanzen“ (hauptsächlich Rapssaat und Weizen) lag in der LuxRes-Studie (ISI/EEG/BSR 2007) bei 628 GWh im Jahr 2010/2012 und das technische Potenzial bei knapp 300 GWh pro Jahr (Status quo). Leider sind nach Expertenauskunft derzeit keine offiziellen Statistiken zu den Potenzialen der flüssigen Biomasse verfügbar.

Die Autoren gehen davon aus, dass das in der LuxRes-Studie (ISI/EEG/BSR 2007) ausgewiesene realisierbare Potenzial zur Erzeugung von Biokraftstoffen in Luxemburg bis zum Jahr 2020 nicht mehr erreicht werden wird; das realisierbare Potenzial wird statt dessen einem leicht sinkenden Trend folgend in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen mehr oder weniger stark unter den dort angegebenen Potenzialen (60 GWh/a) liegen. Gründe hierfür sind u.a.:

- Im Jahr 2009 wurde die Stilllegungspflicht für landwirtschaftliche Flächen in Luxemburg abgeschafft. Seit diesem Zeitpunkt sind ungenutzte Acker- bzw. Agrarflächen sehr rar. Aufgrund ihres geringen Ertrages dürften diese Flächen bei der Erzeugung von Biokraftstoffen jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielen. Dennoch trägt diese Entwicklung zu einem gewissen Grad zum sinkenden Trend der Biokraftstofferzeugung bei.
- Hinzu kommt, dass zukünftig in der Luxemburger Landwirtschaft Nachhaltigkeits- und Naturschutzaspekte eine noch stärkere Rolle ausüben werden. Durch diese Entwicklungen wird z.B. Einfluss auf die angebauten Pflanzen oder die Schnitthäufigkeit von Wiesenflächen genommen (Schutz von Wiesenbrütern, Erhalt der Artendiversität, etc.). Es werden nämlich nicht nur die bestehenden Ackerflächen, sondern auch Wiesen und Weiden zur Produktion von Energiepflanzen eingesetzt.
- Nicht vergessen werden darf die anhaltende Diskussion über den konkurrierenden Anbau von Pflanzen zur Herstellung von Lebensmitteln und den Anbau von sogenannten „Energiepflanzen“ zur Erzeugung von Kraftstoffen („Flächenkonkurrenz“). Diese Diskussion trägt in großem Umfang dazu bei, dass die gesellschaftliche und soziale Akzeptanz der Biokraftstofferzeugung oder –nutzung zurückgeht und deren Sinnhaftigkeit zunehmend in Frage gestellt wird. Bis 2020 wird sich dieser Trend

aufgrund der sich verändernden Lebensgewohnheiten (Trend zu höherwertigen Nahrungsmitteln und regionalem Anbau, Bionahrungsmittel, ökologische Verträglichkeit, etc.) und der sich ändernden Einstellungen der Bevölkerung noch weiter verstärken.

2.3.2.2 Altspeiseöle und -fette

In der alten Studie aus dem Jahr 2007 wurde davon ausgegangen, dass im Jahr 2005 Altspeiseöle und -fette mit einem Energieinhalt von ca. 2,8 GWh/a eingesammelt wurden (ISI/EEG/BSR 2007). In Luxemburg ist in 2014 jedoch nur eine einzige Anlage bekannt, die mit Hilfe von Altspeisefetten Biokraftstoffe produzieren kann. Diese Anlage weist in 2014 jedoch keine Aktivitäten mehr auf. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass das in der LuxRes-Studie (ISI/EEG/BSR 2007) aufgrund internationaler Erfahrungen bei der Sammlung von Altspeiseölen und -fetten im Haushaltsbereich angegebene Potenzial zur Erzeugung von Biokraftstoffen in unveränderter Höhe 600 t/a bestehen bleibt. Im Gewerbe und in der Industrie sind die anfallenden Mengen an Altspeiseölen und -fetten nach wie vor weniger exakt dokumentiert. Insbesondere vom Umgang im Hotel- und Gaststättengewerbe (inklusive Schnellimbiss und Fastfoodketten) mit dem anfallenden Altspeiseölen und -fetten hängt jedoch das Potenzial ab, das tatsächlich in Luxemburg bis 2020 zu realisieren ist.

Die Autoren gehen davon aus, dass das realisierbare Potenzial der LuxRes-Studie zunächst nahezu unverändert bei etwa 28 GWh pro Jahr bestehen bleibt (ISI/EEG/BSR 2007). Zu beachten ist dabei zudem, dass die Verarbeitung und Nutzung der Rohstoffe nicht unbedingt in Luxemburg selbst geschehen muss. In den Jahren 2008 bis 2012 ging zudem der Anfall von Altspeiseölen und -fetten um ca. 20 % zurück (vgl. Tabelle 3). Die realisierbaren Potenziale der LuxRes-Studie im Jahr 2020 sind aufgrund der nicht verfügbaren aktuelleren Statistiken beizubehalten. Auf lange Sicht ist dagegen vermutlich eher mit leicht steigendem Trend zur rechnen.

Tabelle 3: Aufkommen von Altspeiseölen und -fetten in Luxemburg in den Jahren 2008 bis 2012

Jahr	Anfallende Tonnen
2008	7.449
2009	7.373
2010	7.175
2011	5.727
2012	5.962

Quelle: Administration de l'environnement

2.3.3 Gasförmige biogene Energieträger

Das Potenzial gasförmiger Biomasse in Luxemburg setzt sich aus nachfolgenden Teilbereichen zusammen:

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

Im Hinblick auf die Verwertungstechnologie können die ersten 5 Rohstoffkategorien auch als „Biogas“ zusammengefasst werden, womit der Sektor gasförmige biogene Energieträger in die Bereiche Biogas und Klär- sowie Deponiegas zu unterteilen ist.

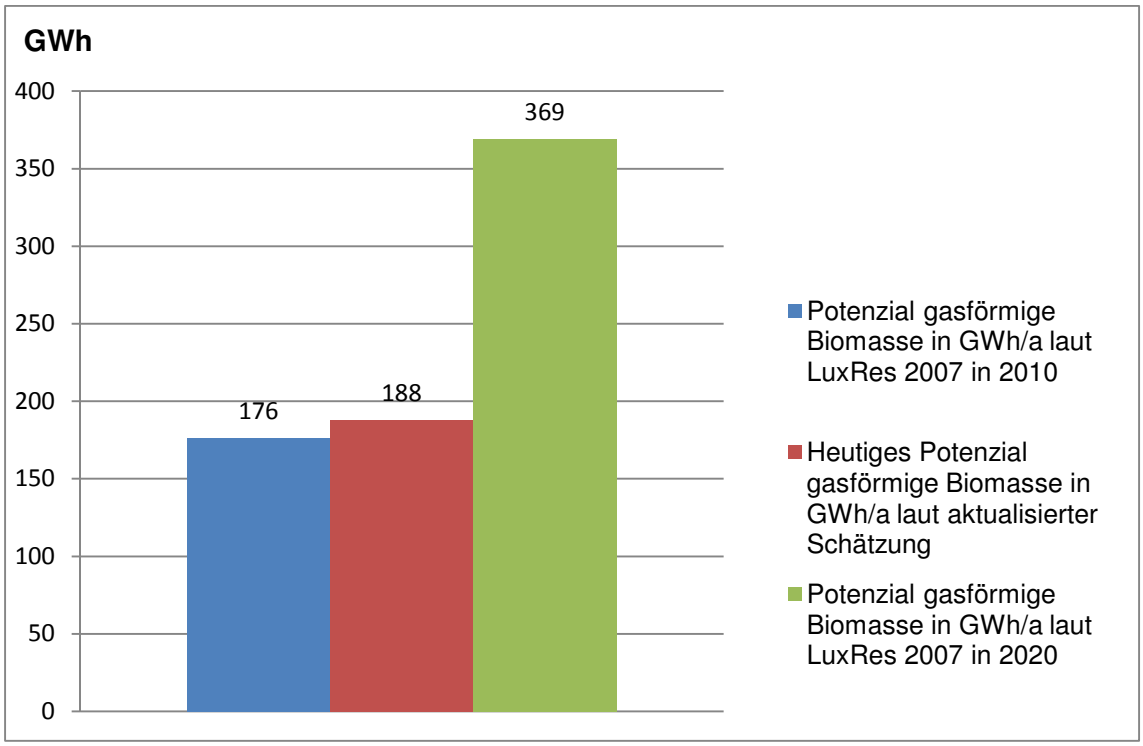
2006 gab es in Luxemburg insgesamt 26 Biogasanlagen mit einer installierten Leistung von 5,8 MW und einer Stromproduktion von 27 GWh. Während die Anlagenanzahl bis 2010 auf konstantem Niveau verharrte, nahm die installierte Leistung im gleichen Zeitraum moderat zu und betrug 7,1 MW; die elektrische Produktion lag bei 47,2 GWh/a (2009; Biogas Vereenegung ASBL 2015). Die installierte Leistung im Jahr 2013 betrug 7,9 MW bei einer Stromerzeugung von 49,2 GWh/a (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Entwicklung der installierten Leistung sowie der Stromerzeugung der Biogasanlagen in Luxemburg

	2006	2009/2010	2013
installierte Leistung in MW	5,8	7,1	7,9
Stromerzeugung in GWh pro Jahr	27	47,2	49,2

Quelle: Biogas Vereenegung ASBL 2015

Für die Summe aus landwirtschaftlichem Bio-, Klär- und Deponiegas beträgt die gesamte installierte Leistung etwa 10 MW und die jährliche Stromerzeugung etwa 56 GWh. Bei einer stromseitigen Effizienz von 30 % beträgt der Biomasseeintrag somit etwa 188 GWh pro Jahr. Dieser Wert entspricht in etwa dem realisierbaren Potenzial von 176 GWh/a in 2010 und liegt deutlich unter dem Wert für 2020 in Höhe von 369 GWh/a entsprechend der Lux-RES Studie. In Summe wird somit die Abschätzung der Potenziale der Lux-RES Studie als maximale obere Schranke im Bereich der gasförmigen Biomasse beibehalten. Es muss jedoch betont werden, dass eine Erreichung dieser realisierbaren Potenziale deutlich unwahrscheinlicher geworden ist als noch in 2007. Dies liegt einerseits daran, dass die erwarteten Fortschritte im Sinne der Kostendegression der Technologie nicht erreicht wurden und daran, dass andere erneuerbare Energietechnologien wie die Photovoltaik deutlich wettbewerbsfähiger sind als erwartet. Damit verschlechtert sich auch das internationale Marktumfeld im Bereich der Biogas-Technologien, was wiederum negative Auswirkungen auf Skaleneffekte beim technologischen Lernen bedingt.



Quelle: ISI/EEG/BSR 2007; IREES/ISI 2015

Abbildung 17: Potenzial gasförmiger Biomasse in Luxemburg heute und im Jahr 2020

Die Biogasvereinigung konnte jedoch keine Angaben über zukünftige Entwicklungen beim Bestand oder dem Zubau von Biogasanlagen tätigen. Erwähnt werden sollte auch, dass aktuell keine Projekte zur Betrachtung der Kostenentwicklung bei Biogasanlagen laufen bzw. bekannt sind. Prinzipiell ist davon auszugehen, dass die relevanten Biogas-Akteure auf das Inkrafttreten der neuen Einspeise-Vergütung gewartet haben. Diese trat im August 2014 in Kraft (« *Règlement grand-ducal du 1er août 2014 relatif à la production d'électricité basée sur les sources d'énergie renouvelables* »).

Es bleibt noch das technische Entwicklungspotenzial von Biogas und die Biogas-Direkteinspeisung zu analysieren. Die LuxRes Studie hat die Thematik der Biogas-Direkteinspeisung für Luxemburg als eine interessante zukunftsweisende Option darstellt und dokumentiert.

In Luxemburg gilt seit dem 23. Dezember 2011 das « *Règlement grand-ducal modifié du 15 décembre 2011 relatif à la production, la rémunération et la commercialisation de biogaz* », welches die Förderung der Einspeisung von auf Erdgasqualität produziertem Biogas regelt. In Luxemburg sind bis heute drei Biogaseinspeiseanlagen errichtet und in Betrieb genommen worden. Diese erhalten eine Einspeisevergütung für das in das Erdgasnetz eingespeiste Biomethan. Im Jahr 2014 haben die drei Biogaseinspeiseanlagen knapp 53 GWh aufbereitetes Biogas in das luxemburgische Erdgasnetz eingespeist. Die Verordnung sieht eine Förderobergrenze von ca. 113 GWh vor (10 Millionen Kubikmeter aufbereitetes Biogas).

Interpretiert man die genannte Förderobergrenze als Limitierung des realisierbaren Potenzials bis 2020, dann zeigt sich, dass in Summe aus Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung und zur Biogasdirekteinspeisung eine Erreichung des realisierbaren Potenzials der LuxRes Studie für das Jahr 2020 in Reichweite rückt. Eine Erhöhung des Wertes für das realisierbare Potenzial wird aber nicht für notwendig erachtet, auch weil eine brennstoffseitige Konkurrenz zwischen Direkteinspeisung und direkter Verstromung besteht.

2.3.3.1 Grünland, Grünschnitt und Landschaftspflegeholz

Grünschnitt, beispielsweise aus der kommunalen aber auch privaten Landschaftspflege, aus Gewerbebetrieben (z.B. Fertigrasenproduktion) oder von nicht anders genutzten Wiesenflächen kann in Biogasanlagen genutzt werden. Dabei zu berücksichtigen sind natürlich auch Aspekte des Natur- und Artenschutzes sowie der Ökologie.

Ein Augenmerk muss auf alle Fälle auf die Verwertungsart des anfallenden Substrates gelegt werden. So steht die Verwertung des anfallenden organischen Substrates in Konkurrenz mit einer thermischen Verwertung oder einer materiellen Nutzung (Kompostierung).

Die zu pflegende Grünfläche in Luxemburg sollte bis 2020 auf relativ konstantem Niveau erhalten bleiben. So wird davon ausgegangen, dass keine essentiellen Änderungen bei der Bewirtschaftung bzw. Pflege von öffentlichen Plätzen und Grünanlagen bzw. Straßen (z.B. Anzahl der Schnitte pro Jahr, etc.) sowie den generellen Rahmenannahmen und -bedingungen (z.B. Annahmen zum Anteil nutzbarer Flächen, Flächenertrag, Gasertrag pro Tonne, Naturschutz) gegenüber den Annahmen der LuxRes-Studie stattfinden.

Diese Analyse geht daher davon aus, dass das theoretische Potenzial zur Erzeugung von Biogas weiterhin bei etwa 133 GWh pro Jahr liegt und das technische Potenzial auf ungefähr 120 GWh pro Jahr. Tatsächlich realisierbar sind 81 GWh im Jahr 2020.

2.3.3.2 Bioabfälle

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

Im Jahr 2012 fielen in Luxemburg im Bereich der privaten Haushalte insgesamt 29.573 Tonnen an Bioabfall und 38.467 Tonnen an Grünschnitt an (Luxemburger Abfallwirtschaftsdatenbank 2013). Der Anteil des Bioabfalls am Gesamthausmüllaufkommen betrug im Jahr 2012 18 %. Beim Grünschnitt sind etwa 72 % der Bürger Luxemburgs an mindestens ein Hol- und Sammelsystem angeschlossen (vgl. Kapitel 2.3.3.1), während es beim Bioabfall mit etwa 65 % geringfügig weniger sind (Luxemburger Abfallwirtschaftsdatenbank 2013). Zu beachten ist, dass im Jahr 2010 zwei neue Anlagen zur Kofermentation von organischem Biomüll in Betrieb gegangen sind (vgl. Tabelle 6). Außerdem muss bedacht werden, dass ein Teil des Grünanfalls (Biomüll bzw. Grünschnitt und Landschaftspflegeholz) auch thermisch verwertet wird (vgl. Kapitel 2.3.1.3.

Es wird davon ausgegangen, dass die Sammelinfrastruktur für Bioabfälle und Grünschnitt bei privaten Haushalten, in den Kommunen und beim Gewerbe eventuell weiter

ausgebaut wird. Somit könnte durch diese Maßnahmen die spezifische jährliche Bioabfallmenge pro Einwohner Luxemburgs weiter ansteigen. In der Periode bis 2020 wird der Trend der LuxRes-Studie im Bereich der Biogaserzeugung aus organischem Müllanfall zunächst unverändert beibehalten.

Prinzipiell sollte das theoretische Potenzial bei gut 40 GWh pro Jahr (2012) liegen, während das tatsächlich realisierbare Potenzial im Jahr 2020 bei 36 GWh pro Jahr eingestuft wird. Das tatsächlich realisierbare Potenzial entspricht gleichsam dem technischen Potenzial im Jahr 2012. Das technische Potenzial wird mit 90 % des theoretischen Potenzials angenommen. Selbstverständlich hängt das Potenzial im Bereich der Biogaserzeugung aus Bioabfall letztendlich auch von der Bevölkerungsentwicklung in Luxemburg ab. Die heutige Bevölkerung Luxemburgs beträgt etwa 550.000 Einwohner. Für das Jahr 2020 wird mit einem Zuwachs auf etwa 610.000 Einwohnern gerechnet.

Tabelle 5: Anlagen zur Kompostierung von biogenem An- und Abfall 1993 – 2012 (Einheit: Tonnen)

Installations de compostage	**1993**	**2000**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**
Total	**5.805**	**37.169**	**57.242**	**58.196**	**59.628**	**63.866**	**62.202**	**47.798**	**54.109**
kg/habitant		133,2	127,7	125,2	125,9	129,4	127,0	95,6	114,3
Minette-Kompost Mondercange [1]	**2.904**	**24.146**	**28.743**	**30.173**	**30.614**	**32.237**	**30.868**	**29.977**	**32.411**
kg/habitant		151,7	167,7	172,1	172,4	179,1	169,4	162,4	173,2
SICA Mamer[6]	**2.499**	**4.903**	**5.061**	**5.185**	**5.117**	**5.288**	**5.315**	**.**	**.**
kg/habitant		176,0	174,4	174,6	164,9	168,7	166,7	.	.
SIDEC Fridhaff [3]	**.**	**8.120**	**6.238**	**6.092**	**5.678**	**5.989**	**5.392**	**5.343**	**6.391**
SIDEC Angelsberg [4]	**.**	**.**	**2.670**	**2.702**	**1.917**	**2.219**	**1.784**	**1.815**	**2.491**
SIDEC: kg/habitant		88,3	90,8	87,5	74,3	79,0	68,6	66,6	80,5
Commune de Hespérange	**.**	**.**	**743**	**786**	**830**	**743**	**682**	**836**	**862**
kg/habitant	.	.	56,6	58,1	59,3	51,1	45,4	54,6	55,3
Ville de Luxembourg/Reckenthal[7]	**.**	**.**	**11.108**	**9.733**	**11.921**	**12.187**	**13.767**	**.**	**.**
kg/habitant			133,9	107,6	128,4	125,1	140,4	.	.
SIGRE Muertendall [5]	**.**	**.**	**2.679**	**3.525**	**3.551**	**5.203**	**4.394**	**9.826**	**11.953**
kg/habitant	.	.	49,9	63,8	63,3	91,1	67,5	61,2	74,5
Pétange [2]	**402**	**.**	**.**	**.**	**.**	**.**	**.**	**.**	**.**

[1] Nouvelle usine à partir de mai 1997.
[2] Installation fermée à partir de 1996.
[3] Nouvelle installation mise en service en 1998.
[4] Nouvelle installation mise en service en 2001.
[5] Nouvelle installation mise en service en 2005.
[6] Installation fermée à partir de 2011.
[7] Installation fermée en 2011.

Quelle: Administration de l'environnement

Tabelle 6: Anlagendaten zur Kofermentation 1993 – 2012 (Einheit: Tonnen)

2) Installations de cofermentation	**1993**	**2000**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**
Déchets biodégradables traités [2]	.	.	12.277	11.981	14.849	21.596	26.945	35.726	39.045
3) Exportations[1]	**1993**	**2000**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**
	.	.	1.805	4514	1173	600	1.261	3.248	775

[1] Ces données ne tiennent pas compte des quantités acceptées aux installations nationales et exportées pour dépassement des capacités nationales
[1] These data do not hold account of the accepted quantities in the national installations and exported for going beyond of the national capacities.
[2] Mise en service de deux nouvelles installations en 2010.
[2] Two new installations brought in service in 2010.

Quelle: Administration de l'environnement

2.3.3.3 Schlachtabfälle

Nach einer persönlichen Information aus dem luxemburgischen Ministerium für Wirtschaft werden bis heute in Luxemburg keinerlei Schlachtabfälle energetisch in Biogasanlagen verwendet. Gründe hierfür dürften nach wie vor u.a. in hygienischen Bedenken gegenüber dem Ausbringen der Gärrückstände auf den landwirtschaftlichen Flächen

liegen (ISI/EEG/BSR 2007). Außerdem wird im Zuge der in Europa immer wieder wiederkehrenden Lebensmittelskandale in der luxemburgischen Landwirtschaft besonderer Wert auf regionalen Anbau und eine hohe Produktqualität gelegt. Hinzu kommt, dass nach dem Kenntnisstand der Autoren im Vergleich zur LuxRes-Studie (ISI/EEG/BSR 2007) keine zusätzlichen Anstrengungen zum Auf- und Ausbau der für die energetische Verwendung notwendigen Logistik (z.B. Sammellogistik, etc.) unternommen wurden.

Zu beachten ist dabei, dass Schlachtbetriebe Luxemburgs durch kleine Betriebsgrößen sowie durch eine gewisse räumliche Verteilung charakterisiert sind.

Da seit 2007 keine gravierenden Änderungen bei der kommerziellen Massen-Tierhaltung (Rinder bzw. Kälber, Schweine bzw. Ferkel, Schafe, Ziegen, Geflügel, etc.) bzw. den Schlachtstatistiken oder der Bevölkerung in Luxemburg zu beobachten ist (vgl.

Tabelle **7**), bleibt sowohl das theoretische Potenzial (2 GWh/a) zur Erzeugung von Biogas als auch das technische (2 GWh/a) oder realisierbare Potenzial (2 GWh/a) zur Biogaserzeugung aus der LuxRes-Studie (ISI/EEG/BSR 2007) weiterhin unverändert bestehen, auch wenn es sich gegenüber anderen Kategorien dieser Studie um ein vergleichsweise geringes Potenzial handelt.

Tabelle 7: Bruttoeigenerzeugung (BEE) (jährlich, in Tonnen Schlachtgewicht) 2005 - 2014

		2005	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Bullen	Geschlachtet	4 999,7	4 996,1	4 889,1	4 884,6	4 337,3	4 423,5	4 403,1	4 728,8
& Ochsen	Importiert	519,8	392,6	531,0	543,3	636,1	648,9	746,6	569,3
	Exportiert	2 796,8	2 999,1	2 938,7	2 753,9	3 556,2	2 493,3	2 343,0	2 722,1
	BEE	**7 276,7**	**7 602,6**	**7 296,8**	**7 095,2**	**7 257,4**	**6 267,9**	**5 999,6**	**6 881,6**
Kühe	Geschlachtet	2 801,7	2 618,2	2 515,0	2 675,1	2 654,9	2 238,4	1 999,9	2 023,6
	Importiert	226,9	178,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Exportiert	3 173,0	3 481,1	3 987,6	3 822,3	4 324,4	3 705,7	3 317,9	3 887,2
	BEE	**5 747,9**	**5 921,3**	**6 502,7**	**6 497,4**	**6 979,3**	**5 944,1**	**5 317,8**	**5 910,8**
Färsen	Geschlachtet	1 420,3	1 241,1	1 421,2	1 571,6	1 821,6	1 693,2	1 444,1	1 633,2
	Importiert	207,3	157,8	407,4	419,9	489,5	507,0	577,5	442,1
	Exportiert	1 650,4	1 309,4	1 651,0	1 026,0	1 480,2	1 153,4	845,6	976,0
	BEE	**2 863,5**	**2 392,7**	**2 664,8**	**2 177,8**	**2 812,3**	**2 339,6**	**1 712,2**	**2 167,1**
Grossrinder	Geschlachtet	9 221,7	8 858,4	8 828,5	9 133,6	8 814,5	8 355,1	7 847,1	8 385,6
	Importiert	953,9	728,4	938,4	963,2	1 125,6	1 155,9	1 324,0	1 011,4
	Exportiert	7 620,2	7 789,6	8 577,3	7 602,2	9 360,7	7 352,4	6 506,5	7 585,3
	BEE	**15 888,1**	**15 919,6**	**16 467,4**	**15 772,6**	**17 049,6**	**14 551,7**	**13 029,5**	**14 959,5**
Kälber	Geschlachtet	712,2	312,7	267,4	256,3	251,8	230,0	213,0	206,8
	Importiert	345,8	253,4	226,0	242,3	279,4	281,4	323,1	246,9
	Exportiert	578,4	427,0	498,2	914,7	1 030,0	916,5	913,3	1 134,0
	BEE	**944,7**	**486,4**	**539,7**	**928,8**	**1 002,4**	**865,1**	**803,2**	**1 094,0**
Rinder	Geschlachtet	9 933,9	9 171,1	9 095,9	9 389,9	9 066,3	8 585,1	8 060,0	8 592,5
TOTAL	Importiert	1 299,7	981,8	1 164,3	1 205,4	1 405,0	1 437,3	1 647,1	1 258,2
	Exportiert	8 198,6	8 216,7	9 075,5	8 517,0	10 390,8	8 268,9	7 419,8	8 719,3
	BEE	**16 832,7**	**16 405,9**	**17 007,1**	**16 701,4**	**18 052,1**	**15 416,8**	**13 832,7**	**16 053,5**
Mastschweine	Geschlachtet	9 817,5	9 001,7	9 206,1	8 853,1	8 894,4	9 807,9	10 267,5	11 316,3
	Exportiert	4 199,2	4 869,6	4 885,7	6 528,6	6 840,4	5 151,7	4 870,8	4 558,3
Sauen & Eber	Geschlachtet	39,1	11,5	9,3	11,5	11,8	13,6	22,3	19,0
	Exportiert	634,2	681,0	470,1	732,4	702,4	613,6	747,9	907,7
Ferkel	Geschlachtet	966,5	933,7	887,0	897,1	840,3	786,0	831,4	814,9
	Exportiert	167,2	280,4	385,6	401,0	329,8	620,2	583,0	560,4
Schweine	Geschlachtet	10 823,2	9 946,8	10 102,4	9 761,6	9 746,5	10 607,5	11 121,2	12 150,3
TOTAL	Importiert	3 067,0	3 733,1	3 217,1	3 877,8	3 833,4	3 681,8	4 050,5	4 242,9
	Exportiert	5 000,6	5 830,9	5 741,4	7 661,7	7 872,6	6 385,6	6 201,7	6 026,5
	BEE	**12 756,7**	**12 044,6**	**12 626,7**	**13 545,4**	**13 785,7**	**13 311,3**	**13 272,4**	**13 933,8**
Schafe	Geschlachtet	65,9	44,8	48,5	45,3	44,5	49,1	49,6	50,5
	Importiert	13,4	5,0	12,8	6,3	6,9	13,7	21,0	6,7
	Exportiert	20,7	14,1	5,9	9,9	20,1	14,5	24,5	23,4
	BEE	**73,2**	**53,9**	**41,6**	**48,9**	**57,7**	**50,0**	**53,2**	**67,2**
Ziegen	Geschlachtet	7,2	9,4	5,8	3,3	4,7	6,9	3,4	10,4
	Importiert	11,7	5,7	20,9	2,1	3,9	8,2	1,9	10,3
	Exportiert	8,8	10,2	9,0	3,5	15,3	2,3	6,6	5,0
	BEE	**4,3**	**13,9**	**-6,1**	**4,7**	**16,1**	**1,0**	**8,1**	**5,1**
Pferde	Geschlachtet	22,0	15,7	15,1	13,8	13,2	12,7	13,4	4,3
	Importiert	40,6	22,2	22,9	70,9	28,6	36,4	59,2	71,7
	Exportiert	18,2	18,8	17,0	60,9	31,3	27,8	34,4	35,8
	BEE	**-0,3**	**12,3**	**9,2**	**3,8**	**15,9**	**4,2**	**-11,4**	**-31,6**
Geflügel	Produktion	245,4	226,2	239,1	240,9	255,4	238,6	243,9	239,3
	Importiert	117,4	98,4	89,1	124,4	201,6	168,3	113,6	125,6
	BEE	**128,0**	**127,8**	**150,0**	**116,5**	**53,8**	**70,3**	**130,3**	**113,7**

Bruttoeigenerzeugung (BEE): Schlachtungen - Import von lebenden Tieren + Export von lebenden Tieren

Schlachtungen: inkl. Hausschlachtungen

Quelle: Service d´économie rurale 2014

2.3.3.4 Gülle

Theoretisch tragen die gesamten in der landwirtschaftlichen Viehzucht anfallenden tierischen Exkremente als potentielle Substrate für Biogasanlagen zum theoretischen Erzeugungspotenzial bei (vgl. Tabelle 8). Laut der LuxRes-Studie aus dem Jahr 2007 ist es jedoch unrealistisch, diesen gesamten Bestand in die Betrachtungen mit einzubeziehen (ISI/EEG/BSR 2007).

Tabelle 8: Gesamtbestand an Tieren in Luxemburg 2000 - 2012

Tierart	2000	2010	2011	2012
Bestand an Pferden	3.154	4.601	4.594	4.887
Bestand an Rindern	205.072	198.830	192.535	188.473
Bestand an Schafen	7.071	9.084	8.951	8.211
Bestand an Schweinen	80.141	83.774	89.158	90.023

Quelle: Luxemburg in Zahlen 2014

Pro Jahr fallen in Luxemburg aktuell etwa 2,6 Millionen Tonnen Gülle und Mist durch die Massentierhaltung an (vgl. Tabelle 9). Die landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden somit auf Basis von Gülle und Energiepflanzen (fast ausschließlich Mais) betrieben (ISI/EEG/BSR 2007).

Tabelle 9: Gülle und Anfall von festem Mist in Luxemburg 2008-2014

Gülle und Mistanfall*	Einheit	2005	2007	2009	2011	2012	2013	2014
Insgesamt	(t/a)	2.509.640	2.593.438	2.650.093	2.613.377	2.559.174	2.623.172	2.674.332
* les quantités de déjections produites pour les bovins et porcins sont d'abord exprimées en m3 de lisier puis converties en tonnes au moyen du poids spécifique du lisier (0,95 tonnes/m^3)								
Zahlen für 2014 noch vorläufig								

Quelle: Service d´économie rurale 2014

Die Rahmenannahmen der LuxRes-Studie zu den essentiellen Rahmendaten (Gasertrag, Energiegehalt, etc.) wurden nicht verändert. Bei der aktuellen Bewertung des Biogasertrages aus Gülle wurde jedoch mit berücksichtigt, dass

- eine anderweitige Nutzung von Gülle (z.B. zur Düngung) möglich ist;
- sich durch den Einsatz von Gülle in Biogasanlagen die Betriebskosten der Anlagenbetreiber im Vergleich zur Nutzung alternativer Substrate erhöhen können (u.a. aufgrund der weniger optimalen Betriebsauslegung), auf der anderen Seite sich die Kosten des Gülleankaufs jedoch gegenüber landwirtschaftlicher Substrateinkäufen prinzipiell kostengünstiger darstellen;
- in Luxemburg daher die Diskussionen um einen angemessenen Gülle-Bonus seit Jahren anhalten (Biogas Vereenegung ASBL 2015). Es bleibt hervorzuheben dass die großherzogliche Verordnung von 2014 mit den neuen Einspeisevergütungen erstmalig einen Güllebonus vorsieht;
- Gülle aus technischen bzw. funktionellen Gründen nur bis zu einem gewissen Anteil in den Biogasanlagen eingesetzt werden kann; ein Betrieb einer Biogasanlage ausschließlich auf dem Substrat „Gülle“ ist nicht möglich;
- nach Aussagen der Biogas Vereenegung ASBL (2015) in den Jahren 2009-2011 rund 10 % der anfallenden Gülle energetisch genutztwurden.

Da es sich bei den verschiedenen Potenzialangaben aus der LuxRes-Studie um vorsichtige Einschätzungen gehandelt hat, wird der Trend zur Biogaserzeugung aus Gülle in dieser Analyse beibehalten. Das realisierbare Potenzial im Jahr 2020 wird weiterhin auf knapp 117 GWh pro Jahr angesetzt. Gleichzeitig bleibt das theoretische Potenzial (168 GWh/a) sowie das technische Potenzial (152 GWh/a) zur Biogaserzeugung aus Gülle im Vergleich zur Lux-Res-Studie unverändert.

2.3.3.5 Klär- und Deponiegas

In der Untersuchungsperiode bis 2020 sind keine essentiellen Veränderungen bei den Rahmenbedingungen für Deponien und Kläranlagen in Luxemburg absehbar. Außerdem liegen keine Informationen über die zukünftige Aus- bzw. Aufrüstung von weiteren Kläranlagen mit BHKWs oder von Deponien mit entsprechenden Infrastruktur- und Rückgewinnungsanlagen vor. Eine Reihe von Kläranlagen in Luxemburg wird bis 2020 vergrößert und wird dementsprechend auch zusätzliche Mengen an Faulgas produzieren (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Status-quo und zukünftige Ausbaugröße ausgewählter Kläranlagen bis 2020

Aktuelle Ausbaugröße (EGW)	Zukünftige Ausbaugröße (EGW)	Standort (Betreiber)
70.000	115.000	Pétange (SIACH)
90.000	115.000	Schifflange (SIVEC)
26.000	36.000	Echternach (KAEW)
80.000	135.000	Bleesbruck (SIDEN)
23.500	50.000	Mamer (SIDERO)
/	47.000	Mertert (SIDEST)

Ausgehend von verfügbaren Statistiken (vgl. Tabelle 11) und weiteren Informationen ist davon auszugehen, dass sich bis 2020 an den Potenzial-Angeben, die in der LuxRes-Studie (ISI/EEG/BSR 2007) angegeben sind, keine gravierenden Änderungen ergeben. D. h. die Entwicklungstendenzen der LuxRes-Studie sind beizubehalten. Das realisierbare Potenzial zur Erzeugung von Klär- und Deponiegas sollte sich daher nach wie vor auf ungefähr 38 GWh pro Jahr belaufen.

Tabelle 11: CH_4-Rückgewinnung auf Deponien in Luxemburg, die von SIGRE, SIDEC und SIDA betrieben werden; 2001-2012

Year	CH4 - Recovery	
	Total Gg	SIDEC, SIGRE, SIDA tonnes
2001	0,15	153
2002	0,14	135
2003	0,10	102
2004	0,30	302
2005	0,31	312
2006	0,34	344
2007	0,32	321
2008	0,31	308
2009	0,27	271
2010	0,28	277
2011	0,26	261
2012	0,34	344
Trend 2011-2012	**0,32**	**0,32**

Quelle: Administration de l'environnement

3 Kurze Analyse der Potenziale für die sonstigen erneuerbaren Energien

Im Gegensatz zur detaillierten Überprüfung der in der LuxRes-Studie von 2007 ermittelten Potenziale der Windenergienutzung, der Photovoltaik sowie der Biomasse wurden die Potenziale der Wärmeerzeugung mittels Solarthermie, Erdwärmenutzung und Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen ("oberflächennahe" Geothermie und Luft-Wasser-Wärmepumpen) sowie die Stromerzeugung durch "kleine" Wasserkraftwerke nur einer kurzen Plausibilitätsprüfung unterzogen. Grund hierfür war, dass keine gravierenden Korrekturen des Ergebnisses zu erwarten waren, entweder, weil seit dem Jahr 2007 keine grundlegende Änderung der determinierenden Randbedingungen eingetreten ist oder weil sich die Datenlage seither nicht verbessert hat.

Lediglich für die Solarthermie waren aufgrund nicht aufrecht zu erhaltender Annahmen Korrekturen der Schätzungen für das theoretische und das technische Potenzial erforderlich, die aber letztlich für die Ableitung von energiepolitischen Schlüssen unerheblich sind. Das realisierbare Potenzial wurde unter Berücksichtigung der tatsächlich eingetretenen Entwicklung korrigiert, liegt aber innerhalb der in der LuxRes-Studie angegebenen Bandbreite (s.u.).

3.1 Solarthermie

Die Methodik der vorliegenden Studie aus dem Jahr 2007 (ISI/EEG/BSR 2007) zur Abschätzung von Potenzialen der solarthermischen Wärmeerzeugung wurde weitgehend übernommen. Einzelne quantitative Annahmen wurden jedoch erheblich modifiziert, so dass die Ergebnisse für das theoretische und das technische Potenzial deutlich nach oben korrigiert wurden. Die Abschätzung des realisierbaren Potenzials wurde an die seit 2007 eingetretene tatsächliche Entwicklung angepasst.

Für die Abschätzung des **theoretischen Potenzials** gilt:

- Wie in der Studie von 2007 angenommen, wurde von einer durchschnittlichen Globalstrahlungssumme von 1.043 kWh/m^{2}a ausgegangen.
- Gleiches gilt für die angesetzte nutzbare Landesfläche von 212 km^2, die die Flächenkonkurrenz zur Photovoltaik mit einer hälftigen Aufteilung auf die beiden Nutzungsformen Photovoltaik und Solarthermie berücksichtigt.
- Im Gegensatz dazu wurde jedoch für die Abschätzung des theoretisch möglichen Ertrags (Obergrenze) angenommen, dass ausschließlich Vakuum-Röhrenkollektoren mit deutlich höherem Nutzwärmeertrag gegenüber Flachkollektoren zum Einsatz kommen, auch wenn dieser Anlagentyp aus verschiedenen Gründen sicherlich nur einen begrenzten Marktanteil wird gewinnen können. Rechnerisch wurde anstatt des Werts für Flachkollektoren von 350 kWh/m^{2}a aus der Studie von 2007 der dort genannte Wert von 550 kWh/m²a für Röhrenkollektoren angesetzt (Praxiswerte aus Österreich).

Das theoretische Potenzial der solarthermischen Wärmeerzeugung in Luxemburg kann somit auf rund 116.600 GWh/a beziffert werden. Dies liegt zwar deutlich über dem 2007 errechneten Vergleichswert von 74.200 GWh/a, da aber vom theoretischen Potenzial allenfalls 0,1% als realisierbar zu betrachten ist - siehe dazu die Ausführungen weiter unten - ist diese Ergebniskorrektur für die Entwicklung von Strategien zum Ausbau der Solarenergienutzung bedeutungslos.

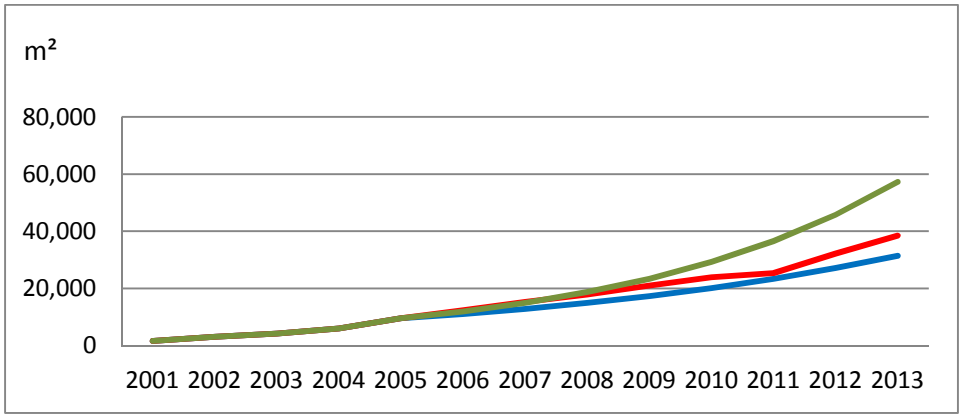
Für die Abschätzung des **technischen Potenzials** gilt:

- Für das Jahr 2005 war von einem Gesamtbestand in Luxemburg von ca. 127.000 Gebäuden ausgegangen worden. Gemäß Angaben des Institut National de la Statistique et des Études Économiques betrug von 2005 bis 2013 die Zunahme des Wohnungsbestandes 18 %; dies spiegelt insbesondere das hohe Bevölkerungswachstum in Luxemburg wider. Bis 2020 wird eine Zunahme um 39 % gegenüber 2005 erwartet. Aus der Statistik der Baugenehmigungen lässt sich ein Zubau von rund 2 Wohnungen pro Gebäude ableiten, womit die Anzahl der Gebäude für 2013 bereits auf gut 140.000 und für das Jahr 2020 auf gut 160.000 geschätzt werden kann. Zur Abschätzung des technischen Potenzials wurde somit (analog zur Abschätzung des Photovoltaik-Potenzials) von 160.000 Gebäuden ausgegangen.
- Die Annahmen zu durchschnittlichen Dach- und Wandflächen blieben unverändert.
- Bei der Installation von Solarkollektoren auf und an Gebäuden wird die installierte Leistung in der Regel vom Wärmebedarf des Gebäudes (Warmwasser und ggf. Raumwärme bei Heizungsunterstützung) determiniert. Höhere, mit Vakuum-Röhrenkollektoren erzielbare Leistungen müssen sinnvoll in das Wärmebereitstellungssystem des Gebäudes integriert werden. Überschüsse in den Sommermonaten gilt es zu vermeiden. Insofern ist bei Einsatz dieser Technologie eine eher geringere Flächenbelegung zu erwarten. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei der Abschätzung des theoretischen Potenzials (als theoretischer Obergrenze des Solarthermie-Ertrags) wurde daher bei der Berechnung des technischen Potenzials für Gebäude-gebundene Anlagen wie in der Studie von 2007 vom Flächenertrag von Flachkollektoren, also von 350 kWh/m^{2}a ausgegangen, zumal dies die derzeit und vermutlich auch künftig am häufigsten eingesetzte Technologie ist.
- Die Flächenannahmen zur Abschätzung des Potenzials auf Freiflächen blieben unverändert, insbesondere die Annahme, dass 21 km^2, also 5 % der nach Abzug von Konkurrenznutzungen verfügbaren Landesfläche für Freiflächen-Solarthermie nutzbar sind.
- Für Freiflächenanlagen gilt die Restriktion durch den Wärmebedarf eines einzelnen Gebäudes nicht. Daher wurde für diese Aufstellungsform losgelöst von Rentabilitätsbetrachtungen der für Röhrenkollektoren geltende höhere Flächenertrag von 550 kWh/m^{2}a angesetzt.
- Die ab 1.1.2015 bzw. 1.1.2017 geltenden Neubaustandards im Wohngebäudebereich (ab 1.1.2015: durchschnittlich Energieausweisklassen B (Wärmeschutz) und A (Primärenergiebedarf); ab 1.1.2017 durchschnittlich Energieausweisklassen A (Wärmeschutz) und A (Primärenergiebedarf)) bedeuten einen verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien. Dies bedeutet dass neue Wohngebäude zwingend mit erneuerbaren Energien ausgerüstet sein müssen. Solarthermie kann in diesem Bereich eine wichtige Rolle spielen.

Mit diesen Annahmen erhöht sich der errechnete Wert für das technische Potenzial auf Dachflächen von 2.241 GWh/a auf 2.822 GWh/a und für Fassaden von 77 GWh/a auf 97 GWh/a. Der mit Abstand größte Anteil entfällt auf das Freiflächen-Potenzial. Das Rechenergebnis erhöht sich von 7.420 GWh/a auf 11.660 GWh/a, was einem Zehntel des theoretischen Potenzials in Luxemburg entspricht. In der Summe ergibt sich ein

technisches PV-Potenzial für Luxemburg in Höhe von 14.579 GWh/a[4]. Das entspricht einem Achtel des theoretischen Potenzials und ist etwa die Hälfte mehr, als der in der Studie von 2007 angegebene Wert von 9.738 GWh/a. Auch hierfür gilt trotz der deutlichen Korrektur des Ergebnisses, dass die modifizierten Annahmen zur Technologie (Flachkollektoren vs. Vakuum-Röhrenkollektoren) für die Entwicklung von Strategien zum Ausbau der Solarenergienutzung als bedeutungslos einzuschätzen sind.

Bei der Abschätzung des **realisierbaren Potenzials** wurde die seit 2007 tatsächlich eingetretene Entwicklung berücksichtigt. Nach Angaben des EurObserv'ER (2014) betrug der Zubau von solarthermischen Anlagen in Luxemburg in den Jahren 2012 und 2013 zusammen rund 13.000 m^2 bzw. 9,1 MW_{th}, wobei der Zubau in 2012 mit 4,8 MW_{th} etwas über dem Zubau im Folgejahr mit 4,3 MW_{th} lag. Die in Luxemburg Ende 2013 installierte Leistung wird mit 27,4 MW_{th} angegeben. Der Zuwachs betrug also fast 50% in nur zwei Jahren und verlief damit erheblich steiler als in der EU gesamt, wo im gleichen Zeitraum eine Steigerung um nur 17% zu verzeichnen war. Insgesamt sind die Zubauraten in der EU seit dem in 2008 erreichten Maximum leicht rückläufig. Aus dem Zubau lässt sich eine mittlere Kollektorfläche von 1,43 m^2 pro kW installierter thermischer Leistung ableiten. Die in Luxemburg installierte Gesamtfläche betrug damit Ende 2013 rechnerisch rund 39.000 m². Dies sind etwa 7.700 m² bzw. gut 24% mehr, als in der Studie von 2007 für die konservative Schätzung mit jährlichem Wachstum um 16% (2005 bis 2020) angenommen wurde. Entsprechend ergibt sich eine aktualisierte Schätzung des Wärmeertrags der Ende 2013 installierten Anlagen von 13,7 GWh/a gegenüber der ursprünglichen konservativen Schätzung von 11,0 GWh. Diese kann somit als überholt betrachtet werden. Die ambitionierten Schätzwerte, die auf einem jährlichen Wachstum um 25% basieren, erwiesen sich mit 20 GWh als um die Hälfte über dem Ist-Wert für 2013 liegend (vgl. Abbildung 18).



Quelle: EUROBSER'VER (2014) und eigene Rechnungen von IREES/ISI 2015

Abbildung 18: Entwicklung der installierten Flachkollektoren in m². Konservative Schätzung (untere blaue Kurve),reale Entwicklung (rote Kurve) und ambitionierte Schätzung (grüne Kurve)

[4] Um die Auswirkung der modifizierten Annahmen auf das Gesamtergebnis darzustellen, wurden ungerundete Zahlenwerte genannt; dies soll keineswegs Präzision der Potenzialschätzungen implizieren.

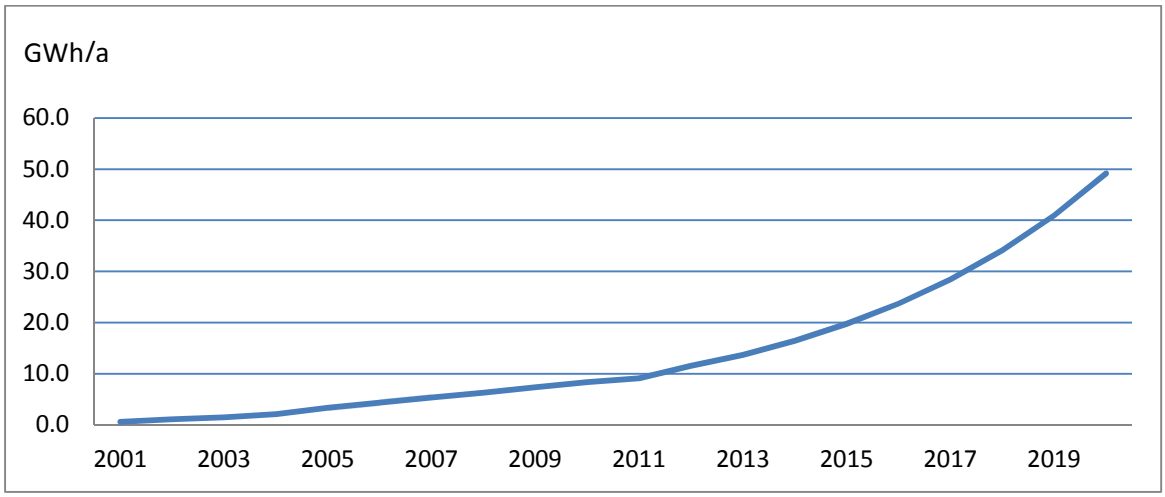
Im Folgenden wird auf die in der Studie von 2007 vorgenommene Unterscheidung zwischen einem oberen und einem unteren Diffusionspfad ("konservative" und "ambitionierte" Schätzung) verzichtet.

Als realisierbar wird ein jährlicher Zubau um 20% angesehen. Absolut bedeutet dies eine innerhalb von sieben Jahren zusätzlich installierbare Kollektorfläche von rund 100.000 m^2, basierend auf

- einer Ausstattung des dominierenden Anteils aller 20.000 bis zum Jahr 2020 auf Basis der Angaben des Statec zu erwarteten Neubauten mit durchschnittlich 5 m^2 Kollektorfläche sowie
- durch Teilausstattung der Neubauten und entsprechende Nachrüstaktivitäten im Gebäudebestand.

Der Survey des EurObserv'ER (2014) kam zu dem Ergebnis, dass 2013, abgesehen von Kunststoffabsorbern für Schwimmbäder etc., rund 90% des Zubaus durch Installation von Flachkollektoren erfolgte und Vakuum-Röhrenkollektoren nur eine untergeordnete Rolle spielten. Für die Abschätzung des energetischen Potenzials werden näherungsweise unveränderte Marktanteile unterstellt und es wird daher rechnerisch vom Flächenertrag für Flachkollektoren ausgegangen (350 kWh/m^2a).

Damit ergibt sich als realisierbares Potenzial für das Jahr 2020 bei installierter Fläche von rund 140.000 m² eine Wärmeerzeugung von 49 GWh/a (siehe Abbildung 19). Zum Vergleich: Die konservative Schätzung von 2007 hatte eine realisierbare Erzeugung von 31 GWh/a, die ambitionierte Schätzung 96 GWh/a ergeben. Auch bei Aufnahme der im Jahr 2007 als ambitioniert eingeschätzten Zubaurate von 25%/a ergibt sich aufbauend auf dem Ist-Wert des Jahres 2013 lediglich ein Wert von 65 GWh/a, also nur gut 2/3 des damaligen ambitionierten Schätzwertes.



Quelle: IREES/ISI 2015

Abbildung 19: Realisierbares Potenzial der Solarthermie in GWh/a, aktualisierte Schätzung

3.2 "Tiefe" Geothermie

Die Potenziale der "tiefen" Geothermie, also der Nutzung von Erdwärme aus tiefen geothermischen Lagerstätten (im Ggs. zur in Kapitel 3.3 betrachteten Nutzung "oberflächennaher" Geothermie durch Wärmepumpen) wurden wegen fehlender Datenbasis für Luxemburg in der vorliegenden Potenzialschätzung von 2007 (ISI/EEG/BSR 2007) mit Null angegeben.

Im Rahmen einer laufenden Dissertation wird nach Angaben des luxemburgischen Ministeriums für Wirtschaft (Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie, persönliche Mitteilung Oktober 2014) eine bessere Modellierung der Geothermie-Vorkommen in Luxemburg anvisiert. Nach Angaben des Service géologique du Luxembourg würden erste Analysen demnach erhöhte Wärmeströme in der Region Bettembourg-Dudelange-Kayl-Schifflange zeigen. Temperaturen von 38 bis 44°C werden in dieser Region in einem Aquifer (Buntsandstein) erwartet, der sich in 700 bis 1100 m Tiefe befindet. Eine Probebohrung im französischen Grenzgebiet hätte das Vorkommen von Wasser von 49°C mit einer Abflussmenge von 500 l/min bestätigt. Bei Bohrtiefen bis zu 2000 Meter könnten Temperaturen von 70-75°C erreicht werden (Rotliegende über paläozoischem Grundgebirge). Diese bisweilen vorwiegend theoretischen Erkenntnisse müssen durch genauere Untersuchungen bestätigt werden.

Weiterführende Daten zur Potenzialschätzung liegen derzeit nicht vor.

3.3 Wärmepumpen

Die grundlegenden Annahmen zur Abschätzung der Potenziale der Niedertemperatur-Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen aus sind auch aus heutiger Sicht noch zutreffend und plausibel.

Die wesentliche Einflussgröße für die Bestimmung des theoretischen Potenzials der oberflächennahen Erdwärmegewinnung ist die hierfür nutzbare Landesfläche. Die diesbezüglichen Annahmen können beibehalten werden, ebenso die rechnerischen Annahmen zum für Umgebungswärmeentzug nutzbaren Luftvolumen für Luftwärmepumpen. Somit können die Werte für das **theoretische Potenzial** in Höhe von rund 62.000 GWh/a beibehalten werden.

In der Studie von 2007 war zur Berechnung des technischen Potenzials (im Gegensatz zu den Berechnungen für Solarthermie und Photovoltaik) von rund 170.000 Gebäuden ausgegangen worden. In Analogie zur Abschätzung der Gebäudebestandsentwicklung bis zum Jahr 2020, die im Rahmen der korrigierten Schätzungen für die Solarenergienutzung vorgenommen wurden, müsste von einer etwas geringeren Gesamtzahl, nämlich von 160.000 Gebäuden ausgegangen werden. Diese Änderung der Annahmen wäre jedoch in Anbetracht der zu fordernden Rechengenauigkeit ohne Belang, zumal weitere wichtige Determinanten im Rahmen dieses Vorhabens nicht eingehend untersucht werden konnten. So erfolgte die Potenzialschätzung auf Basis des Wärmebedarfs der Gebäude, dessen Entwicklung ohne aufwändige Analyseschritte nicht fundiert quantifiziert werden kann. Somit wurden auch die Werte für das **technische Potenzial** in Höhe von rund 1.500 GWh/a mit einem Anteil der Luft-Wärmepumpen von etwas über 200 GWh/a (14%) beibehalten.

Zur Schätzung des realisierbaren Potenzials wurde in der Studie von 2007 eine Ausstattung von 2.500 neu errichteten Einfamilienhäusern mit Wärmepumpen bis zum Jahr 2010 angenommen, was zu einem rechnerischen Umweltwärmeertrag von 30 GWh/a führen würde. Für den Zeitraum bis 2020 wurde die Ausstattung weiterer 5.000 neuer Einfamilienhäuser und die Umrüstung von 3.500 Einfamilienhäusern des Bestandes mit höherem Wärmebedarf angesetzt, was zu einem Umweltwärmeertrag von insgesamt rund 180 GWh/a der als realisierbar erachteten 11.000 Anlagen führt. Rechnerisch wurde dabei unterstellt, dass es sich ausschließlich um Erdreich-Wärmepumpen handelt und Luft-Wärmepumpen nicht zum Tragen kommen. Die potenzialsteigernde Wirkung innovativer Lösungen, wie der Speicherung von im Sommer abgeführter Wärme aus der Gebäudekühlung im Erdreich zur Nutzung in der kalten Jahreszeit (dies findet z. B. bereits vereinzelt in modernen Bürogebäuden Anwendung), konnte rechnerisch nicht berücksichtigt werden.

Insgesamt wurde also von einem Zubau von 7.500 mit Wärmepumpen ausgestatteten Einfamilienhäusern in 13 Jahren, also knapp 600 Häusern pro Jahr ausgegangen. Nach Angaben des Statec wurden in Luxemburg zwischen 2010 und 2013 jährlich insgesamt rund 2.000 Baugenehmigungen (durchschnittlich etwa 2 Wohnungen pro Neubau; detaillierte Aufteilung nach Gebäudegrößenklassen nicht verfügbar) erteilt. Mit dem erwarteten Zuwachs der Wohnungen in Luxemburg ist mit einem deutlichen Ansteigen der jährlichen Neubauten zu rechnen, so dass die Schätzung von 600 realisierbaren Wärmepumpen im Neubaubereich auch aus heutiger Sicht durchaus realistisch erscheint.

Nach Angaben der luxemburgischen Umweltverwaltung (Administration de l'environnement) sind in Luxemburg bis Ende 2014 1.229 Wärmepumpenanlagen gefördert worden. Die durch Wärmepumpen generierte erneuerbare Wärme betrug laut Statec 25,61 GWh im Jahr 2013. Etwa 2/3 der in den letzten Jahren geförderten Wärmepumpen sind Luftwärmepumpen. Eine klar steigende Tendenz ist seit 2007 erkennbar, wobei der Zubau von Erdreichwärmepumpen nach einem Anstieg in 2009 bei etwa 60 neuen Anlagen pro Jahr lag. Nach Angaben des Wasserwirtschaftsamtes (Administration de la gestion de l'eau) stiegen die Genehmigungen gemäß Wassergesetz vom 19.12.2008 zwischen 2012 und 2015 von gut 70 auf über 100 Anlagen pro Jahr an.

Schreibt man die Entwicklung zwischen 2010 und 2012 mit einer Zunahme der Wärmepumpen (alle Systeme) um 21 %/a bis 2020 fort, ergibt sich im Jahr 2020 eine Gesamtzahl von rund 4.340 Anlagen, also 40% der als aus Sicht des Jahres 2007 als realisierbar erachteten Anlagenzahl. Dieses Verhältnis der Trendfortschreibung zur maximal realisierbaren Anlagenzahl erscheint plausibel, wenn auch optimistisch.

Als Fazit dieser Plausibilitätsbetrachtungen kann der Wert von 180 GWh/a als realisierbares **Potenzial** für den Ertrag aus Umweltwärme beibehalten werden. Es muss allerdings deutlich darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei nur um grobe Schätzungen handelt. Insbesondere lässt sich auch der Beitrag der unterschiedlichen Systeme (Luft/Wasser, Erdreich/Wasser) nicht verlässlich angeben. Es zeigt sich allerdings, dass der potenzielle Beitrag der Wärmepumpen insbesondere im Neubau substanziell ist. Das ausgewiesene realisierbare Potenzial entfällt in etwa zu gleichen Anteilen auf den Gebäudebestand und auf Neubauten.

3.4 "Kleine" Wasserkraft

Auch für die Nutzung der Wasserkraft zur Stromerzeugung (in für Luxemburg relevanten Kleinanlagen bis 10 MW elektrischer Leistung) gilt, dass die grundlegenden Annahmen zur Abschätzung der Potenziale aus der vorliegenden Potenzialschätzung von 2007 (ISI/EEG/BSR 2007) noch heute plausibel sind und daher beibehalten werden können.

Damit ergibt sich als **Abflusslinienpotenzial**, welches als **theoretisches Potenzial** betrachtet werden kann (Definition siehe ISI/EEG/BSR 2007, S. 134) ein unveränderter Wert von 175 GWh/a.

Die Abschätzung des **technischen Potenzials** erfolgte 2007 vereinfachend mittels eines bottom-up-Ansatzes, da die für eine detaillierte Potenzialschätzung erforderliche Berücksichtigung der Fließverluste ein genaues, im Rahmen der damaligen Studie nicht mögliches Studium der Gewässerverläufe erforderlich gemacht hätte. Stattdessen wurden die damals existierenden potenziellen Anlagenstandorte von Kleinwasserkraftwerken in Luxemburg betrachtet. Daraus ergab sich ein Wert von 140 GWh/a.

Die Abschätzung des realisierbaren Potenzials erfolgte ebenfalls durch Betrachtung konkreter bzw. denkbarer Standorte, weswegen das technische Potenzial auch als weitgehend realisierbar betrachtet wurde: 137 GWh/a.

Gemäß Angaben des luxemburgischen Ministeriums für Wirtschaft (Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie, persönliche Mitteilung Oktober 2014) gilt das damals als Option gesehene Wasserkraftwerk an der Sauer nach wie vor als realisierbar und sollte daher weiterhin berücksichtigt werden. Daten zu weiteren Ausbauplänen von Privatbetreibern liegen nicht vor. Betroffen seien aber eher sehr kleine und im Gesamtbild eher vernachlässigbare Anlagen.

Somit ist aus heutiger Sicht eine Stromproduktion von 137 GWh/a nach wie vor als **realisierbares Potenzial** zu betrachten. Es ist aber anzumerken, dass die Stromerzeugung aus Wasserkraft in den Jahren 2001 bis 2013 bei fast unveränderter Kapazität von knapp 38 MW mit Werten zwischen etwa 58 und 121 GWh stark schwankte (vgl. ISI/EEG/BSR 2007, S. 8 sowie Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie)).

4 Zusammenfassung

Tabelle 12 fasst die Ergebnisse der überprüften und aktualisierten Potenzialschätzungen zusammen. Bezüglich der realisierbaren Potenziale, die für energiepolitische Fragestellungen die größte Relevanz haben, ergab sich gegenüber dem Stand von 2007 folgendes:

- Die realisierbaren Potenziale der solaren Stromerzeugung sind aus heutiger Sicht aufgrund der mittlerweile eingetretenen Preisentwicklung für Photovoltaiksysteme sowie wegen des erwarteten Zubaus von Gebäuden und damit verfügbarer Dachflächen erheblich höher einzuschätzen.
- Ebenso ist aufgrund der technischen Entwicklung (höhere Anlagenleistungen) und der Wirtschaftlichkeit der Windenergieanlagen ein erheblich höheres realisierbares Potenzial der Windenergienutzung zu erwarten, was sich in konkreten Planungen für Anlagenparks widerspiegelt.
- Das realisierbare Potenzial der Biomassenutzung insgesamt ist aus heutiger Sicht ähnlich hoch wie zum Zeitpunkt der Schätzungen für LuxRes 2007. Die Potenziale von landwirtschaftlichem Biogas und Energiepflanzen sind vermutlich etwas geringer einzuschätzen als in 2007, aufgrund der insgesamt sehr unsicheren Datenlage im Bereich der Biomasse wird jedoch an dem ursprünglichen Wert festgehalten. Es muss jedoch betont werden, dass eine Erreichung dieser realisierbaren Potenziale insbesondere beim Biogas deutlich unwahrscheinlicher geworden ist als noch in 2007. Dies liegt einerseits daran, dass die ursprünglich erwarteten Fortschritte im Sinne der Kostendegression der Technologie nicht erreicht wurden und daran, dass andere erneuerbare Energietechnologien wie die Photovoltaik deutlich wettbewerbsfähiger sind als erwartet. Damit verschlechtert sich auch das internationale Marktumfeld im Bereich der Biogas-Technologien, was wiederum negative Auswirkungen auf Skaleneffekte beim technologischen Lernen bedingt.
- Das realisierbare Potenzial der solarthermischen und oberflächennahen geothermischen Wärmeerzeugung liegt innerhalb des Korridors der Erwartungen aus LuxRes 2007.
- Im Übrigen können die Annahmen zum realisierbaren Potenzial der Potenzialstudie LuxRes 2007 beibehalten werden.
- Das Potenzial für tiefe Geothermie lässt sich aufgrund fehlender Datenlage nicht konkret abschätzen.
- Das realisierbare Potenzial von Wasserkraftanlagen hat sich in den letzten Jahren nicht erhöht und hängt im Wesentlichen vom Ausbau einer nach wie vor machbaren Anlage ab.

Tabelle 12: Potenziale Erneuerbarer Energien in GWh/a; Vergleich der Schätzungen von 2007 mit den aktualisierten Schätzungen

	Endenergie-form	**Schätzung 2007**		**Status Quo 2013**	**aktualisierte Schätzung 2015**		**Kommentar zur Aktualisierung**
		theoretisches Potenzial	realisierbares Potenzial, ggf. mit Bandbreite in 2020		theoretisches Potenzial	realisierbares Potenzial in 2020	
		technisches Potenzial			technisches Potenzial		
feste biogene Energieträger gesamt	Heizwert	7.051	1.713	546	7.105	1.713	weitgehend gleichbleibende Einschätzung
		4.872			4.980		
flüssige biogene Energieträger gesamt	Heizwert	660	88	0	660	88	weitgehend gleichbleibende Einschätzung, allenfalls leicht sinkender Trend bei Energiepflanzen
		326			326		
gasförmige biogene Energieträger gesamt	Heizwert	2.351	369	188	2.351	369	weitgehend gleichbleibende Einschätzung, allenfalls leicht sinkender Trend bei Energiepflanzen
		1.281			1.281		
Geothermie	Wärme	nicht quantifiziert	nicht quantifiziert	0	nicht quantifiziert	nicht quantifiziert	nach wie vor fehlende Explorationsergebnisse
		nicht quantifiziert			nicht quantifiziert		

Quelle: IREES/ISI 2015

Kleinwasserkraft	Strom	175 140	137	3	175 140	137	Randbedingungen unverändert
Photovoltaik	Strom	33.167 7.607	59 176	73	33.167 7.876	246	Systempreise seit 2007 stark gesunken; Annahme höherer Gebäudezahl wegen Bevölkerungswachstum
Solarthermie	Wärme	74.200 9.738	31 96	14	116.600 14.579	49	Annahme höherer Gebäudezahl wegen Bevölkerungswachstum; theoretisches/technisches Potenzial: Vakuum-Röhrenkollektoren berücksichtigt; realisierbares Potenzial: Obergrenze 2007 überschätzt
Wärmepumpen	Wärme	61.743 1.516	181	24	62.500 1.516	181	Randbedingungen weitgehend unverändert; Potenzialschätzung beibehalten, aber Zuwachs von Luft-Wasser-WP war 2007 noch nicht abzusehen
Windkraft	Strom	20.584 5.146	237	81	20.584 5.718	399	konkrete Planungen liegen vor; wegen technischer Entwicklung höhere Anlagenleistungen und Vollaststunden angenommen
Summe (maximal) realisierbares Potenzial bis 2020 - Strom		**433 - 550**			**782**		
Summe (maximal) realisierbares Potenzial bis 2020 – Biomasse und Wärme		**2.287 – 2.352**			**2.305**		

Quelle: IREES/ISI 2015

5 Literatur

Administration de la gestion de l'eau (2015): Mitteilung zur Anzahl von Genehmigungen von Wärmepumpenanlagen

Administration de l'environnement (2014): Anonymisierte tabellarische und grafische Zusammenfassung ausgewählter Daten der Jahresberichte 2012 der luxemburgischen Kofermentationsanlagen

Administration de l'environnement (2013): Jahresbericht der kläranlagenspezifischen Abfälle Berichtsjahr 2012.

Administration de l'environnement (2010): Jahresbericht der kläranlagenspezifischen Abfälle Berichtsjahr 2009

Administration de l'environnement (2009): Aspekte einer zeitgemäßen Abfallwirtschaft – Artikelsammlung 2008

Biogas Vereenegung ASBL (2015): Für eine nachhaltige Biogasproduktion in Luxemburg: Gülle als sinnvollster Rohstoff – "Pioniere" bei den Landwirten nicht benachteiligen! Online verfügbar unter: http://www.biogasvereenegung.lu/top-themen.html

ESTIF (2011): Solar Thermal Markets in Europe Trends and Market Statistics 2010

ESTIF (2009): Solar thermal market grows strongly in Europe Trends and Market Statistics 2008

EUROBSER'VER (2014): "Solar Thermal and CSP Barometer - installations 2012 and 2013" (PDF). http://www.energies-renouvelables.org. Archived from the original on 25 November 2014. Retrieved 25 November 2014

EurObserv'ER 203 (2007-2014): Solar thermal and concentrated solar power barometer

EuPD (2014): "EuPD Preismonitor 2014"

EWEA (2015): "EWEA Annual Statistics 2014". European Wind Energy Association. Retrieved 2015-02-11

EWEA (2014): "EWEA Annual Statistics 2013". European Wind Energy Association. Retrieved 2014-02-11

EWEA (2013): "Wind in power: 2012 European statistics", February 2013

EWEA (2012): "EWEA Annual Statistics 2011". European Wind Energy Association. Retrieved 2011-02-18

EWEA (2011): "EWEA Annual Statistics 2010". European Wind Energy Association. Retrieved 2011-01-31

EWEA (2010): "Cumulative installed capacity per EU Me State 1998 - 2009 (MW)". European Wind Energy Association. Retrievemberd 2010-05-22

IEA (2013): Statistics, Luxembourg, Electricity and Heat for 2012. Online verfügbar unter: http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=LUXEMBOU&product=electricityandheat&year=2012

Institut Luxembourgeois de Régulation (2014): Production d'énergie électrique en 2013 basée sur les énergies renouvables et sur la cogénération (en kWh)

Institut National de la Statistique et des Études Économiques: Luxemburg in Zahlen 2014. Online verfügbar unter: http://www.statistiques.public.lu/catalogue-publications/luxembourg-en-chiffres/luxemburg-zahlen.pdf

Junginger M. & Sikkema R. (2009): Pellets@las data collection, University Utrecht, the Netherlands. Online verfügbar unter: www.pelletsatlas.info

Luxemburger Abfallwirtschaftsdatenbank (2013): Daten zur Abfallwirtschaft im Großherzogtum Luxemburg – Hausmüll und hausmüllähnliche Abfälle. Online verfügbar unter: http://www.environnement.public.lu/dechets/statistiques_indicateurs/LUXUS_Daten_2012.pdf

Ministère de l'Économie / **Direction générale de l'Énergie**, persönliche Mitteilungen Oktober 2014 und Februar 2015

Ministere du Dévelopment durables et des Infrastructures (2013): Jahresbericht der Kläranlagenspezifischen Abfälle – Berichtsjahr 2012. Online verfügbar unter: http://www.environnement.public.lu/dechets/statistiques_indicateurs/boues_d_epuration_2012.pdf

Tierische Produktion (2014): Bruttoeigenerzeugung 2005-2014; service d´économie rurale. Online verfügbar unter: http://www.ser.public.lu/statistik/tier_produktion/bruttoeigenerzeugung_tiere_jahr.pdf