

Wissenschaftliche Beratung zu Fragen der Energiestrategie Lu- xemburgs mit besonderem Fokus auf Erneuerbare Energien

Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien - Ausblick auf 2030 -

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, 25. Oktober 2016

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)

Grafikbearbeitung: Holger Klein

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

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Definition von Potenzialen.....	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Potenzialdefinition	1
2	Detaillierte Potenzial-Analysen für ausgewählte Bereiche der Erneuerbaren Energien.....	3
2.1	Windenergie	3
2.2	Photovoltaik.....	5
2.3	Biomasse	8
2.3.1	Feste biogene Energieträger	8
2.3.2	Flüssige biogene Energieträger.....	11
2.3.3	Gasförmige biogene Energieträger.....	12
3	Kurzbetrachtung der Potenziale für die sonstigen erneuerbaren Energien..	15
3.1	Solarthermie.....	15
3.2	"Tiefe" Geothermie	15
3.3	Wärmepumpen.....	16
3.4	"Kleine" Wasserkraft.....	17
4	Zusammenfassung.....	18
5	Literatur.....	23

1 Aufgabenstellung und Definition von Potenzialen

1.1 Aufgabenstellung

Im Jahr 2016 wurde die Aktualisierung der meist „LuxRes-Studie“ genannten Potenzialstudie über die Erneuerbaren Energien in Luxemburg aus dem Jahr 2007 mit dem Zeithorizont 2020 veröffentlicht (ISI/IREES 2016). Ergänzend dazu wurden das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und das Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) vom luxemburgischen Ministerium für Wirtschaft gebeten, den Zeithorizont der aktualisierten Potenzialstudie um 10 Jahre zu erweitern und soweit mit vorhandenen bzw. leicht zugänglichen Informationen möglich, einen Ausblick auf die im Zeitraum bis 2030 realisierbaren Potenziale der Erneuerbaren Energien zu geben.

Dabei fanden die seit Abschluss der für die Aktualisierung durchgeführten inhaltlichen Analysen bekannt gewordenen tatsächlichen Entwicklungen Berücksichtigung. So liegen für einzelne Erneuerbare Energieträger (vorläufige) Daten zu installierten Kapazitäten mit Stand Ende 2015 vor, so dass beim Ausblick auf die darauf anschließenden 15 Jahre bis 2030 auf dem aktualisierten Ist-Stand aufgesetzt werden konnte.

Des Weiteren wurden weiterführende Analysen zur Entwicklung der zentralen limitierenden Faktoren für die einzelnen Technologien bis 2030 vorgenommen, um deren maximale Diffusion in der Dekade nach 2020 geeignet abzuschätzen.

Im vorliegenden Dokument wurde darauf verzichtet, die Herleitung der Potenzialschätzungen mit Zeithorizont 2020 darzulegen. Diesbezüglich sei auf die aktuelle, oben genannte Arbeit verwiesen (ISI/IREES 2016). Lediglich falls für das Verständnis der Abschätzungen mit verlängertem Zeithorizont erforderlich, wurden einzelne Annahmen für den Zeitraum bis 2020 wiederholt.

Da von zentraler Bedeutung für das Verständnis und die Diskussion der Ergebnisse, wird jedoch im nachfolgenden Abschnitt die Potenzialdefinition wiederholt.

1.2 Potenzialdefinition

Um die Verständlichkeit und Bewertung dieser Analyse zu erleichtern, werden an dieser Stelle die Definitionen 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.
-

2 Detaillierte Potenzial-Analysen für ausgewählte Bereiche der Erneuerbaren Energien

Im Rahmen der Aktualisierung der LuxRes-Studie von 2007 waren die Potenziale der Windenergienutzung, der Photovoltaik sowie der Biomassenutzung einer detaillierten Analyse unterzogen worden. Dementsprechend wurde auch für den Ausblick auf 2030 diesen Energiequellen besonderes Augenmerk gewidmet.

2.1 Windenergie

Ende 2015 waren in Luxemburg Windenergieanlagen mit einer Leistung von insgesamt 63 MW am Netz (EurObserv'ER 2016a). Dies entspricht einem Zubau um 4,7 MW seit Ende 2013, dem Basisjahr der aktualisierten Potenzialstudie mit Zeithorizont 2020 (ISI/IREES 2016). In dieser war ein geplanter Zubau um gut 7 MW im Jahr 2014 am Standort Kehmen-Heischent unterstellt worden. Die geringfügige Abweichung des tatsächlichen Zubaus von den Erwartungen auf Basis des konkreten Planungsstandes vom Februar 2015 stellt den erwarteten Ausbaupfad bis 2020 keineswegs in Frage. Das heisst, die Erwartung eines Zubaus um 96 MW bis 2018 an neun Standorten kann ebenso wie die Annahmen zu sonstigen Zubau- und Repoweringmaßnahmen bis 2020 beibehalten werden.

Für die Dekade 2020 bis 2030 wird ein weiterer Zubau von 20 MW pro Jahr, also kumuliert um 200 MW, an neuen bzw. ergänzend an bestehenden Standorten für realisierbar gehalten. Diese Schätzung basiert im Wesentlichen auf einer Extrapolation des geplanten Zubaus der Windenergie in den Jahren von 2015 bis 2020, welcher gemessen an der vergangenen Dekade als sehr ambitioniert betrachtet werden kann. Gemäß vom Luxemburgischen Wirtschaftsministerium zur Verfügung gestellten Informationen (Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie 2016) betrachtet ein großer Projektentwickler alleine in seinem Einflussbereich einen Zubau im betrachteten Zeitraum von über 10 MW/a (ohne Berücksichtigung von Repowering) in einem optimistischen Szenario für realisierbar. Es soll jedoch betont werden, dass der tatsächliche Ausbaumaßgeblich von Restriktionen des Naturschutzes - zum Beispiel Ausweisung neuer Vogelschutzgebiete, auf die natur&mwelt (2016) hinweist - und der konkreten Raumplanung beeinflusst wird und somit unter dem realisierbaren Pfad liegen kann.

Bis 2020 wird gemäß Aktualisierungsstudie ein Repowering-Zubau um 35 MW, also eine Steigerung der 2013 bestehenden Kapazität um rund 60% für möglich gehalten. Unterstellt man im Schnitt eine Verdoppelung der Kapazität der vom Repowering erfassten Anlagen, würden also 35 MW des bisherigen Bestandes (58,3 MW in 2013) bis zum Jahr 2020 durch Neuanlagen ersetzt werden. Es verbleiben dann rechnerisch rund 23 MW der nach 2020 zum Repowering anstehenden Bestandsanlagen. Unterstellt man auch für diese Kapazität eine Verdoppelung durch Repowering werden rechnerisch weitere 23 MW gewonnen. Im Gegensatz zu den oben genannten Zubauerwartungen wird dieses vollständige Repowering des bisherigen Anlagenbestands von Projektentwicklerseite nicht gesehen; in einer dem Wirtschaftsministerium vorliegenden Grobschätzung wird lediglich ein Repowering etwa im Umfang dessen gesehen, wie es in der aktualisierten Schätzung bis 2020 angesetzt wurde (ca. 36 MW). In der Summe erscheint die Einschätzung aus Projektentwicklersicht aber durchaus ähnlich.

Damit ergibt sich rechnerisch ein **realisierbares Potenzial** von 422,5 MW, das bis zum Jahr 2030 am Netz sein könnte (siehe **Abbildung 1**). Diese installierte Kapazität ist in Relation zur erwarteten maximalen Netzhöchstlast in 2030 zu setzen, die gemäß Schätzungen des Luxemburger Netzbetreibers Creos (2013) in Abhängigkeit zu den Annahmen zum künftigen Bedarf von Rechenzentren und der Elektromobilität zwischen gut 800 und knapp 1.200 MW liegt.

Mit der unverändert beibehaltenen (konservativen) Annahme von 2.000 Vollaststunden pro Jahr ergibt sich somit eine als **realisierbar erachtete Windstromerzeugung** von 845 GWh im Jahr 2030 (siehe **Abbildung 2**).

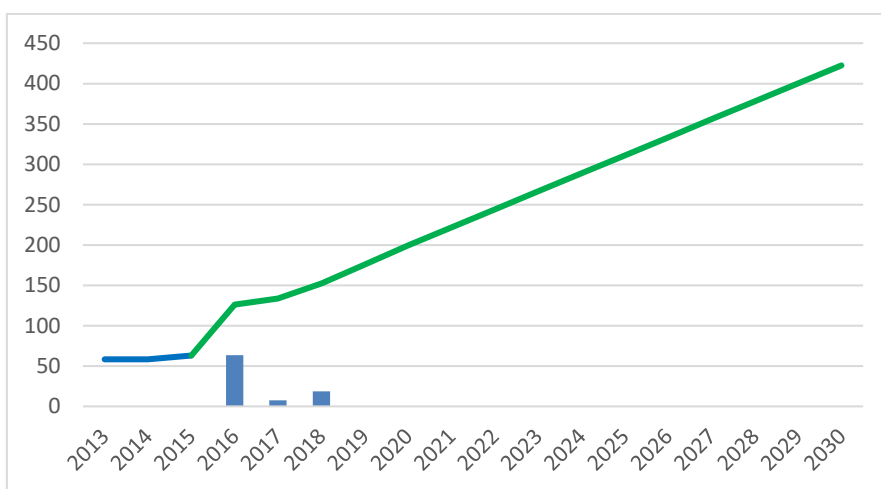


Abbildung 1: Ausblick auf das bis 2030 realisierbare Potenzial der Windenergienutzung in Luxemburg; installierte Leistung in MW (grüne Kurve, ausgehend von der blau dargestellten tatsächlichen Entwicklung bis 2015; blaue Balken: projektiierter Kapazitätszubau gemäß ISI/IREES 2016)

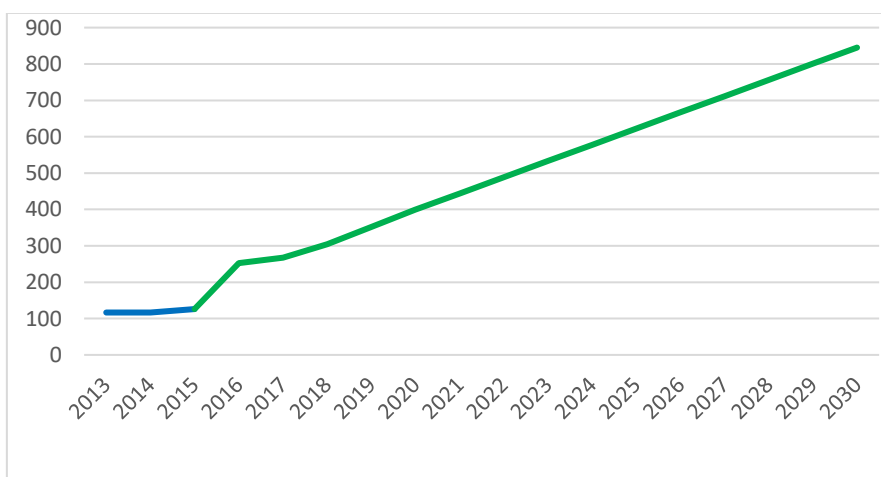


Abbildung 2: Ausblick auf das bis 2030 realisierbare Potenzial der Windenergienutzung in Luxemburg; Erzeugung in GWh/a (grüne Kurve, ausgehend von der blau dargestellten tatsächlichen Entwicklung bis 2015)

Der Luxemburgische Netzbetreiber stellt sich in seinem aktuellen Netzentwicklungsplan mit dem Zeithorizont 2035 (Creos 2013) auf einen geringfügig niedrigeren Zubau von Windenergieanlagen ein. Insgesamt ging Creos in der im September 2013 abgeschlossenen Studie von einer projektierten Zubauleistung von Windenergieanlagen in Höhe von 344,8 MW aus, was einer installierten Leistung von dann etwas über 400 MW entspräche und sich insbesondere auf das 65 kV-Netz auswirken würde.

Über die Hälfte des von Creos erwarteten Zubaus von Windenergieanlagen, nämlich 190 MW, wäre im nördlichen Landesteil zu erwarten. Die mit Inbetriebnahme 2016 konkret geplanten Projekte mit insgesamt rund 70 MW (vgl. ISI/IREES 2016) sind ausschließlich im Norden angesiedelt. Dies bedeutet, dass darüber hinaus im Norden in den folgenden zwei Dekaden ein weiterer Zubau um rund 120 MW denkbar wäre.

Zum Transport der künftig eingespeisten Windenergie werden im Norden Verstärkungsmaßnahmen am 65 kV-Netz erforderlich, die über den zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit sowie zur Deckung absehbarer zusätzlicher Lasten (z.B. geplante Rechenzentren) bestehenden Ertüchtigungs- und Verstärkungsbedarf hinausgehen (Creos 2013).

2.2 Photovoltaik

Ende 2015 waren in Luxemburg Photovoltaikanlagen mit einer Leistung von insgesamt 125 MW_{peak} am Netz. Der Zubau seit Ende 2013, dem Basisjahr der aktualisierten Potenzialstudie (ISI/IREES 2016), betrug jeweils 15 MW_{peak} pro Jahr (EurObserv'ER 2016b). Dies entspricht einer Ausschöpfung von 50% des als realisierbar erachteten jährlichen Zubaupotenzials in diesem Zeitraum. Ausgehend von diesem damit um 30 MW_{peak} reduzierten Ausgangsniveau für das Jahr 2015 verringert sich unter Beibehaltung der Annahmen für den realisierbaren jährlichen Zubau das für 2020 als realisierbar erachtete Potenzial ebenfalls um 30 MW_{peak} auf 275 MW_{peak} (Niveaushiftung).

Damit sind die Annahmen des Luxemburgischen Netzbetreibers in seinem aktuellen Netzentwicklungsplan (Creos 2013) als sehr moderat zu betrachten. Creos beziffert den (möglicherweise von der installierten Leistung abweichenden) Beitrag der Photovoltaik zur Deckung der Netzhöchstlast im Jahr 2035 auf 115 MW, was einem Anteil von gut 10% des Szenarios „Haut“ ohne den Zusatzbedarf der Elektromobilität entspricht.

Basierend auf aktuellen Kostenerwartungen könnte Photovoltaik ab dem Jahr 2020 zu den günstigsten Erzeugungsoptionen im Stromsektor gehören. In der Dekade 2020 bis 2030 wird daher ein jährlicher Zubau um 50 MW_{peak} für grundsätzlich realisierbar erachtet. Gestützt wird die Annahme eines weiterhin lebhaften Zubaus auch durch die Einführung einer Sonderversgütung für PV-Strom aus Gemeinschaftsanlagen mit Größen zwischen 30 und 200 kW_{peak} ab dem Jahr 2015.

Damit liegt das **realisierbare** Potenzial im Jahr 2030 bei einer installierten Kapazität von ca. 775 MW_{peak} (siehe **Abbildung 3**). Dies entspricht in etwa der derzeitigen Spitzenlast des öffentlichen Netzes in Luxemburg. Laut Netzentwicklungsplan des Netzbetreibers Creos (2013) liegt die erwartete Spitzenlast 2030 je nach Szenario zwischen gut 800 und knapp 1.200 MW. Dies bedeutet, dass bei entsprechender solarer Einstrahlung erhebliche Anteile der Netzlast durch Photovoltaik gedeckt werden (ggf. ergänzt durch Einspeisungen aus Windenergieanlagen; vgl. Abschnitt 2.1).

Lokale Restriktionen der Potenzialausschöpfung könnten sich aus Gründen der Netzintegration ergeben. Der aktuelle Netzentwicklungsplan von Creos (2013) lässt hierzu jedoch keine direkten Rückschlüsse zu, da er die für PV-Einspeisungen relevante Niederspannungsebene nicht abdeckt. Jedoch kann die Nicht-Überschreitung der Spitzenlast als Indikator dafür gesehen werden, dass die maximale Aufnahmefähigkeit des Luxemburger Netzes als Ganzes noch nicht überschritten wird. Der Bedarf für lokale Netzertüchtigungsmaßnahmen, vor allem im Verteilnetz, wäre indessen bei Installation dieser Kapazitäten zu erwarten. Mittel- und langfristig können auch höhere PV-Einspeisungen durch zusätzliche Kapazitäten im Übertragungsnetz sowie durch Flexibilisierung der Nachfrage und Speicher realisiert werden. Für die kommende Dekade bis 2030 ist allerdings davon auszugehen, dass Restriktionen im Übertragungs- und in Verteilnetzen relevante Limitationen für den Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien PV und Windenergie darstellen.

Es ist anzunehmen, dass dieser Zubau zu erheblichen Anteilen auch von Freiflächenanlagen getragen werden muss. Naturschutzbelange müssen dem nicht entgegenstehen. So sieht natur&mwelt (2016) in Photovoltaikanlagen auf intensiv genutzten landwirtschaftlichen Flächen eine Alternative zu den existierenden Bewirtschaftungsformen. Auch die Flächenkonkurrenz zum Anbau von Biomasse dürfte keine gravierende begrenzende Rolle spielen, wäre doch entsprechend den hier getroffenen Annahmen ein Zubau von 200 MW_{peak} auf nur 0,3 % der grundsätzlich geeigneten Landesfläche möglich und beträgt der für den Anbau von Biogasmais genutzte Anteil der Ackerfläche derzeit (2013) lediglich 0,8 % (Biogas Vereenegung 2016).

Freiflächenanlagen können mit ihrer in der Regel optimalen Ausrichtung (im Gegensatz zu den aufgrund der jeweiligen Gebäudeausrichtung notwendigen Kompromissen bei Aufdachanlagen) auch höhere spezifische Erträge erzielen. Aus diesem Grund wurde für die Schätzung des photovoltaischen Stromerzeugungspotenzials für 2030 mit einem mittleren spezifischen Ertrag von 864 kWh/kW_{peak}*a gerechnet. Dieser Wert liegt um etwa 7% höher als der in der Aktualisierung für 2020 angesetzte Wert (806 kWh/kW_{peak}*a). Er entspricht dem durchschnittlichen Ist-Wert der Jahre 2014 und 2015 gemäß Angaben von EurObserv'ER (2016b) und ist als konservative Annahme zu betrachten. Er könnte bei höherem Freiflächenanteil noch weiter erhöht werden, was zu geringerem Bedarf installierter Kapazität für die gleiche Stromerzeugung führen würde.

Das **realisierbare Potenzial** der PV-Stromerzeugung liegt damit im Jahr 2030 bei rund 670 GWh/a (siehe **Abbildung 4**). Der Effekt der nicht vollständigen Ausschöpfung des Zubaupotenzials in den Jahren 2014 und 2015 und des damit niedrigeren Ausgangsniveaus wird teilweise durch die nach oben korrigierten Annahmen zum spezifischen Ertrag kompensiert, so dass sich für das Jahr 2020 ein Zwischenwert von 238 GWh/a ergibt (246 GWh/a gemäß ISI/IREES 2016; bei unveränderter Annahme zum spezifischen Ertrag ergäben sich 222 GWh/a). Der als realisierbar erachtete, sehr hohe jährliche Zuwachs der photovoltaischen Stromerzeugung würde im Jahr 2030 aber dennoch nur zu

einer Ausschöpfung von 8,5 % des technischen Potenzials (7.876 GWh/a) gemäß ISI/IREES (2016) führen¹.

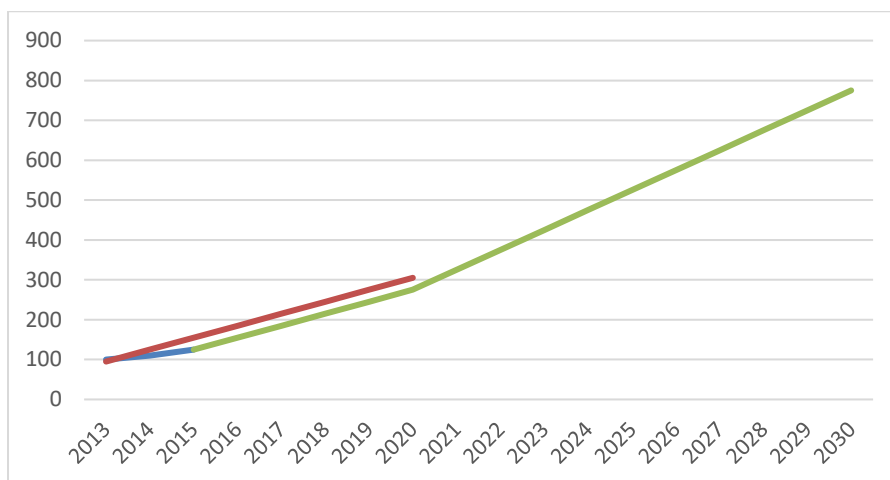


Abbildung 3: Ausblick auf das bis 2030 realisierbare PV-Potenzial in Luxemburg; installierte Leistung in kW_{peak} (grüne Kurve, ausgehend von der blau dargestellten tatsächlichen Entwicklung bis 2015; zum Vergleich in rot: realisierbares Potenzial gemäß ISI/IREES 2016)

¹ Interessant ist ein Vergleich mit Ergebnissen anderer Autoren von der Universität Luxemburg: Dale und Siebentritt (2016) halten eine vollständige Deckung des luxemburgischen Strombedarfs von 6.8 TWh/a (2014: 6,2 TWh) auf nur 1,3 % der Landesfläche für theoretisch möglich. Das ist etwa das 10-fache des hier ausgewiesenen realisierbaren Potenzials und entspricht etwa dem technischen Potential für Freiflächenanlagen, das gemäß ISI/IREES (2016) mit knapp 6,6 TWh/a beziffert wird. Die Autoren der Universität Luxemburg gehen ähnlich wie die Autoren der vorliegenden Studie von Annahmen zur Globalstrahlung und zum Umwandlungswirkungsgrad von PV-Systemen aus, ermitteln aber kein theoretisches Potenzial. Stattdessen weisen sie nach, dass nur ein sehr kleiner Teil der Landesfläche zur solaren Deckung des Strombedarfs erforderlich wäre. Dies ist ein alternativer Betrachtungsansatz, der die hier präsentierten Ergebnisse durchaus bestätigt.

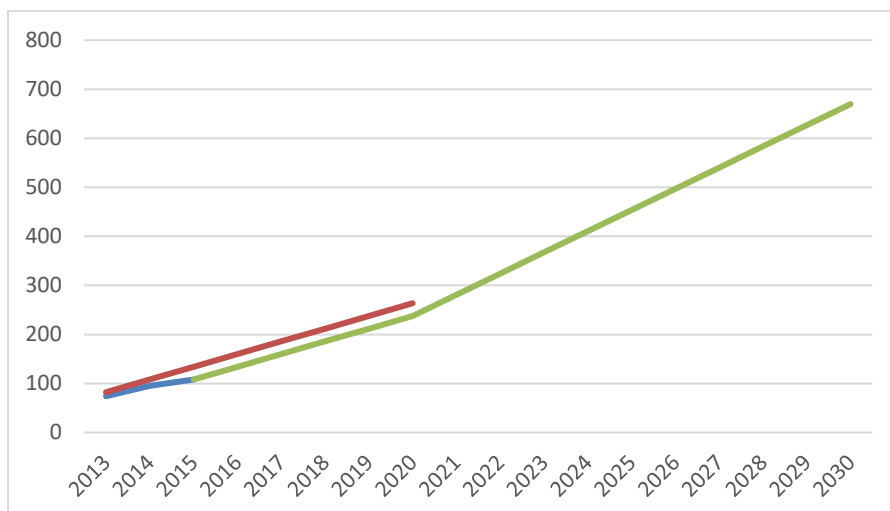


Abbildung 4: Ausblick auf das bis 2030 realisierbare PV-Potenzial in Luxemburg; Erzeugung in GWh/a (grüne Kurve, ausgehend von der blau dargestellten tatsächlichen Entwicklung bis 2015; zum Vergleich in rot: realisierbares Potenzial gemäß ISI/IREES 2016)

2.3 Biomasse

Das Potenzial der Biomasse setzt sich aus den Potenzialen für die festen biogenen Energieträger (Kapitel 2.3.1), den Potenzialen für die flüssigen biogenen Energieträger (Kapitel 2.3.2) und den Potenzialen für die gasförmigen biogenen Energieträger (Kapitel 2.3.3) zusammen.

2.3.1 Feste biogene Energieträger

Auch bis zum Jahr 2030 wird sowohl der Privatwald (54 %) als auch der Staatswald (46 %) nachhaltig bewirtschaftet werden. D.h. der vorhandene Baumbestand wird weiterhin nicht zum nutzbaren Holzpotenzial gerechnet, sondern nur die nachwachsende Holzmasse bei der Kalkulation der Potenziale berücksichtigt.

Es wird angenommen, dass sich der Anteil von Naturwald an der Luxemburger Waldfläche aufgrund von intensivierten Naturschutzgedanken bis zum Jahr 2030 von 5 % (4.500 ha) auf 6 % (5.400 ha) erhöhen wird. Die nutzbare Waldfläche bleibt mit 72.475 ha prinzipiell auf einem konstanten Niveau. Weiterhin nicht berücksichtigt werden der Platzbedarf für Infrastruktureinrichtungen (knapp 4.600 ha) sowie nicht aufforstbarer Niederwald (ca. 4.300 ha) oder steile Hanglagen (ca. 4.600 ha). Der oberirdisch nachwachsende Netto-Biomasseertrag² von 5,7 Tonnen Trockensubstanz (Stammholz, Schlagabraum) pro Hektar Waldfläche und Jahr aus der LuxRes-Studie (2007) bzw. ISI/IREES (2016) wird, wie auch der Heizwert von 5,2 kWh pro kg Trockensubstanz, für die Periode 2020 bis 2030 übernommen.

² Exklusive Wurzelholz, Stubben, Laub, Entnahme durch Pflanzenfresser oder Verrottung

Um eine nachhaltige Waldbewirtschaftung gewährleisten zu können werden in dieser Studie maximal nur 25 % des Holzzuwachses beim Potenzial für die energetische Nutzung berücksichtigt. Prinzipiell können somit bis 2030 unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten gut 181.000 m³ (2,5 m³ pro Hektar und Jahr) an Energieholz eingeschlagen werden. Dabei sind infrastrukturelle und preisliche Restriktionen, wie z.B. der Mobilisierungsgrad und die Erschließung des Privatwaldes, nicht berücksichtigt. Gleichzeitig könnte eine intensivere Nutzung von Grünschnitt und Landschaftspflegeholz erfolgen, wobei auch diese Nutzung naturverträglich betrieben werden sollte. Dennoch gilt es auch über das Jahr 2020 hinaus, die verschiedenen Funktionen des Waldes (Ökosystem, CO₂- und Wasserspeicher, Erholungsraum für Menschen, etc.) zu schützen.

Es ist zu erwarten, dass die Nutzung von Holz in Form von Energieholz (Scheitholz, Pellets oder Hackschnitzel) oder Altholz bis zum Jahr 2030 sowohl bei Kommunen als auch Unternehmen oder Privathaushalten deutlich zunehmen wird. Insbesondere da große zentrale Blockheizkraftwerke im Vergleich zu privaten Kleinanlagen deutlich effizienter betrieben werden können. Hinzu kommt, dass diese zentralen Anlagen in der Regel mit effektiveren und aufwändigeren Filtereinrichtungen ausgestattet werden und somit im Vergleich mit privaten Kleinanlagen zu einer deutlichen Reduktion der Schadstoff- bzw. Feinstaubbelastung der Luft beitragen können.

Daher wird das realisierbare **Potenzial für Energieholz** im Jahr **2030** für Luxemburg auf etwa **650 GWh** eingestuft; dies entspricht einer Steigerung gegenüber 2020 von rund 25 % innerhalb von zehn Jahren. Aufgrund der Unschärfe bei der statistischen Erfassung der thermischen Nutzung von Holz in Luxemburg ist eine Potenzialabschätzung für den Bereich Energieholz jedoch sehr schwer.

Insbesondere da im Bereich der Energieholznutzung auch die Pelletnutzung mit zu berücksichtigen ist. Über die Produktion von Pellets aus dem heimischen Wald sowie über den Import- und Export von Pellets konnten im Rahmen dieser Analyse keine verlässlichen Angaben ermittelt werden. Bei den durchgeführten Betrachtungen werden jedoch nur Potenziale berücksichtigt, welche innerhalb Luxemburgs selbst zur Verfügung stehen oder erwirtschaftet werden können. Prinzipiell soll erwähnt werden, dass durch den Import von Pellets nach Luxemburg auch bis zum Jahr 2030 sehr große Energieholzpotenziale zur Verfügung stünden. Beispielsweise wird erwartet, dass der Pelletverbrauch in den gesamten Benelux-Staaten auf etwa 5,7 Millionen Tonnen ansteigen wird.

Weiterhin wird der Alt- und Restholzanfall aufgrund der steigenden Bevölkerung sowie verbesserter und erweiterter Sammel- und Verwertungssysteme bzw. -verfahren (vgl. Kapitel **Error! Reference source not found.**) bis zum Jahr 2030 weiter ansteigen. Dadurch kann sich in Luxemburg ein **realisierbares Alt- und Restholzpotenzial** von **540 GWh** für das Jahr 2030 ergeben. Letztendlich wird von den Autoren dieser Studie unter Berücksichtigung aller Unschärfen bei der statistischen Datenlage ein **realisierbares Gesamtpotenzial von Energieholz sowie Alt- und Restholz) von zusammen 1.190 GWh** erwartet. Die exakten Beiträge von Energieholz und Alt- bzw. Restholz hängen jedoch von den entsprechenden Rahmenbedingungen in Luxemburg ab und können je nach Entwicklung mehr oder weniger stark schwanken.

Im Bereich der Landwirtschaft werden bis zum Jahr 2030 keine essentiellen Veränderungen der landwirtschaftlichen Nutz- und Agrarflächen von etwa 61.500 Hektar Ackerflächen in Luxemburg erwartet. Auch der Bestand an Großvieh sowie die Anbaufläche

von Getreide oder der spezifische Ertrag pro Hektar Ackerfläche sollte bis 2030 in etwa auf einem konstanten Niveau verharren. Für das Jahr 2030 wird angenommen, dass gegenüber dem Jahr 2020 eine Gesamtleistung von Anlagen zur thermischen Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe von 45 MW installiert werden kann. Somit ergibt sich unter der Annahme von 7.000 Volllaststunden, die aus der LuxRes-Studie (2007) beibehalten wurde, für das Jahr 2030 ein Gesamtheizwert von **315 GWh**, welcher durch **landwirtschaftliche Reststoffe (thermische Nutzung von Stroh)** erzielt werden kann. Die **thermische Nutzung von Energiepflanzen** (feste Biomasse) wird bis zum Jahr 2030 nur einen überschaubaren Beitrag zum in Luxemburg realisierbaren Potenzial an erneuerbaren Energien beisteuern.

Aufgrund der oben aufgeführten Aspekte wird für die **realisierbaren Potenziale der Energiepflanzen zur thermischen Verwertung** (feste Biomasse) angenommen, dass die für das Jahr 2020 berechneten Potenziale von **274 GWh** auch in der nachfolgenden Dekade bis zum Jahr 2030 als maximale Obergrenze bestehen bleiben (vgl. Tabelle 1).

Bezogen auf den Bereich des **biogenen Müllanfalls** wird angenommen, dass nicht längst alle Gemeinden bis zum Jahr 2030 an die Biomüllabfuhr angeschlossen sind und somit ein gewisser Biomüllanteil im Haushalts- und Gewerberestmüll verbleibt, welcher prinzipiell vermeidbar wäre. Im Jahr 2016 liegt die Anschlussquote in ganz Luxemburg an die Biomüllabfuhr bei ungefähr 44 %.

Der Biomüllanteil im Haushalts- und Gewerberestmüll wird bis zum Jahr 2030 jedoch weiter zurückgehen und dürfte dann auf ganz Luxemburg bezogen bei rund 27 % (2016: 30,42 %) liegen. Aufgrund des zu erwartenden geringeren Biomasseanteils im anfallenden Restmüll der Haushalte wird das **realisierbare Potenzial** des thermisch verwertbaren **biogenen Müllanfalls im Jahr 2030** auf **92 GWh pro Jahr** reduziert.

Der **Klärschlammanfall** in Luxemburg trägt auch zukünftig nur unbedeutend zum realisierbaren Potenzial erneuerbarer Energien bei. Aufgrund des geringen Umfanges des technischen Potenzials von ca. 30 GWh im Jahr 2030 bei einem projizierten **Klärschlammanfall** von gut 10.000 t TS kann auch für dieses Jahr davon ausgegangen werden, dass eine 100%ige thermische Verwertung des anfallenden Klärschlammes prinzipiell möglich wäre. Verantwortlich für den gegenüber 2020 steigenden Anfall von Klärschlamm ist einerseits die wachsende Bevölkerung von Luxemburg und andererseits der Ausbau und die Modernisierung des Kläranlagensystems in Luxemburg. Unter dieser Annahme beträgt das **realisierbare Potenzial im Jahr 2030** bei einem durchschnittlichen Heizwert von 3 kWh pro Kilogramm Klärschlamm (TS) **30 GWh**. Wird dagegen die heutige Aufteilung der Nutzung auf die Kompostierung (47,3 %), die Verbringung in die Landwirtschaft (36,1 %) und die thermische Verwertung (16,6 %) jeweils konstant gelassen, würden nur 5 GWh des Klärschlammes thermisch verwertet.

Tabelle 1: Zusammenfassung der realisierbaren Potenziale im Bereich der festen biogenen Energieträger

	Realisierbares Potenzial in GWh pro Jahr	
	im Jahr 2020	im Jahr 2030
Energieholz	520	650
Alt- und Restholz	478	540
Landwirtschaftliche Reststoffe	280	315
Energiepflanzen	274	274
Biogener Müllanteil	151	92
Klärschlamm	24	30
Summe	1.727	1.901

Quelle: eigene Berechnungen

2.3.2 Flüssige biogene Energieträger

Im Bereich der flüssigen biogenen Energieträger hängt das im Jahr 2030 **realisierbare Potenzial** essentiell an der Frage nach den landwirtschaftlichen Flächen in Luxemburg, die in 2030 tatsächlich zum Anbau von **Energiepflanzen** genutzt werden.

Analog zu den Annahmen für 2020 stehen auch im Jahr 2030 4.050 ha an Ackerfläche zur Erreichung des realisierbaren Potenzials (Anbau von Energiepflanzen für flüssige biogene Energieträger) zur Verfügung. Aufgrund von Akzeptanzfragen, der Energieträgerpreisentwicklungen und Nachhaltigkeits- bzw. Naturschutzaspekten ist aber zu erwarten, dass dies die maximale Obergrenze darstellt. Somit führen die getroffenen Annahmen **in 2030** zu einem maximalen Gesamtertrag von **60 GWh (realisierbares Potenzial)**.

Die **Altspeiseöle und -fette** könnten bis zum Jahr **2030**, wenn die einzige vorhandene Anlage zur Produktion von Biokraftstoffen aus Altspeisefetten ihren Betrieb wieder aufnehmen sollte, zu dem Potenzial erneuerbarer Energien mit **75 GWh (realisierbares Potenzial)** beitragen. Um ein derartiges Potenzial erzielen zu können, wird ein Aufkommen von 8.500 t Altspeiseölen und -fetten (12,4 kg pro Einwohner und Jahr) angenommen, wobei Altspeiseölmethylester (AME) einen Heizwert von 37,2 MJ/kg aufweist. Insgesamt wird der Bereich der Altspeiseöle und -fette auch zukünftig nur mit einem äußerst überschaubaren Potenzial zum Gesamtpotenzial der erneuerbaren Energien beitragen können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Bereich der **flüssigen biogenen Energieträger** im Jahr **2030** insgesamt ein maximal **realisierbares Potenzial** von

135 GWh erreichen wird (vgl. Tabelle 2). Je nach den entsprechenden Rahmenbedingungen in Luxemburg kann die Ausschöpfung jedoch mehr oder weniger deutlich unterhalb dieses Potenziales liegen.

Tabelle 2: Zusammenfassung der realisierbaren Potenziale im Bereich der flüssigen biogenen Energieträger

	Realisierbares Potenzial in GWh pro Jahr	
	im Jahr 2020	im Jahr 2030
Energiepflanzen	60	< 60
Altspeiseöle und -fette	28	77
Summe	88	< 135

Quelle: eigene Berechnungen

2.3.3 Gasförmige biogene Energieträger

Die Anzahl der Biogasanlagen in Luxemburg lag im Jahr 2013 konstant bei 26. Wie viele weitere zusätzliche Biogasanlagen bis 2030 tatsächlich in Luxemburg gebaut werden, ist äußerst schwer vorherzusagen und essentiell von den zwischen 2020 und 2030 vorgegebenen Rahmenbedingungen (z.B. Entwicklung der fossilen Energiepreise, Preise für Mais, Entwicklung der Einspeisevergütung, exakte Definition von neuen bzw. überholten Biogasanlagen, Ausbau der erneuerbaren Energien insgesamt, Aspekte des Naturschutzes und des Erhalts der Biodiversität, etc.) abhängig, zumal der Betrieb von Biogasanlagen in der Vergangenheit nach Auskünften der Biogas Vereinigung häufig nicht lukrativ war. Weiterhin zu bedenken ist, dass für die ersten Biogasanlagen in naher Zukunft die staatlich garantierte Einspeisevergütung für Strom ausläuft (Biogas Vereinigung 2016).

Aufgrund der prinzipiell eher widrigen Rahmenbedingungen wird in der Periode 2020 bis 2030 mit einem maximalen weiteren Zubau von nur vier neuen Biogasanlagen pro Jahr ausgegangen. Im Jahr 2030 wären dann maximal insgesamt 86 Biogasanlagen in Betrieb. Das brennstoffseitige Potenzial für diese Biogasanlagen wird im Folgenden dargestellt:

Es wird angenommen, dass sich das **realisierbare Potenzial der Biogaserzeugung aus Grünschnitt von Grünland und Landschaftspflegeholz** bis zum Jahr 2030 mit **knapp 77 GWh pro Jahr** trotz einer ausgeweiteten und optimierten Sammelinfrastruktur und einer relativ identischen Fläche auf annähernd konstantem Niveau gegenüber 2020 verharret. Gründe hierfür liegen u.a. in weiter gesteigerten Naturschutzbemühungen (Reduktion der Mähzyklen, etc.) und konkurrierenden Nutzungsformen für den anfallenden Grünschnitt, wie z.B. Kompostierung oder die thermische Nutzung.

Insbesondere der projizierte Anstieg der Bevölkerung in Luxemburg und der Ausbau bzw. die Optimierung des Sammelsystems für biogenen Müll führen dazu, dass auch

das realisierbare Potenzial zur **Biogaserzeugung aus Bioabfällen** von 36 GWh in 2020 auf ca. 50 GWh bis zum Jahr 2030 ansteigt.

In LuxRes (2007) und ISI/IREES (2016) wird angenommen, dass bis zum Jahr 2020 eine Biogasanlage zur Verwertung von Schlachtabfällen errichtet wird. Diese Anlage würde ihren Betrieb auch bis 2030 weiter fortführen. Daher beläuft sich das **realisierbare Potenzial der Schlachtabfälle im Jahr 2030** weiterhin auf **2 GWh** pro Jahr. Verantwortlich für das konstante Potenzialniveau ist trotz wachsender Bevölkerung in Luxemburg der angenommene stagnierende Fleischkonsum (steigender Anteil an Vegetariern bzw. Veganern innerhalb der Bevölkerung).

Für die Biogaserzeugung mittels Gülle werden die getroffenen Annahmen von 2020 bis 2030 fortgeschrieben. So ist davon auszugehen, dass sich der Großviehbestand (Rinder, Pferde, Schweine, Schafe) bis zum Jahr 2030 im Gegensatz zu heute (Bestand in 2012: rund 292.000 Stück Großvieh) nicht dramatisch verändern wird.

Aktuell erzeugt dieser Großviehbestand einen jährliche Gülle- und Mistanfall von etwa 2,7 Millionen Tonnen, welcher u.a. zur Erzeugung von Biogas genutzt werden kann. So wurden in der Periode 2009-2011 etwa 10 % der anfallenden Gülle energetisch genutzt. Es wird angenommen, dass dieser Anteil aufgrund des gewährten Gülle-Bonus mittelfristig ansteigen wird. Außerdem erfolgt in der Periode 2020 bis 2030 in Luxemburg insgesamt betrachtet ein Zubau von 40 neuen Biogasanlagen (vier Biogasanlagen pro Jahr). Aufgrund der Preisdegression bei konkurrierenden Nutzungsformen der erneuerbaren Energien (z.B. PV) und der im Gegensatz dazu völlig unklaren Preisentwicklung beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen wurde dieser Zubau im Vergleich zu LuxRes (2007) um eine Biogasanlage pro Jahr reduziert. Durch die getroffenen Annahmen ergibt sich im Jahr 2030 ein gegenüber LuxRes (2007) und ISI/IREES (2016) dennoch ein nur leicht gesteigertes **realisierbares Potenzial** durch die **Vergasung von Gülle** von **112 GWh pro Jahr**.

Desweiteren ergibt sich ein gewisses **Potenzial durch den Anbau von Energiepflanzen**. Es werden dabei die Annahme von LuxRes (2007) beibehalten, dass prinzipiell nach einem gewissen Abzug (Naturschutz, Anteil Wiesenflächen, etc.) rund 9,5 % (4.050 ha) von der theoretisch verfügbaren Fläche zum Anbau von Energiepflanzen (42.690 ha) zur Produktion von Biogas auch im Jahr 2030 weiter zur Verfügung stehen. Ein essentieller Faktor zur Einschränkung des Potenziales aus Energiepflanzen in der Praxis wird auch bis 2030 neben den generellen Rahmenbedingungen für den Betrieb von Biogasanlagen in Luxemburg (gesetzliche Vorgaben, Konkurrenznutzung der Flächen durch andere erneuerbare Energien, Preisdegression bei PV-Anlagen, etc.) die tatsächlich mit Energiepflanzen bebaute landwirtschaftliche Fläche bleiben. Hier werden die Diskussionen bezüglich der Flächenkonkurrenz des Anbaus von Nahrungsmitteln und des Anbaus von Energiepflanzen zur Erzeugung von Biogas oder bezüglich gestiegener Aspekte des Naturschutzes und der Erhaltung der Biodiversität weiter anhalten.

Da die zukünftige Entwicklung bei den Biogasanlagen bis zum **Jahr 2030** äußerst schwer vorhersehbar ist, wird mit einem **realisierbaren Potenzial** durch die **Biogaserzeugung aus Energiepflanzen** von **100 GWh** gerechnet.

Das **Potenzial für Klär- und Deponiegas** in Luxemburg für das Jahr **2030** wird auf **47 GWh** berechnet. Für die Periode von 2020 bis 2030 wurde nochmals aufgrund der Sanierungsbedürftigkeit der Luxemburger Kläranlagen (WKO 2016) und der steigenden

Bevölkerung in Luxemburg ein Ausbau der Kläranlagen um 208.500 EWG angenommen; dadurch erhöht sich bis **2030** das **Potenzial bei der Klärgasnutzung** um weitere **9 GWh** gegenüber dem Jahr 2020.

Das **gesamte realisierbare Potenzial der gasförmigen biogenen Energieträger** beläuft sich somit im Jahr **2030** insgesamt auf **388 GWh** pro Jahr (vgl.

Tabelle 3).

Es wird angenommen, dass die **Methan-Rückgewinnung auf Deponien** in Luxemburg bis 2030 im Bereich von 0,3 bis 0,5 Tonnen liegen wird und somit absolut betrachtet nur einen äußerst unbedeutenden Beitrag zum Potenzial der erneuerbaren Energien in Luxemburg beiträgt.

Tabelle 3: Zusammenfassung der realisierbaren Potenziale im Bereich der gasförmigen biogenen Energieträger

	Realisierbares Potenzial in GWh pro Jahr	
	im Jahr 2020	im Jahr 2030
Grünschnitt von Grünland und Landschaftspflegeholz	81	77
Bioabfall	36	50
Schlachtabfälle	2	2
Gülle	60	112
Energiepflanzen	55	100
Klär- und Deponiegas	38	47
Summe	272	388

Quelle: eigene Berechnungen

3 Kurzbetrachtung der Potenziale für die sonstigen erneuerbaren Energien

Die Potenziale der Wärmeerzeugung mittels Solarthermie, Erdwärmennutzung („tiefe Geothermie“) und Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpen ("oberflächennahe" Geothermie und Luft-Wasser-Wärmepumpen) sowie der Stromerzeugung durch "kleine" Wasserkraftwerke wurden im Zuge der Aktualisierung der Potenzialstudie (ISI/IREES 2016) nur einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. (Für die Solarthermie waren dabei für die Ableitung von energiepolitischen Schlüssen unerhebliche Korrekturen des theoretischen und des technischen Potenzials bis 2020 vorgenommen worden). Dementsprechend wird auch der Ausblick auf das Jahr 2030 hier nur kurz abgehandelt.

3.1 Solarthermie

Ende 2015 waren in Luxemburg 54.609 m² Kollektorfläche installiert (EurObserv'ER 2016c). Der in der aktualisierten Potenzialstudie (ISI/IREES 2016) als realisierbar erachtete jährliche Zuwachs von 20 % hätte rechnerisch lediglich zu etwa 1.800 m² Kollektorfläche mehr geführt. Das realisierbare Potenzial wurde also 2014 und 2015 zusammen nahezu ausgeschöpft, was optimistische Erwartungen bzgl. des Beitrags der Solarthermie für die Wärmeversorgung des Landes durchaus rechtfertigt. Ausgehend von diesem nur geringfügig reduzierten Ausgangsniveau für das Jahr 2015 (Ist-Wert anstatt des realisierbaren Potenzials) verringert sich unter Beibehaltung der Annahmen für den realisierbaren jährlichen Zubau das realisierbare Potenzial 2020 ebenfalls geringfügig auf eine Kollektorfläche von knapp 136.000 m² (anstatt ca. 140.000 m²; Niveauverschiebung).

Künftig könnte sich aus der Entwicklung von Wärmespeichersystemen, auch zusammen mit dem Ausbau von Nahwärmeversorgungen, sowie durch innovative gewerbliche Anwendungen (Bürogebäude, solare Prozesswärme) ein zunehmendes Potenzial für die Solarthermie ergeben. Die für den Zeitraum bis 2020 angenommene exponentielle Zunahme des realisierbaren Potenzials – sie entspricht einem Zubau um knapp 22.650 m² im letzten Jahr des betrachteten Zeitraums - wird sich auf Dauer dennoch nicht realisieren lassen. Unterstellt man daher ab 2020 eine nurmehr lineare Entwicklung und behält den zuletzt erreichten Zubau von knapp 22.650 m²/a Kollektorfläche bis zum Ende der Dekade bei, ergibt sich für das Jahr 2030 eine kumulierte Kollektorfläche von etwas über 362.000 m² und ein rechnerischer Nutzwärmeertrag von 127 GWh. Dieser liegt um etwa 1/3 über der ambitionierten Schätzung für das Jahr 2020 von 96 GWh aus der LuxRes Studie von 2007. Es sei jedoch deutlich hervorgehoben, dass dies nur ein auf Basis von Plausibilitätsbetrachtungen ermittelter grober Anhaltswert ist.

3.2 "Tiefe" Geothermie

Die Potenziale der "tiefen" Geothermie, also der Nutzung von Erdwärme aus tiefen geothermischen Lagerstätten, wurden wegen fehlender Datenbasis für Luxemburg in der LuxRes-Studie von 2007 (ISI/EEG/BSR 2007) mit Null angegeben.

Eine kürzlich abgeschlossene Dissertation an der Universität Potsdam hatte die Geothermie-Potenziale in Luxemburg zum Thema (Schintgen 2016a). Der Autor verweist

auf das Fehlen von Tiefbohrungen (tiefer als 750 m) im Lande und umging dieses Problem durch thermische Modellierung und Labormessungen der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine als Mittel zur Bestimmung der tiefen geothermischen Ressourcen. Zusammenfassend wurden zwei verschiedene geothermische Reservoirs identifiziert: (1) die des Buntsandsteins in etwa 400 bis 1.100 m Tiefe mit Temperaturen über 20°C in weiten Teilen des Gutlandes und bis über 40 °C im südlichen Teil der Oberen Alzette, und (2) die des Unteren Devons in Tiefen von etwa 3,5 bis 6 km. Die Modelltemperaturen liegen in der Mitte des Landes in einer SW-NO ausgerichteten Zone im Bereich von 120-150 °C in 5 km Tiefe. Die 30-40 °C warmen Thermalwässer im Buntsandstein bieten sich zur Nutzung in Nah- und Fernwärmenetzen unter Verwendung von leistungsstarken Wärmepumpen an. Im tieferen Untergrund besteht neben der direkten thermischen Nutzung perspektivisch die Möglichkeit die Temperaturen von 120 °C in 5 km Tiefe bei Verbesserung der Permeabilität durch EGS (Enhanced Geothermal Systems, hydraulische oder chemische Stimulation) für die kombinierte Wärmebereitstellung und Stromproduktion (KWK) in Luxemburg und im angrenzenden westlichen Bereich der Eifel zu nutzen.

Die hohen Bohrkosten bei 5 km Bohrtiefe und der mäßige Stromerzeugungswirkungsgrad bei 120 °C schränken die Wirtschaftlichkeit einer reinen geothermischen Stromerzeugung ohne KWK erheblich ein. Hingegen prüft der Fonds de Logement in Dudelange derzeit thermische Nutzungsoptionen der hydrothermalen Wässer im Buntsandstein für die Raumwärmeerzeugung (Schintgen 2016b).

Wegen nach wie vor fehlender Ergebnisse einer fachgerechten geothermischen Erkundung mittels Geophysik und Tiefbohrungen für Luxemburg ist ein Potenzial der Tiefengeothermie zwar zu vermuten, derzeit aber noch nicht zu quantifizieren. Dies gilt sowohl für den Zeithorizont 2020 als auch für die darauf folgende Dekade.

3.3 Wärmepumpen

Als Fazit der in der Aktualisierung vorgenommenen Plausibilitätsbetrachtungen ergab sich eine Bestätigung des Werts von ca. 180 GWh/a als realisierbares Potenzial für den Ertrag aus Umweltwärme im Jahr 2020 (ISI/IREES 2016). Wie dort deutlich hervorgehoben, handelt es sich hierbei jedoch nur um grobe Schätzungen und der Beitrag der unterschiedlichen Systeme (Luft/Wasser, Erdreich/Wasser) lässt sich nicht verlässlich angeben. Das ausgewiesene realisierbare Potenzial entfällt zu etwa gleichen Anteilen auf Neubauten, insbesondere Einfamilienhäuser, und den Gebäudebestand.

Die Abschätzung des realisierbaren Zuwachses von Anlagen in Neubauten bis zum Jahr 2030 baut auf der aus der LuxRes-Studie beibehaltenen Annahme auf, dass bis 2020 bereits 7.500 Anlagen realisierbar sind (vgl. ISI/IREES 2016). In der LuxRes-Studie waren jedoch keine expliziten Annahmen zur Zahl der errichteten Neubauten getroffen worden. Bei angenommenem konstantem Verhältnis zwischen Bevölkerungszunahme und Neubau von Einfamilienhäusern wurde daher behelfsweise anstatt mit einem rechnerischen Ausstattungsgrad von neuen Einfamilienhäusern mit einer Pro-Kopf-Zahl von Wärmepumpen gerechnet.

Es wird erwartet, dass die Bevölkerung Luxemburgs von 576.200 Einwohnern im Jahr 2015 (Le Portail des Statistiques 2016) kontinuierlich auf etwa 610.000 Einwohner im Jahr 2020 (+ 5,9 % bzw. + 1,15 % pro Jahr) bzw. knapp 685.000 Einwohner im Jahr 2030

(+ 12,3 % bzw. + 1,3 % pro Jahr) anwachsen wird. Bei unveränderter Pro-Kopf-Zahl von Wärmepumpen in Einfamilienhaus-Neubauten erhöht sich die Anlagenzahl von 7.500 im Jahr 2020 damit auf knapp 10.400 in 2030.

Waren im Altbaubestand des Jahres 2010 erst sehr wenige Anlagen installiert, liegt die Schätzung für das in diesem Bereich realisierbare Teilpotenzial 2020 bei 3.500 Anlagen (vgl. ISI/IREES 2016). Unterstellt man für den Bereich der mit Wärmepumpen nachgerüsteten Altbauten eine Fortsetzung des Trends der Jahre 2010 bis 2020, ergibt sich eine Anzahl von rund 7.000 Wärmepumpensystemen im (Altbau-) Gebäudebestand für das Jahr 2030.

Mit ansonsten unveränderten Annahmen zum spezifischen Wärmebedarf der Gebäude und zu deren Grundfläche sowie zum Wärmeertrag von Wärmepumpen errechnet sich ein realisierbares Potenzial von knapp 310 GWh/a Wärme in 2030. Anteilig erlangten Wärmepumpen in Bestandsbauten eine etwas höhere Bedeutung als in Neubauten.

3.4 "Kleine" Wasserkraft

Das in der Aktualisierung (ISI/IREES 2016) genannte, weitgehend dem technischen entsprechende, realisierbare Potenzial der Stromerzeugung aus „kleiner“ Wasserkraft von 137 GWh/a im Jahr 2020 wird vom Luxemburgischen Wasserwirtschaftsamt (Administration de la gestion de l'eau; Ministère du Développement durable et des Infrastructures (2016) als zu hoch betrachtet, da die meisten bestehenden Wehre keine Fischdurchgängigkeit garantieren und nach aktuell gültigem Wasserrecht nicht mehr zulässig seien. Auch das Projekt eines neuen Wasserkraftwerkes an der Sauer sei hiermit nicht vereinbar. natur&mwelt (2016) sieht die Relevanz der „kleinen Wasserkraft“ in Luxemburg auch künftig immer als klein an und verweist ebenfalls auf die Restriktionen für einen Ausbau aus Naturschutzgründen (Wanderhindernisse für Fische; Durchgängigkeit der Gewässer als Ziel der Wasserrahmenrichtlinie).

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 aber nach wie vor als realisierbar und wurde folglich als Teil des realisierbaren Potenzials mit einer elektrischen Leistung von 5.000 kW berücksichtigt.

Aufgrund der erwähnten naturschutzbedingten Restriktionen ist jedoch bis 2030 mit keinem realisierbaren Zusatzpotenzial in nennenswerter Höhe zu rechnen, so dass das realisierbare Potenzial auch für 2030 mit 137 GWh/a angegeben wird.

4 Zusammenfassung

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse der überprüften und aktualisierten Potenzialschätzungen bis 2020 (vgl. ISI/IREES 2016) sowie des Ausblicks auf 2030 zusammen. Bezüglich der **realisierbaren Potenziale für 2030**, die für energiepolitische Fragestellungen die größte Relevanz haben, ergibt sich folgendes:

Regenerative Stromerzeugung

- Es erscheint eine Steigerung der Anlagenkapazität zur Nutzung der **Windenergie** gegenüber 2015 um mehr als den Faktor sechs realisierbar. Zahlreiche Anlagen sind bereits mittelfristig projektiert. Restriktionen ergeben sich aus Naturschutzgründen und der Leistungsfähigkeit des 65 kV-Netzes, insbesondere im Norden des Landes, die Ertüchtigungen auf der Hochspannungsebene erforderlich machen.
- Auch bei der **Photovoltaik** sind erhebliche Steigerungen der Anlagenkapazität realisierbar; bei Realisierung vermutlich getragen durch erhebliche Anteile von Freiflächenanlagen. Die installierte Leistung könnte bis zum Ende des Betrachtungshorizontes (2030) der heutigen Netzhöchstlast in Luxemburg entsprechen. Ertüchtigungen des Niederspannungsnetzes dürften lokal erforderlich werden.
- Aus Naturschutzgründen ist keine nennenswerte weitere Steigerung des im Vergleich zu Photovoltaik und Wind deutlich geringeren realisierbaren Potenzials **kleiner Wasserkraftanlagen** abzusehen.
- Wegen fehlender Tiefbohrungen lässt sich das Potenzial der geothermischen Stromerzeugung („tiefe“ **Geothermie**) nach wie vor nicht quantifizieren; es liegen lediglich modellgestützte Vermutungen vor. Große Bohrtiefen und mäßige Temperaturen der wasserführenden Schichten wären vermutlich ein Hemmnis.

Regenerative Wärmeerzeugung

- Die Anzahl **solarthermischer Anlagen** stieg in Luxemburg in den vergangenen Jahren enorm. Dies könnte sich aufgrund der Neubautätigkeit sowie des Beitrags innovativer Anwendungen im Sektor Wohnbau und im Gewerbe fortsetzen. Das bis 2020 als realisierbar gesehene exponentielle Wachstum wird voraussichtlich in der Dekade bis 2030 in ein lineares Wachstum übergehen.
 - Aufgrund des erwarteten enormen Bevölkerungswachstums und damit einhergehender Neubauaktivität ist auch nach 2020 eine starke Zunahme der Anzahl von **Wärmepumpensystemen** realisierbar. Zusammen mit der Nachrüstung im Altbaubestand wird das realisierbare Potenzial dieser Technik, die erst seit etwa 10 Jahren relevante Marktanteile erlangte, im Jahr 2030 um gut 70 % höher eingeschätzt als 2020.
 - Die Nutzung der „tiefen“ **Geothermie** zur Raumwärmebereitstellung wird derzeit in Dudelage geprüft. Eine Schätzung des realisierbaren Potenzials bis 2030 ist vorerst noch nicht möglich.
 - **Feste biogene Energieträger:** Bei der Nutzung von Energieholz und Alt- und Restholz kommt es bis zum Jahr 2030 zu einem Anstieg des realisierbaren Potenziales von gut 19 %. Ein Anstieg um 12,5 % kommt im Bereich der landwirtschaftlichen Reststoffe zum Tragen. Im Gegensatz dazu stagniert die thermische Nutzung von Energiepflanzen in der gesamten Periode von 2020 bis 2030 auf konstantem Niveau. Ein deutlicher Rückgang des realisierbaren Potenzials der thermischen Nutzung ist
-

beim biogenen Müllanfall zu beobachten, da dieser Anteil im Restmüllaufkommen sinkt.

- **Flüssige biogene Energieträger:** Die Optimierung des Sammelsystems für Altöle und –fette und die Wiederaufnahme der Aufbereitung und Verarbeitung dieser Energieträger bietet nur ein sehr begrenztes Steigerungspotenzial. Die Nutzung von Energiepflanzen zur Erzeugung von flüssigen Kraftstoffen verharrt beim realisierbaren Potenzial auf konstantem Niveau oder sinkt aufgrund gesteigerter Naturschutzaspekte und von Akzeptanzproblemen mehr oder weniger stark unter das Niveau von 2020.
 - **Gasförmige biogene Energieträger:** Der größte Teil des Anstieges des realisierbaren Potenziales liegt in einer verstärkten Güllenutzung und einer ausgebauten Biogaserzeugung aus Energiepflanzen.
-

Tabelle 4: Potenziale Erneuerbarer Energien in GWh/a; Vergleich der Schätzungen von 2007 mit den aktualisierten Schätzungen für 2020 und Fortschreibung bis 2030

Endenergieform		Schätzung 2007		Status quo 2013	aktualisierte Schätzung 2015		erweiterte Schätzung 2016	Kommentar zur Aktualisierung für das realisierbare Potenzial in 2020 und zur Fortschreibung bis 2030
		theoretisches Potenzial	realisierbares Potenzial, ggf. mit Bandbreite in 2020		theoretisches Potenzial	realisierbares Potenzial in 2020	realisierbares Potenzial in 2030	
		technisches Potenzial			technisches Potenzial			
feste biogene Energieträger gesamt	Heizwert	7.051	1.713	546	7.105	1.726	1.901	weitgehend gleichbleibende Einschätzung. Bis 2030 steigt das Potenzial um etwa 10 % durch eine bessere Nutzung von Energie- und Alt- bzw. Restholz an.
		4.872			4.980			
flüssige biogene Energieträger gesamt	Heizwert	660	88	0	660	88	< 135	weitgehend gleichbleibende Einschätzung, allenfalls leicht sinkender Trend bei Energiepflanzen. Aufgrund eines optimierten Sammel- und Verwertungssystems von Altölen und -fetten könnte es bis 2030 eventuell zu einer Potenzialanhebung kommen.
		326			326			
gasförmige biogene Energieträger gesamt	Heizwert	2.351	369	188	2.351	272	388	weitgehend gleichbleibende Einschätzung, allenfalls leicht sinkender Trend bei Energiepflanzen. Bis 2030 steigt das realisierbare Potenzial wieder um etwa 43 % an. Der größte Teil des Anstieges liegt in einer verstärkten Güllenutzung und einer ausgebauten Biogasproduktion aus Energiepflanzen.
		1.281			1.281			

Endenergie -form		Schätzung 2007		Status Quo 2013	aktualisierte Schätzung 2015		erweiterte Schätzung 2016 realisierba- res Potenzial in 2030	Kommentar zur Aktualisierung für das realisierbare Potenzial in 2020 und zur Fortschreibung bis 2030
		theoretisches Potenzial	realisierbares Potenzial, ggf. mit Bandbreite in 2020		theoretisches Potenzial	realisierbares Potenzial in 2020		
		technisches Potenzial			technisches Potenzial			
„tiefe“ Geother- mie	Wärme (Strom)	nicht quantifiziert	nicht quantifiziert	0	nicht quantifi- ziert	nicht quantifiziert	nicht quantifiziert	nach wie vor fehlende Explora- tionsergebnisse
		nicht quantifiziert			nicht quantifi- ziert			
Kleinwasserkraft	Strom	175	137	3	175	137	137	Naturschutzrestriktionen be- rücksichtigt
		140			140			
Photovoltaik	Strom	33.167	59 176	73	33.167	246	670	Systempreise seit 2007 stark gesunken; Annahme höherer Gebäudezahl wegen Bevölke- rungswachstum; Zunehmende Bedeutung von Freiflächenan- lagen
		7.607			7.876			
Solarthermie	Wärme	74.200	31 96	14	116.600	49	127	Annahme höherer Gebäude- zahl wegen Bevölkerungs- wachstum; innovative Anwen- dungen auch in gewerblichen Gebäuden
		9.738			14.579			
Wärmepumpen	Wärme	61.743	181	24	62.500	181	310	Randbedingungen weitgehend unverändert; Potenzialschät- zung beibehalten; starker Zu- wachs durch Neubautätigkeit wegen Bevölkerungswachstum und Nachrüstung von Altbau- ten
		1.516			1.516			

Endenergie -form		Schätzung 2007		Status Quo 2013	aktualisierte Schätzung 2015		erweiterte Schätzung 2016	Kommentar zur Aktualisierung für das realisierbare Potenzial in 2020 und zur Fortschreibung bis 2030
		theoretisches Potenzial	realisierbares Potenzial, ggf. mit Bandbreite in 2020		realisierbares Potenzial in 2030	realisierbares Potenzial in 2020	Realisier-ba- res Potenzial in 2030	
		technisches Potenzial						
Windkraft	Strom	20.584	237	81	20.584	399	845	konkrete Mittelfristplanungen liegen vor; wegen technischer Entwicklung höhere Anlagen- leistungen und Volllaststunden angenommen; Netzrestriktion- en berücksichtigt
		5.146			5.718			
Summe (maximal) realisierbares Potenzial bis 2020 - Strom			433 - 550		782	1.652		
Summe (maximal) realisierbares Potenzial bis 2020 – Biomasse und Wärme			2.287 – 2.352		2.305	2.861		

Quelle: IREES/ISI 2016

5 Literatur

- Biogas Vereenegung A.s.b.l. (2016):** Avis sur l'actualisation de l'étude de potentiel sur les sources d'énergies renouvelables, Canach, le 09. Février 2016
- Creos Luxembourg S.A. (2013):** Etude Réseau Haute Tension 2013 – 2035. Projection des besoins en énergie électrique et Analyse de l'infrastructure réseau nécessaire. Avril – septembre 2013
- Dale, Phillip and Siebentritt, Susanne (2016):** Can photovoltaics power Luxembourg? University of Luxembourg, March 2016
- EurObserv'ER (2016a):** Wind Energy Barometer, Februar 2016. Online verfügbar unter: <http://www.eurobserv-er.org/wind-energy-barometer-2016/>
- EurObserv'ER (2016b):** Photovoltaic Barometer, April 2016. Online verfügbar unter: <http://www.eurobserv-er.org/photovoltaic-barometer-2016/>
- EurObserv'ER (2016c):** Solar Thermal Barometer, Mai 2016. Online verfügbar unter: <http://www.eurobserv-er.org/category/all-solar-thermal-and-concentrated-solar-power-barometers/>
- ISI/EEG/BSR (2007):** Bestimmung der Potenziale und Ausarbeitungen von Strategien zur verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien in Luxemburg ("LuxRes 2007"). Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Energy Economics Group TU Wien (EEG), BSR Sustainability, Karlsruhe
- ISI/IREES (2016):** Wissenschaftliche Beratung zu Fragen der Energiestrategie Luxemburgs mit besonderem Fokus auf Erneuerbare Energien. Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Karlsruhe 2016
- Le Portail des Statistiques (2016):** Population totale, luxembourgeoise et étrangère, de résidence habituelle au Luxembourg selon le sexe 1821 – 2015. Online verfügbar unter: http://www.statistiques.public.lu/stat/TableView/tableViewHTML.aspx?ReportId=12856&IF_Language=fra&MainTheme=2&FldrName=1
- Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie,** persönliche Mitteilungen Oktober 2014 und Februar 2015
- Ministère de l'Économie / Direction générale de l'Énergie (2016),** persönliche Mitteilung August 2016
- Ministère du Développement durables et des Infrastructures (2016):** Stellungnahme zu der Studie „Wissenschaftliche Beratung zu Fragen der Energiestrategie Luxemburgs mit besonderem Fokus auf Erneuerbare Energien – Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energie“, Administration de la gestion de l'eau, Esch-sur-Alzette, 04. Februar 2016
- natur&ëmwelt a.s.b.l (2016):** Stellungnahme zur Aktualisierung der Potenzialanalyse für Erneuerbare Energie in Luxemburg, Kockelscheuer, 17. März 2016
- Schintgen, Tom (2016a):** The Geothermal Potential of Luxembourg: Geological and thermal exploration for deep geothermal reservoirs in Luxembourg and the surroundings. Dissertation an der Universität Potsdam, Veröffentlichungsdatum 04.03.2016
-

Schintgen, Tom (2016 b): Persönliche Mitteilung Dr. Tom Schintgen, European Institute for Energy Research (EIFER), Karlsruhe, August 2016

WKO (2016): Luxemburgs Kläranlagen müssen dringend modernisiert werden. 8.06.2016.
Online verfügbar unter: <https://www.wko.at/Content.Node/service/aussenwirtschaft/gc/Luxemburgs-Klaeranlagen-muessen-dringend-modernisiert-wer.html>
