

Erneuerbare Energien

Wie erneuerbar ist Luxemburg?



Mémoire individuel rédigé par
David Klaassen, 2B

Directeur de mémoire
M. Drews

Bourglinster, avril 2019

Jury: M. Goedert; M. Schleicher



Lycée
Ermesinde

Authentizitätserklärung

*« Je déclare sur l'honneur que ce mémoire a été écrit de ma main, sans aide
extérieure non autorisée. »*

David Klaassen

Mémoire soutenu et accepté le __/__/__

Umschlagtext

In der vorigen Legislaturperiode wurde die Zahl der Windkraftanlagen verdreifacht, die der Solaranlagen verdoppelt. Die erneuerbaren Energien scheinen (endlich) auch in Luxemburg angekommen zu sein. Doch liefern diese eine nennenswerte Rolle? Schneiden wir besser als unsere Nachbarn ab? Wie funktionieren Solar- und Windkraft? Welche Entwicklungen gibt es aktuell bei der grünen Stromproduktion, ist Luxemburg daran beteiligt? Das Thema erneuerbare Energien in Luxemburg wirft viele interessante Fragen auf. In dieser Arbeit finden Sie eine Antwort auf diese Fragen und es werden auch die neuesten Pläne für die Zukunft Luxemburgs analysiert. Besondere Aufmerksamkeit wird der erneuerbaren Stromproduktion gewidmet. Um dann schlussendlich die Frage beantworten zu können: Wie erneuerbar ist Luxemburg nun wirklich?

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Energiemix in Luxemburg.....	7
2.1	Woraus besteht der Energiemix.....	7
2.2	Energiezufuhr	8
2.3	Energiezufuhr versus Endverbrauch	9
2.4	Energieimporte.....	12
3	Stromproduktion in Luxemburg	13
3.1	Wasserkraft	15
3.1.1	Laufwasserkraftwerk	15
	Modernes Laufwasserkraftwerk	15
	Funktion eines modernes Laufwasserkraftwerk	16
	Mühlenstrom.....	18
3.1.2	Pumpspeicherkraftwerk.....	19
	Geschichte der Pumpspeichertechnik.....	20
	Funktionsprinzip eines Pumpspeicherkraftwerkes	23
	Die Schlüsselrolle des Pumpspeicherkraftwerks in der Erneuerbare Energie	25
3.2	Windkraft	27
3.2.1	Widerstandsläufer.....	28
3.2.2	Auftriebsläufer	29
	Darrieus-Rotoren.....	30
	Varianten	31
	Nachteile der Darrieus-Rotoren	33
	Windkraftanlage mit horizontaler Achse	34
	Schnellaufzahl.....	34
	Die kinetische Leistung.....	34
	Die theoretische maximale Leistung (Formel von Betz)	35
	Größe der Windräder	36
	Anzahl der Rotorblätter.....	37
3.2.3	Nachteile von Windenergie.....	37
3.2.4	Kritik	38
	Gesundheitliche Schäden	38

Eine Gefahr für die Natur	38
Zerstört das Landschaftsbild	39
3.2.5 Windenergie in Luxemburg	40
3.3 Sonnenenergie	41
3.3.1 Funktionsprinzip der photovoltaischen Zelle	43
3.3.2 Bisherige Entwicklung	45
3.3.3 Zukunft	46
3.3.4 Kritik an Sonnenenergie	48
4 Zukunftspläne für Luxemburg	49
4.1 Das Referenzszenario	50
4.2 Das Zielszenario	52
5 Diskussion	56
6 Schlussfolgerung	59
7 Abbildungsverzeichnis	60
8 Quellen	63

1 Einleitung

Am 12. Dezember 2015 wurde in Paris durch 196 Mitgliedstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC), darunter Luxemburg, das „Übereinkommen von Paris“ unterschrieben. Inzwischen haben alle Staaten der Erde den Vertrag unterschrieben, die Vereinigten Staaten haben jedoch angekündigt, 2020 aus dem Vertrag auszutreten.

Mit dem Übereinkommen wurde erstmals juristisch festgelegt, dass die Erderwärmung auf maximal 2°C seit der Industriellen Revolution begrenzt werden soll. Die Staaten sollen alle ein nationaler Klimaschutzplan festlegen, mit Zwischenzielen, die überprüft werden. Reiche Länder sollen Entwicklungsländer finanziell unterstützen. Kritisiert wird, dass für Länder, die ihre Ziele nicht erreichen keine Strafmaßnahmen vorgesehen sind (Mihm, 2017).

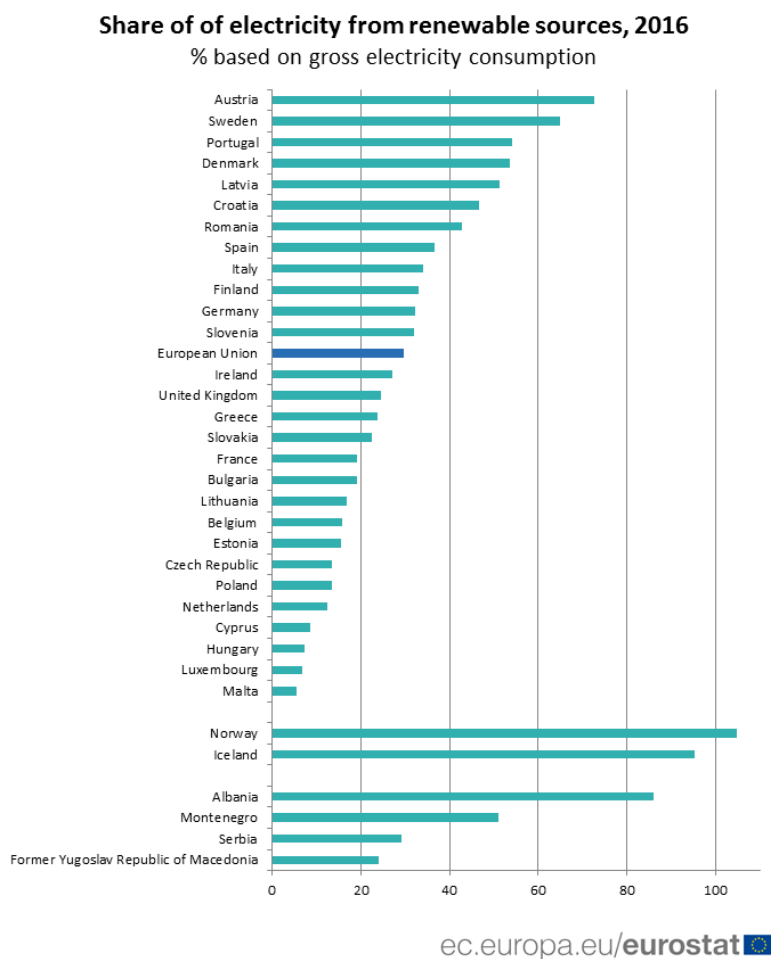


Abbildung 1 Luxemburg hat der zweitkleinste Anteil erneuerbare Elektrizität (Eurostat, 2016)

Eine Publikation ergibt, dass Luxemburg das Land der EU ist, das den zweitkleinsten Anteil von Elektrizität von erneuerbaren Quellen hat (Eurostat, 2018)(Daten von 2016). Demnach hätte Luxemburg noch viel Nachholbedarf. Schaut man sich an welchem Anteil von der gesamten Energie von erneuerbaren Quellen stammt, ist die Lage nur noch schlimmer. Hier steht Luxemburg letzter.

Schneidet Luxemburg wir wirklich so schlecht ab? Wie könnten wir uns verbessern? Diese Fragen versuche ich in dieser Arbeit zu beantworten.

2 Energiemix in Luxemburg

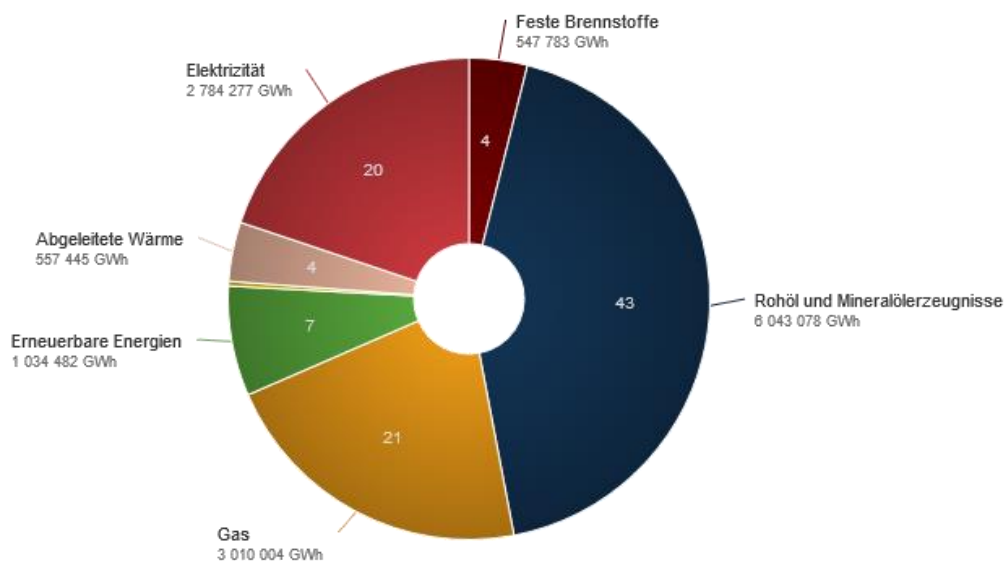
Und Vergleich mit den Nachbarländern

2.1 Woraus besteht der Energiemix

Als Energiemix wird die „aus unterschiedlichen Energiequellen bestehende Gesamtheit der Versorgung mit Energie¹“ bezeichnet. Die wichtigsten Bestandteile des Gesamtverbrauchs sind momentan in der Europäischen Union Rohöl und Mineralölerzeugnisse (43%), Gas (21%), Nicht-Erneuerbare-Elektrizität (20%), Erneuerbare Energien (7%), feste Brennstoffe (4%) und abgeleitete Wärme (4%). Unter Rohöl und Mineralölerzeugnisse versteht man normalerweise flüssige fossile Brennstoffe, das heißt Rohöl, aber auch alle daraus erzeugten Produkte, wie beispielsweise Benzin, Diesel und Heizöl. Gas beinhaltet fast ausschließlich Erdgas und abgeleitete Gase. Nicht-erneuerbare Elektrizität ist Elektrizität, die durch eine Quelle von erschöpfbarer Energie (das heißt aus einer Basis von Rohstoffen, bei denen die Geschwindigkeit ihres Verbrauchs die Geschwindigkeit ihrer Regeneration übersteigt) hergestellt wird. Feste Brennstoffe sind feste fossile Brennstoffe, also verschiedene Arten von Kohle sowie feste aus Kohle gewonnene Produkte.

Brennstoffeinsatz in Endverbrauch

Europäische Union (28 Länder) 2016



Quelle: Eurostat

¹ (Bibliographisches Institut GmbH, 2018)

2.2 Energiezufuhr

Als Energiezufuhr, wird alle verfügbare Energie bezeichnet. Dieses bezieht sich sowohl auf die Brennstoffe, die als Energiespeicher genutzt werden, sowie auch auf dem verfügbaren elektrischen Strom. Im folgenden Kapitel beinhaltet die Energiezufuhr nicht nur den Energieimport, sondern auch die lokale Energieproduktion, da diese auch zur verfügbaren Energie beiträgt. Eingangsmix wird als Synonym genutzt, da auch dieser Term die verfügbare Energie beschreibt.

Europaweit gibt es große Unterschiede bei der Energiezufuhr: in Frankreich besteht dieser zu 54% aus fossilen Brennstoffen und zu 37% aus Nuklearenergie. In Deutschland dagegen kommen feste Brennstoffe, Gas, Rohöl und Mineralölerzeugnisse zusammen auf ganze 81% und macht Kernenergie nur 1% aus. Der Anteil erneuerbare Energie ist in Deutschland etwas besser: mit 11% gegen 9% in Frankreich ist dieser Unterschied aber durchaus überschaubar. Belgien hat noch mehr fossile Energien (82%) zusätzlich aber auch noch 12% Kernenergie. In punkto erneuerbarer Energie schneidet Belgien am schlechtesten von den drei Ländern ab: sie entsprechen nur 4% von ihrem Gesamtmix.

Luxemburgs Energiezufuhr besteht, genauso wie denen der Nachbarländer, auch zum Großteil aus Rohöl und Mineralölerzeugnisse und Gas. Mit 6% erneuerbare Energien (wovon ungefähr die Hälfte selbst produziert wird) ist dieser Anteil bedeutend kleiner als in Deutschland und Frankreich, immer aber noch viel höher als in Belgien.

2.3 Energiezufuhr versus Endverbrauch

Es gilt aber zu beachten, dass der Energiezufuhr die Brennstoffe sind die Verfügbar sind. Welche Energien im Endverbrauch landen ist eine andere Sache: Einerseits gibt es Verluste: bei dem Transport, aber vor allem bei der Umwandlung geht vieles verloren. Andererseits wird noch Energie exportiert. So sieht man, dass durch große Verluste, in der ganzen europäischen Union nur noch 25% von den Erneuerbaren Energien aus den Einfuhren erhalten bleiben. Sie wird aber kaum exportiert. Bei den anderen Energiearten gibt es auch Verluste, diese sind aber minimal. Ihr Anteil verringert sich jedoch durch Exporte. Dieses erklärt, dass der Unterschied zwischen dem Anteil Erneuerbare Energien in den Einfuhren (10% der Gesamtenergie) und dem Anteil Erneuerbare Energien im Endverbrauch (7%) nicht so weit auseinander liegt. Von der gesamten Energiezufuhr von 26 537 255 GWh (Eurostat 2016) bleibt nur 14 021 029 GWh im Endverbrauch übrig.

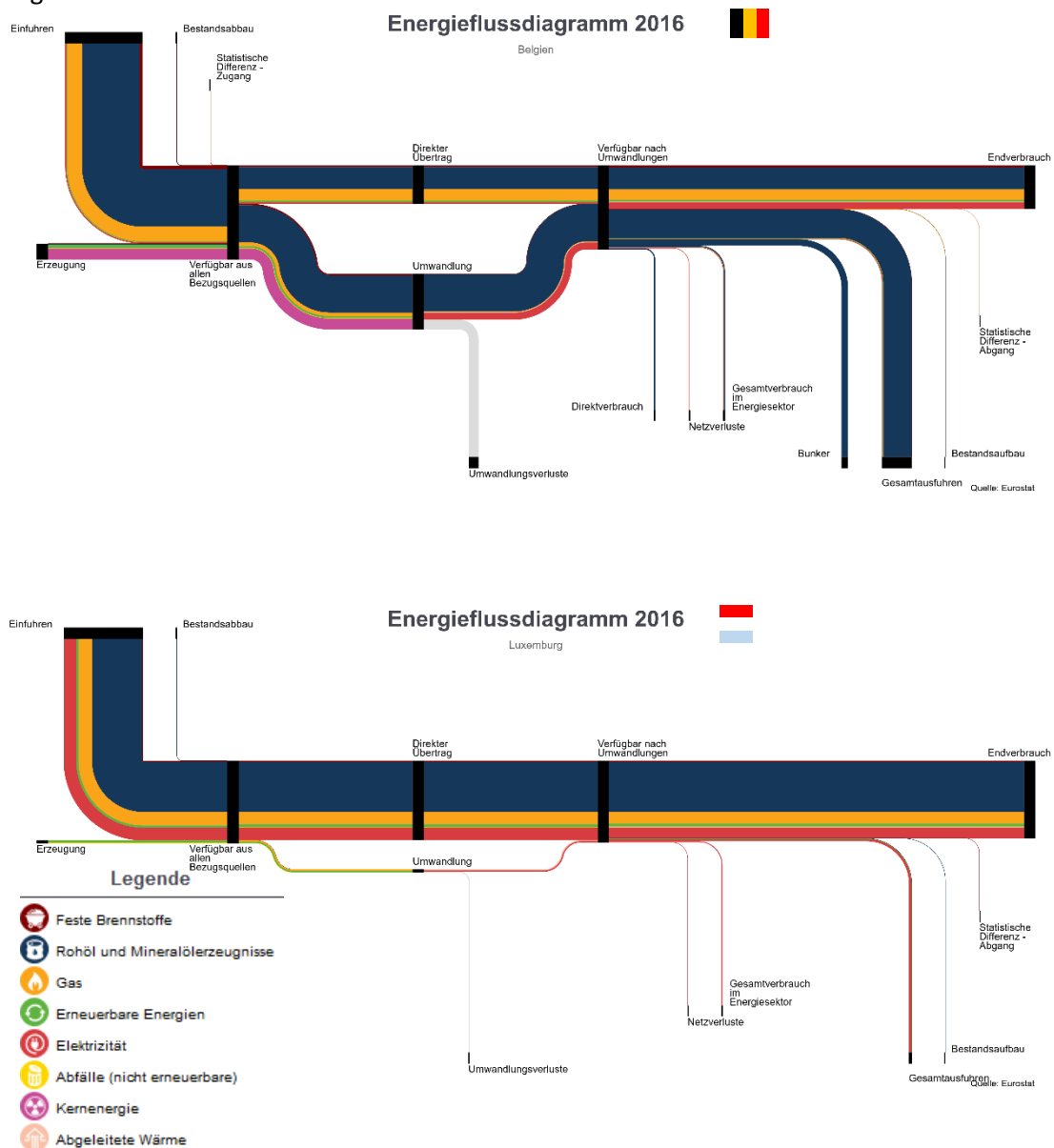


Abbildung 2 Energieflussdiagramm von Belgien und Luxemburg. Belgien hat viel mehr Ausfuhren.

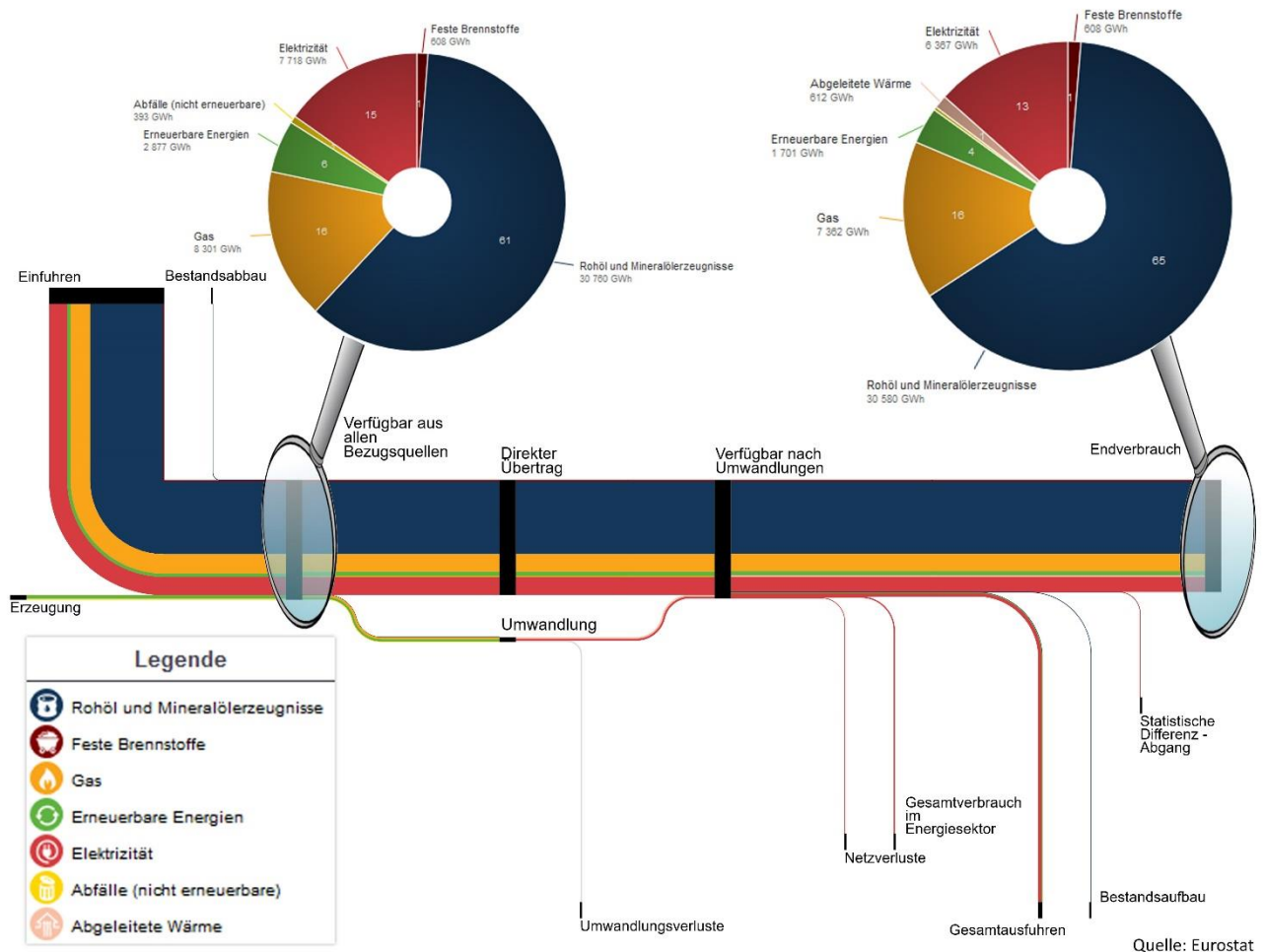
So hat Belgien vielleicht prozentual weniger Erneuerbare Energien im Eingangsmix als Luxemburg (4,3% gegen 5,6%), beim Endverbrauch verändert sich dieses Verhältnis jedoch (siehe Abbildung 2), da Belgien sehr viel Rohöl und Mineralölerzeugnisse exportiert, Luxemburg dagegen sein Rohöl selbst konsumiert (obwohl 34% (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg, 2019, S. 55) der im Verkehrssektors verbrauchten Energie auf den ausländischen Straßenverkehr und Tanktourismus zurückzuführen ist, gilt dies als Eigenkonsum). Nach den Umwandlungen und den Ausfuhren nimmt in Belgien, dank den Rohölausfuhren, trotz Verluste die Erneuerbare Energien immer noch 4,2% ein. In Luxemburg gibt es nur sehr wenige Ausfuhren, aber die gleichen Verluste bei den Erneuerbaren Energien. Dort fällt also den Anteil erneuerbarer Energien auf 3,6%.

Auffallend bei der Statistik für Luxemburg ist, dass 15% des Energiemix' einfach als Elektrizität importiert wird. Schaut man sich dann die Importstatistiken des ILR für Luxemburg 2016 an, sieht man, dass das genau alle importierte Elektrizität ist (7 718 GWh). Laut Eurostat werden aber noch zusätzlich Erneuerbare Energien (1 425 GWh) importiert (wo die Definition von Eurostat vermuten ließe, dass es sich nur auf erneuerbare Elektrizität bezieht „Energiequellen, die sich natürlicherweise erneuern, wie zum Beispiel Sonnenenergie, Windenergie, Wasserkraftenergie, Geothermische Energie, Biomasse und erneuerbare Abfälle, usw. (Eurostat, 2018)“, den Zahlen nach scheint es aber wahrscheinlicher, dass auch Erneuerbare Energien in anderen Sektoren (wie der Verkehrssektor, den Wärmesektor und den Biokraftstoffsektor) mitgezählt sind. Welche Sektoren allerdings mitgezählt werden ist mir nicht deutlich. Oder zählt das ILR grüne Energie beim Elektrizitätsimport nicht mit? Es könnte auch sein, dass das ILR Verluste schon gleich abrechnet. Jedenfalls korrespondiert die Anzahl Erneuerbaren Energien die laut Eurostat in Luxemburg produziert werden (1453 GWh) nicht mit der Anzahl Elektrizität auf erneuerbare Art produziert laut dem ILR (461 GWh) jedoch auch nicht mit der Anzahl gesamt produzierte Erneuerbaren Energie, wo also der Wärme-, Verkehrs- und Biokraftstoffsektor in

Luxemburg mit eingerechnet wird (2416 GWh in 2016 (Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire; Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable, 2019, S. 54)).

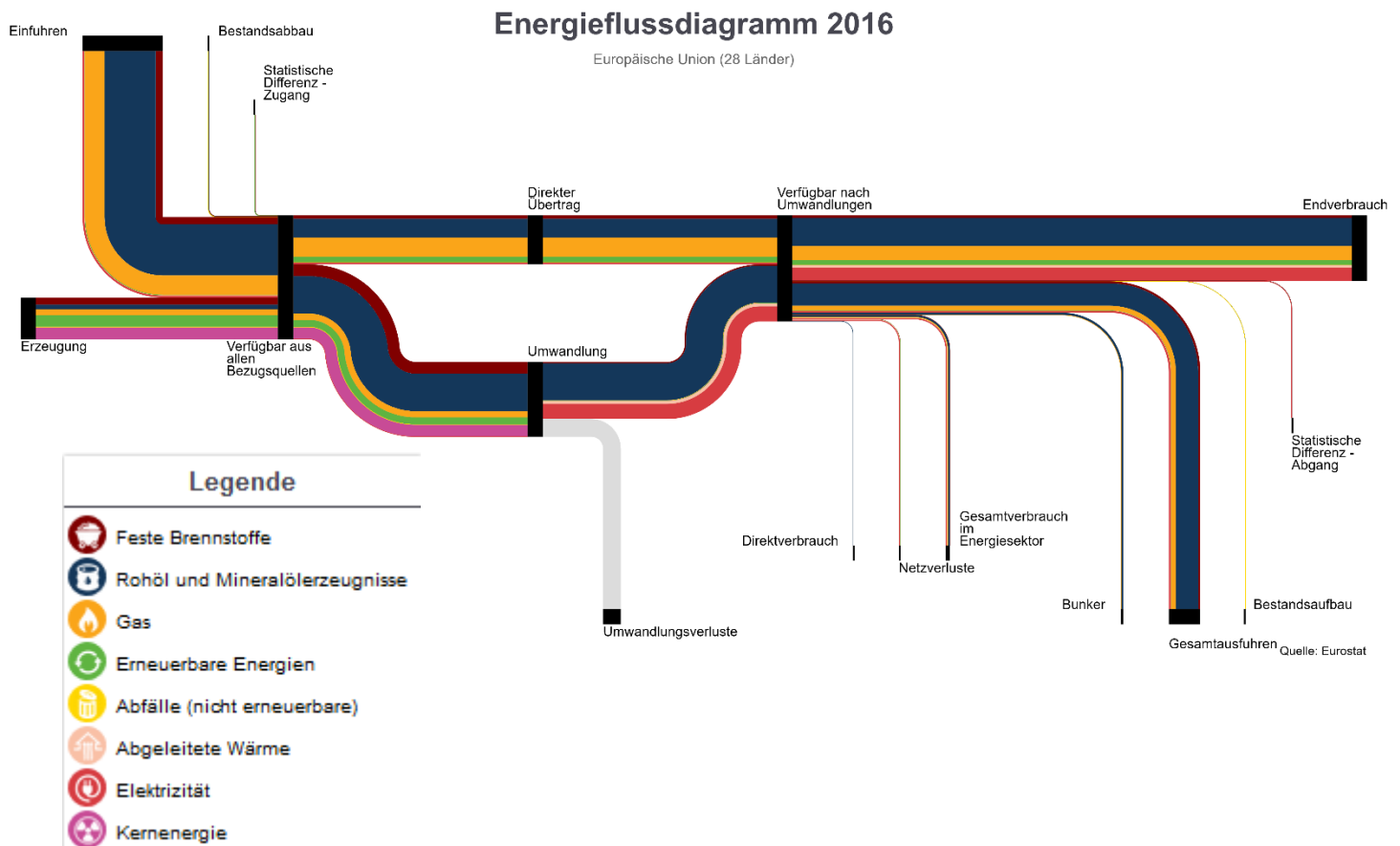
Energieflussdiagramm 2016

Luxemburg



2.4 Energieimporte

In Luxemburg wurde 2017 86,6% des Energieverbrauchs importiert. Am meisten elektrischer Energie kam aus Deutschland (7 566 689 667 kWh², 81% vom gesamten Import), der Rest aus Frankreich (888 213 933 kWh, 12% vom Import) und Belgien (531 680 142 kWh, 7% vom Import).

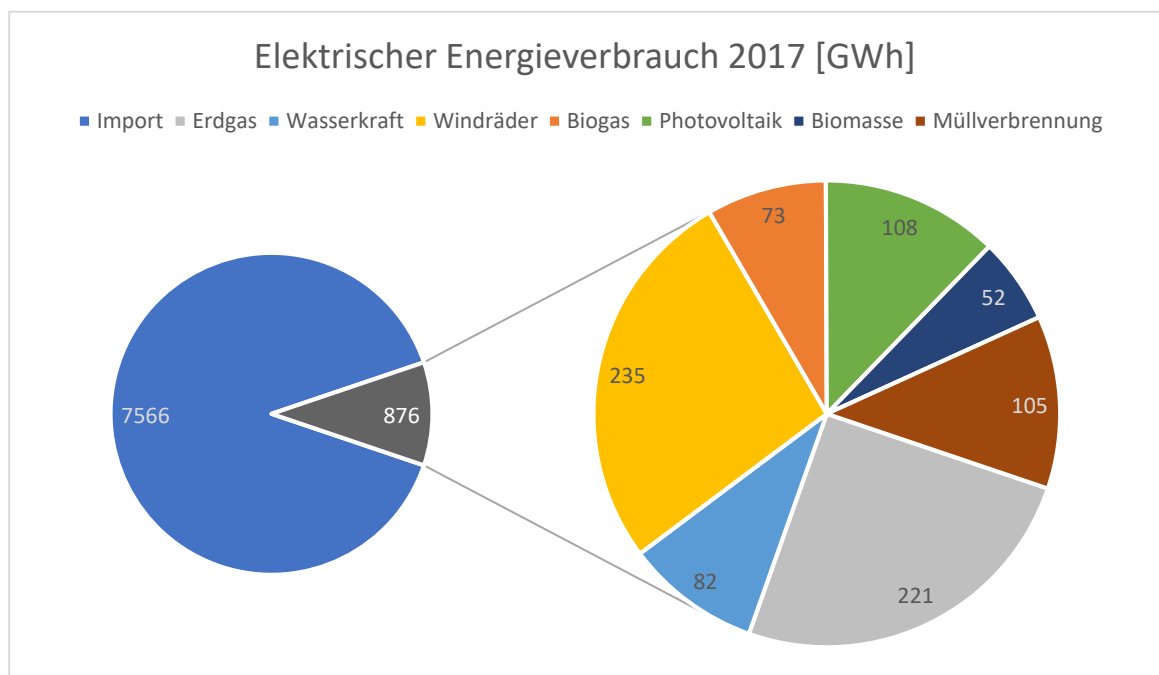


² Die kommenden Daten stammen alle vom ILR (Institut Luxembourgeois de Régulation, 2018) und behandeln das Jahr 2017.

3 Stromproduktion in Luxemburg

Sieht man sich dann die Stromproduktion von Luxemburg selbst an (875 414 962 kWh Brutto, abgesehen von der im Pumpspeicherkraftwerk gespeicherte Energie) merkt man, dass dieser 13,4% des nationalen Gesamtverbrauchs deckt. Dies könnten hundert Prozent sein. Eine Solarforscherin an der Uni Luxemburg hat errechnet, dass es um den Stromverbrauch Luxemburgs mit Solarenergie abzudecken, eine Fläche von nur 1,3% des Landes braucht (Schmit J.-P. , Strom aus Luxemburg, 2018).

Von den 13,4% des Stromverbrauchs, der Luxemburg produziert, ist 9,25% (Relativ zum Gesamtstromverbrauch) auf erneuerbare Art produziert (Wasserkraft, Windräder, Biogas, Photovoltaik, Biomasse, Müllverbrennung³). Die restlichen 4,25% werden hauptsächlich mit Erdgas produziert (Schmit J.-P. , Energiewende light, 2018). Die gesamte Produktionskapazität betrug 2017 426 MW, gegen 414 MW im Jahr 2016, was eine Steigung von 3% ist. Diese Steigerung ist vor allem auf das in Betrieb nehmen einer Elektrizitätsproduktionszentrale auf

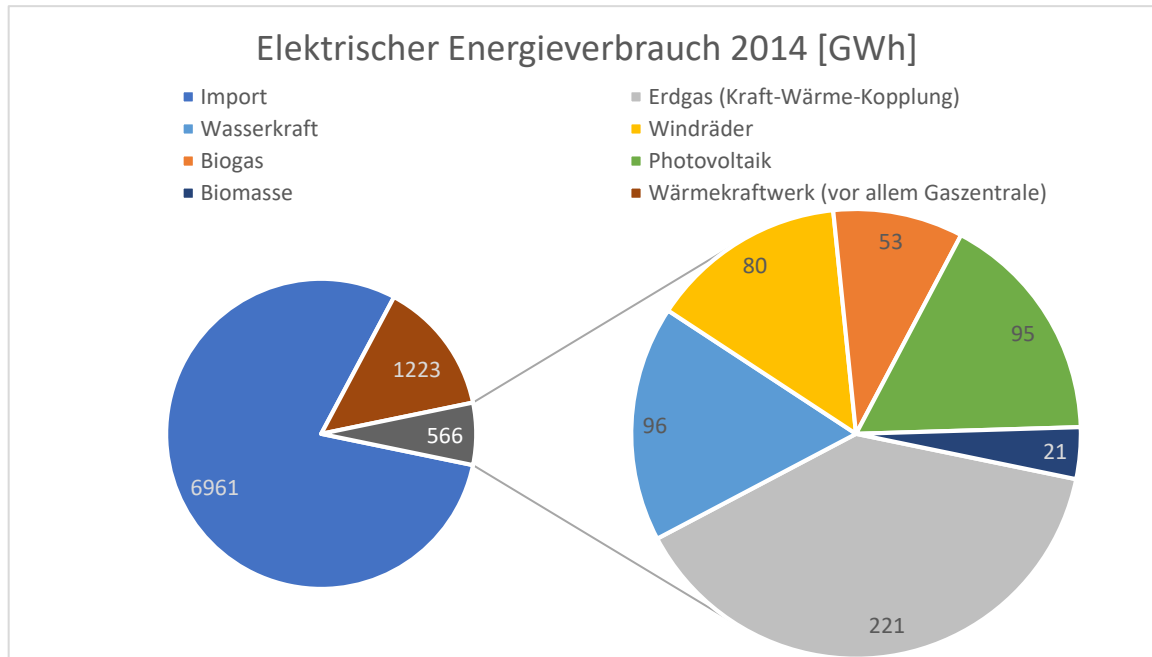


Basis von Holzabfall, eine Biomasseanlage und neuer Photovoltaikanlagen. Die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen ist in Punkto Leistung von 461 GWh im Jahre 2016 auf 605 GWh in 2017 gestiegen, was eine Zunahme von 31% entspricht.

Der Energiemix von Luxemburg hat sich in den letzten Jahren auch sicherlich verändert: Im Vergleich mit 2014 ist der Anteil Erneuerbare Energie im Strommix gestiegen, da die Produktion von „erneuerbare“ Elektrizität konstant zugenommen hat (von 361 GWh auf 605 GWh in 2017).

³ Die Stromproduktion auf Basis von Müllverbrennung ist nur bedingt erneuerbar. Von den 104,9 GWh, die das Interkommunale Syndikat SIDOR 2017 produzierte, gilt nur 53% als erneuerbar (Verweis auf Kapitel Stromproduktion?) (Institut Luxembourgeois de Régulation, 2018)

Diese Steigung ist vor allem auf die neue Windkraftanlagen zurückzuführen. Die gesamte Stromproduktion hat allerdings in diese drei Jahren bedeutend abgenommen (von 1877 GWh auf 875 GWh in 2017, was eine Abnahme von ganze 53,4% darstellt). Dieses ist vor allem die Konsequenz der Abschaltung der Twinerg Gaszentrale. Die Zentrale war ein Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk, und ermöglichte Luxemburg, dass 2000 noch nahezu 100% von Importe abhängig war (Statec, 2016), diese Abhängigkeit auf 98% zu verringern. Sie musste 2016 geschlossen werden, da sie nicht mehr rentabel war. So sah der Energiemix 2014 noch anders aus:



3.1 Wasserkraft

Wasserkraft „bezeichnet die Umsetzung potenzieller oder kinetischer Energie des Wassers mittels einer Wasserkraftmaschine in mechanische Arbeit. (Wikipedia D. f., Wasserkraft - Wikipedia, 2018)“.

Es gibt verschiedene Arten von Wasserkraftwerken (Wikipedia D. f., Wasserkraft - Wikipedia, 2018). Laufwasserkraftwerke werden an einem Fluss installiert und bieten keine Speichermöglichkeit. Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke dagegen sind an einem Stausee, und können die Produktion flexibel den Bedürfnissen anpassen. Wellenkraftwerke und Gezeitenkraftwerke nutzen die Energie der Meereswellen bzw. der Hoch- und Niedrigwasserdifferenz zur Stromproduktion und ein Gradientenkraftwerk nutzt den Salzgehalt respektive die Meereswärme. Ein Gletscherkraftwerk nutzt das Schmelzwasser eines Gletschers zur Stromerzeugung.

In Luxemburg werden Laufwasserkraftwerke, Pumpspeicherkraftwerke und Speicherkraftwerke genutzt (Energieinfo.lu, 2018).

3.1.1 Laufwasserkraftwerk

„Ein Laufwasserkraftwerk nutzt den natürlichen Wasserlauf eines Flusses zur Stromerzeugung.“ (Enzyklo, 2019). Meistens bezieht sich der Begriff nur auf die große, rein zur Stromproduktion angelegte Zentralen (siehe Modernes Laufwasserkraftwerk, unten). In dieser Arbeit ist jedoch unter dem Titel Laufwasserkraftwerk auch ein kleines Kapitel den Wassermühlen gewidmet (siehe Mühlenstrom, Seite 18), da im Laufe der Zeit viele auf Stromproduktion umgestellt haben, und die Definition dann auch relativ gut auf sie zutrifft.

Modernes Laufwasserkraftwerk



Abbildung 3 Das Laufwasserkraftwerk Rosport am Staudamm an der Sauerschleife Rosport-Ralingen (SEO | Société électrique de l'our - Laufwasserkraftwerke, kein Datum)

In Luxemburg gibt es einige Laufwasserkraftwerke an der Mosel und an der Sauer, die insgesamt für etwa 0,7% des Strommixes verantwortlich sind (Dieschbourg, Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg, 2007). Die Werke Grevenmacher und Palzem wurden im Ramen

der Moselkanalisierung gebaut, und gingen Ende 1964 in Betrieb. Die meisten anderen Werke wurden auch Mitte bis Ende des 20. Jahrhundert errichtet. Bei dem Laufwasserkraftwerk in Rosport bleibt noch hervorzuheben, dass Henri Tudor schon Ende 19. bis Anfang 20. Jahrhundert Pläne für ein Werk an diesem Standort hatte (die jedoch nie ausgeführt wurden). Das Laufwasserkraftwerk wurde allerdings erst in den 60er Jahren errichtet.

Funktion eines modernen Laufwasserkraftwerk

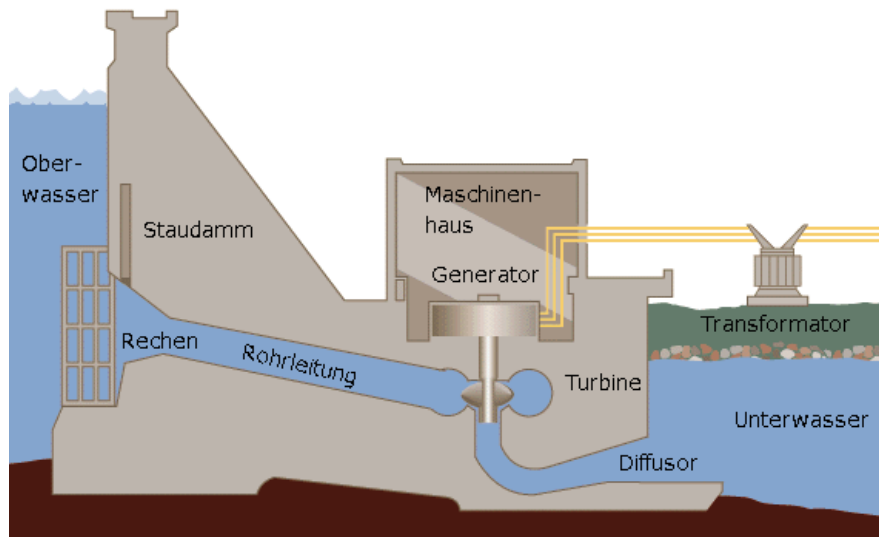


Abbildung 4 Schema eines Laufwasserkraftwerkes (Wikimedia, 2015)

Ein Laufwasserkraftwerk besteht aus einem Oberwasser, und ein Unterwasser, mit dazwischen ein Staudamm, und eine Rohrleitung, über die das Oberwasser, via eine Wasserturbine zum Unterwasser gelangt. Es kann sich um eine Durchströmturbine, eine Propellerturbine oder um die überall einsetzbare Francis-Turbine handeln, in Luxemburg handelt sich aber meistens um eine Kaplan-turbine (wie bei Rosport-Ralingen⁴, Grevenmacher/Palzem, Schengen-Apach).

Die Kaplan-turbine ist eine Weiterentwicklung der Francis-Turbine. Sie wurde im Jahr 1913 vom österreichischen Ingenieur Victor Kaplan entwickelt und patentiert.

⁴ (SEO | Société électrique de l'our - Laufwasserkraftwerke, kein Datum)

Die Kaplan turbine ist mit einem Wirkungsgrad von bis zu 96% besonders effizient und eignet sich für Laufwasserkraftwerken, mit einer niedrigen Fallhöhe.

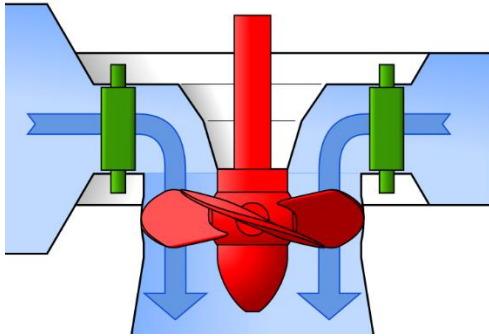


Abbildung 5 Skizze einer vertikalen Kaplan-Turbine. (Jahobr, 2016)

Es gibt verschiedene Arten von Kaplan-Turbinen. Bei der vertikalen Kaplan-Turbine - die meistvorkommende Variante - strömt das Wasser direkt von oben nach unten durch. Ein Drehstromgenerator wird meistens direkt über die Turbine angebracht, so dass keine Energie durch Umlenken verloren geht. Der Drehstromgenerator wandelt kinetische Energie dann in elektrische Energie um.

Eine andere Variante von den Kaplan-Turbinen sind die Rohrturbinen, welche beispielsweise beim Laufwasserkraftwerk in Grevenmacher genutzt werden.

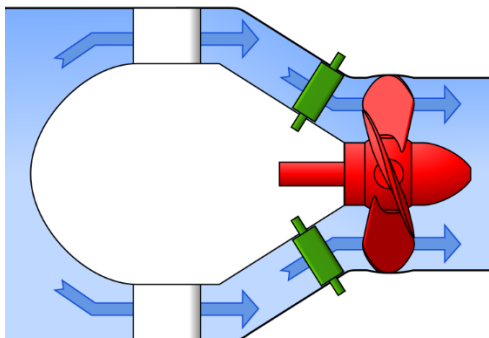


Abbildung 6 Skizze der eigentliche Kaplan-Rohrturbine; Der Generator liegt im inneren der „Birne“. (Jahobr, 2016)

Die Kaplan-Rohrturbine ist die Variante der Kaplanturbine, die am besten für niedrige Fallhöhen geeignet ist. Die maximale Fallhöhe beträgt 25 m, und die Leistung 75 MW. Das Laufrad wird horizontal in Richtung des strömenden Wassers angebracht, sodass Umlenkverluste vermieden werden. Dies erhöht die Schluckfähigkeit und ermöglicht einen höheren Vollastwirkungsgrad (ein besseres Verhältnis zwischen Nutzenergie und zugeführten Energie).



Abbildung 7 Postkarte einer Ölmühle am Anfang des 20ten Jahrhunderts (Dieschbourg, Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg, 2007, S. 127)

Zwischen 1874 und 1876, listet ein Bericht der Handelskammer ganze 230 Wassermühlen. In der Müllerthal Region, wurden am Anfang des 20. Jahrhunderts, in den meisten Mühlen Laufwasserkraftwerke eingebaut (Dieschbourg, Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg, 2007). Die dazu genutzten Turbinen waren ein großer technologischer Vorsprung, denn der Wirkungsgrad war viel höher als mit den klassischen Wasserrädern. Ein anderer Unterschied zu den klassischen Rädern, ist das die Turbinen nicht direkt an der Mühlenmaschinerie angeschlossen wurden, sondern die Kraft mittels eines Generators erst in Strom umgewandelt wurden. Damals versorgten einige Mühlen ganze Dörfer mit elektrischem Strom (gilt zu beachten, dass damals der Stromverbrauch gering war) und die Dörfer an den Flüssen und Strömen galten als die ersten, die über elektrische Beleuchtung verfügten. Heutzutage sind die meisten solcher Anlagen nicht mehr in Betrieb. Vor dem ersten Weltkrieg begann man Elektrozentralen mit viel leistungsfähigeren Dieselmotoren auszustatten, und 1928 bekam die CEGEDEL das Monopol in der Elektrizitätsverteilung. Langsam verschwanden die Mühlen. Die einzige (2007) Mühle, die in der Müllerthal Region noch in Betrieb ist, ist die Mühle J.-P Dieschbourg, auch Specksmillen genannt. Die Wasserenergie allein bringt da allerdings nicht



Abbildung 8 Turbine der "Lauterburer Millen" (Dieschbourg, Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg, 2007, S. 36)

mehr genug Strom um das Gran zu mahlen (Dieschbourg, Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg, 2007).

Bei einem Besuch des Pumpspeicherwerks in Vianden, erklärte unser Guide, an der Our, an der früher viele Mühlen lagen, gäbe es einen Bäcker (an der deutschen Seite) die die Anlage umgebaut habe, um via einen Generator Strom für den Backofen zu produzieren. Gibt es einen Stromüberschuss, kann dieser den verkaufen. All die anderen Mühlen sind jedoch auch hier mit der Zeit verschwunden. Er meint zurückblickend, man habe solche Umbauarbeiten mit Subsidien unterstützen müssen, dann hätte Luxemburg schon mehr erneuerbare Energie. Jetzt, wo die Mühlen verschwunden sind, sei es zu spät.

3.1.2 Pumpspeicherkraftwerk

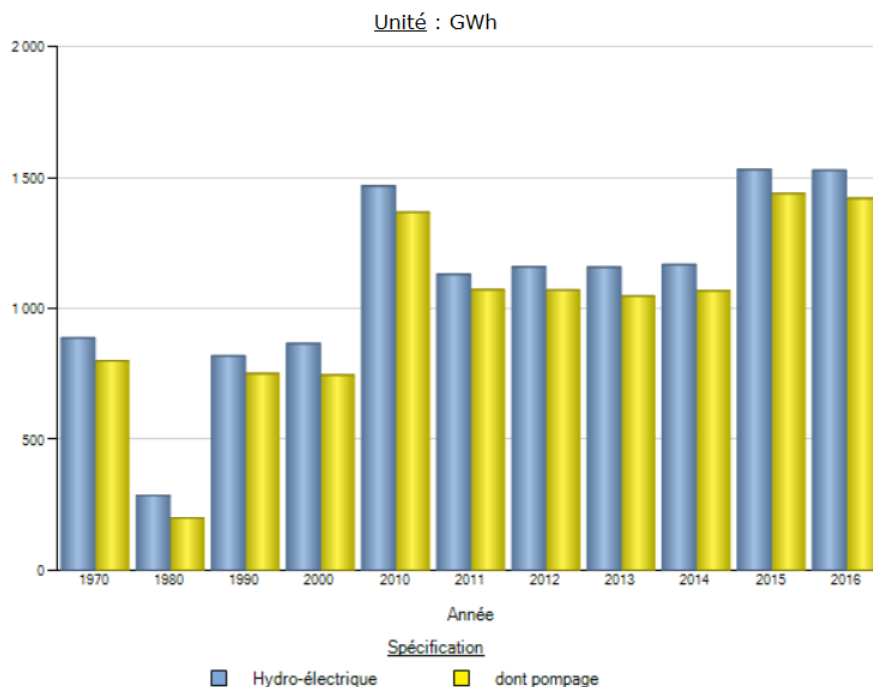


Abbildung 9 Hydroenergie Produktion 1928 - 2016 (Institut Luxembourgeois de Régulation (ILR), 2018)

„Ein Pumpspeicherkraftwerk (auch Pumpspeicherwerk (PSW) oder, insbesondere in der Schweiz, Umwälzwerk genannt) ist ein Speicherkraftwerk, das der Speicherung von elektrischer Energie durch Hinaufpumpen von Wasser dient.“ (Wikipedia D. f., Pumpspeicherkraftwerk - Wikipedia, 2018) Somit produziert das Pumpspeicherkraftwerk also eigentlich gar keinen Strom, sondern, wie der Name schon sagt, speichert es die Energie nur. Es gibt Verluste, man kann einen Wirkungsgrad von 0,75 erhalten (Happoldt & Oeding, 1978). In Luxemburg gibt es ein Pumpspeicherwerk in Vianden. Dieses ist, mit einer Leistung von 1296 Megawatt zurzeit das größte seiner Art in Europa (das drittgrößte Pumpspeicherwerk Europas und das 16 größte Pumpspeicherwerk weltweit (Wikipedia D. f., Liste von Pumpspeicherkraftwerken - Wikipedia,

2018), laut der SEO ist es das größte Europas) und macht den größten Teil des in Luxemburg mittels Wasserkraft „produzierten“ Strom aus. (Siehe Abbildung 9: Blau dargestellt ist die gesamt produzierte Hydroelektrizität, gelb ist der Anteil, den das Pumpspeicherkraftwerk ausmacht.) Mit was für Strom hier hinaufgepumpt wird, hängt von der zeitlichen Zusammensetzung des Stroms im Netz ab. Heng, langjähriger Arbeiter am Pumpspeicherwerk Vianden sagte man nutze den Strom, den man habe, und sehe nicht von welchen Kraftwerken dieser stamme. Meiner Meinung nach spielt es eigentlich auch gar keine Rolle mit was für Strom heraufgepumpt wird, denn es geht ja eigentlich nur darum, den Strom, der zu viel ist zu speichern. Die Verluste, die das Pumpspeicherwerk mit sich bringen, sollen allerdings den Stromproduktionsanlagen, von den der jeweilige Strom kommt, zugerechnet werden.

Geschichte der Pumpspeichertechnik

Die Pumpspeichertechnik wurde erstmals in den 90er Jahren des 19. Jahrhunderts in Italien und der Schweiz genutzt (Wikipedia D. f., Pumpspeicherkraftwerk - Wikipedia, 2018). In der Schweiz war eines der ersten Werke, das mit einem Wasserspeicher ausgerüstet war, das Wasserwerk Letten (Zürich) (Wikipedia D. f., Krafwerk Letten - Wikipedia, 2018). Dieses ist kein reines Pumpspeicherkraftwerk, sondern auch noch ein Laufwasserkraftwerk. Produzierte das Laufwasserkraftwerk überschüssigen Strom, wurde damit Wasser, durch eine unterirdische Leitung (alt-zueri.ch, kein Datum) in den Weiher gepumpt. Das Elektrizitätswerk wurde 1892 zusätzlich zum Wasserwerk („Anlage zur Aufbereitung und Bereitstellung von Trinkwasser“ (Wikipedia D. f., Wasserwerk - Wikipedia, 2018)) errichtet, um den zunehmenden Energieverbrauch zu decken (Wikipedia D. f., Elektrizitätswerk der Stadt Zürich - Wikipedia, 2018).

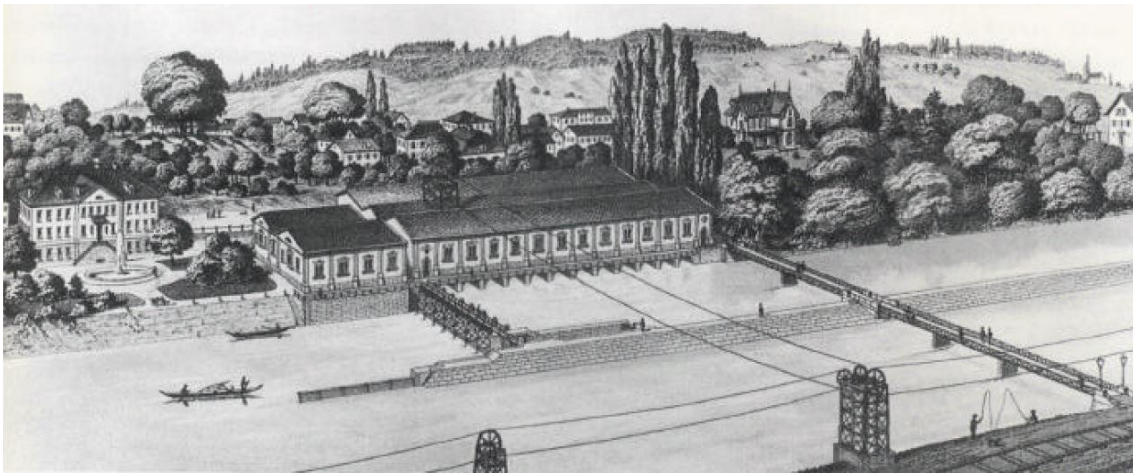


Abbildung 11 Kraftwerk Letten (Kurz, 2017)

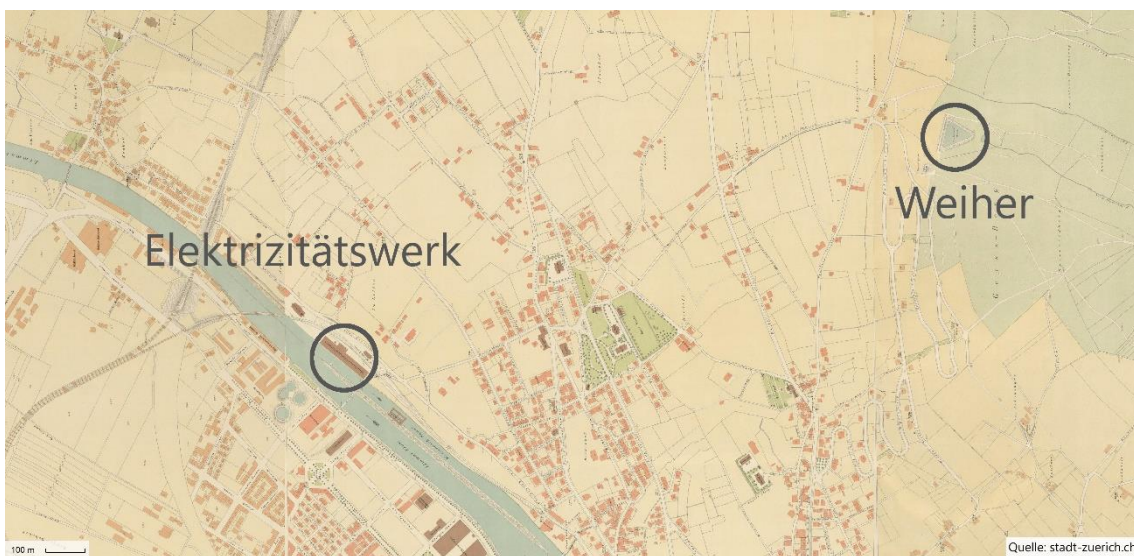


Abbildung 10 Das Elektrizitätswerk am Limmatfluss und der Weiher, wo das Wasser raufgepumpt wurden lagen ca. 1.5 km Luftlinie auseinander und waren unterirdisch verbunden. Karte: (Stadt Zürich - Tiefbau und Entsorgungsdepartement, 2018)

In Luxemburg dauerte es noch eine Weile, bis dann 1910 Arbed-Direktor Émile Mayrisch mit der Idee eines Pumpspeicherwerks in Vianden kam. 1925 lagen dann die ersten Pläne vor, die für ein Pumpspeicherkraftwerk an der Our gefertigt wurden. Das Projekt sah größere Becken vor, das Ourtal sollte mit Wasser gefüllt werden, wodurch es eine gesamt Wasserkapazität von 800 Millionen m³ habe. Wegen Finanzierungsproblemen, und politischem Druck, musste das Projekt allerdings verworfen werden.

Am Ende des zweiten Weltkriegs, entstand dann wieder Interesse am Bau eines Werkes. Da Luxemburg schon Ende der 40er Jahren eine Trinkwasserreserve brauchte, wurde von 1955 bis 1958 der Stausee gebaut. 1958 dann, wurde das Projekt konkreter. Es wurde zwischen dem Bundesland Rheinland-Pfalz, dass an der anderen Seite der Our liegt, und dem Großherzogtum, ein Abkommen unterzeichnet, dass der SEO erlaubt die ganze Our (also auch die deutsche Seite) zu nutzen, um ein Pumpspeicherkraftwerk zu bauen. Die Arbeiten begannen 1959, und die ersten vier Pump-Turbinen wurden im Winter 1962-1963 in Betrieb genommen. Die fünf weiteren Turbinen funktionierten ab 1964. Die Zentrale hatte damals einen so großen Stellenwert, dass sie sogar auf den 100 Frank Scheine von 1963 abgebildet waren (Wikipédia, Centrale de Vianden - Wikipédia, 2018).



Abbildung 13 100 Frank Schein aus 1963 (100 Francs 18.9.1963 1963
Luxemburg unz. - Laurens Schulman BV - MA-SHOPS)

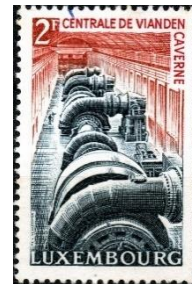


Abbildung 12 Auch eine Briefmarke war 1967 dem Pumpspeicherwerk gewidmet (Briefmarkenblog, 2017)

Seitdem wurde das Kraftwerk auf 11 Turbinen erweitert, und die Leistung auf 1296 MWh aufgerüstet. Bis 2021, soll durch den Ersatz der leistungsstärksten Maschinen im Kraftwerk, die Leistung erhöht werden, und das Werk schneller auf Änderungen aus dem Energienetz reagieren können. Technisch gesehen ist das Kraftwerk in Deutschland an das europäische Verbundnetz angeschlossen (Voith GmbH, 2018), weshalb es auch auf der Kraftwerksliste der deutschen Bundesnetzagentur steht. Luxemburg hat allerdings noch einen anderen Stromanschluss auf das deutsche Stromnetz, wodurch die Mehrheit der vom Pumpspeicherwerk eingespeiste Strom trotzdem den Weg ins Luxemburgische Stromnetz findet.

Das Pumpspeicherwerk ist Eigentum von der „Société électrique de l'Our“, welcher zu jeweils 40,3% dem Luxemburger Staat und dem deutschen Energiekonzern RWE Power gehört. Für den Rest sind auch noch Luxemburger Banken daran beteiligt.

Funktionsprinzip eines Pumpspeicherkraftwerkes



Abbildung 14 Die zwei Wasserspeicher, oben auf dem Nikolausberg (1) und unten (abgeschlossener Teil der Our) (2) (Luxembourg for Tourism ©)

Ein Pumpspeicherkraftwerk besteht aus einem unteren (in diesem Fall ein abgeschlossener Teil der Our) und einem oberen (auf dem Nikolausberg) Wasserspeicher. Zwischen den beiden Becken gibt es Druckrohrleitungen, wodurch das Wasser hinaufgepumpt respektiv hinuntergelassen werden kann.

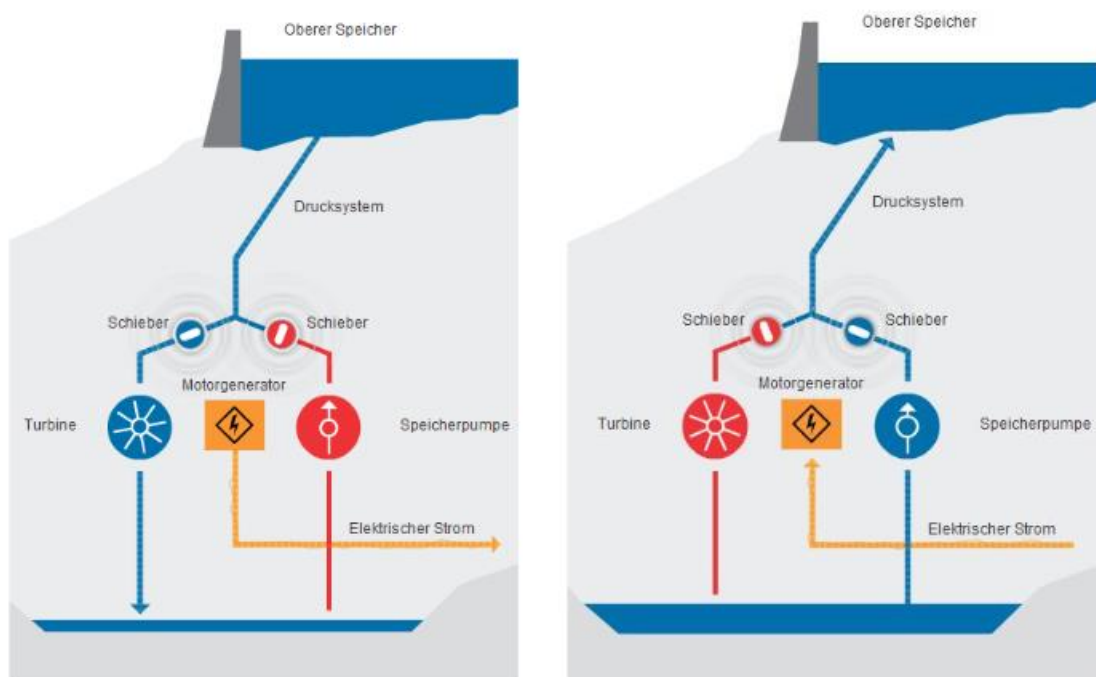


Abbildung 15 Vereinfachte Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks während Turbinenbetrieb (links) und im Pumpbetrieb (rechts). (Axpo Holding AG, 2018)

Ein Maschinensatz besteht aus einer Turbine (1) (Abbildung 16), eine Synchronmaschine (Motor oder Generator, je nach Betrieb) (2) eine Anwurf-Turbine mit Kupplung (3) und eine Pumpe (4). Um hinauf zu pumpen, wird die Pumpe erst mit Pressluft gelehrt und mit der Anwurf-Freistrahlturbine auf Gang gebracht, bis sie in derselben Geschwindigkeit als den Motor dreht. Anschließend wird sie über eine Kupplung mit dem Maschinensatz verbunden. Die Turbine bleibt angeschlossen und dreht leer mit. Die Pumpe bringt das Wasser nach oben.

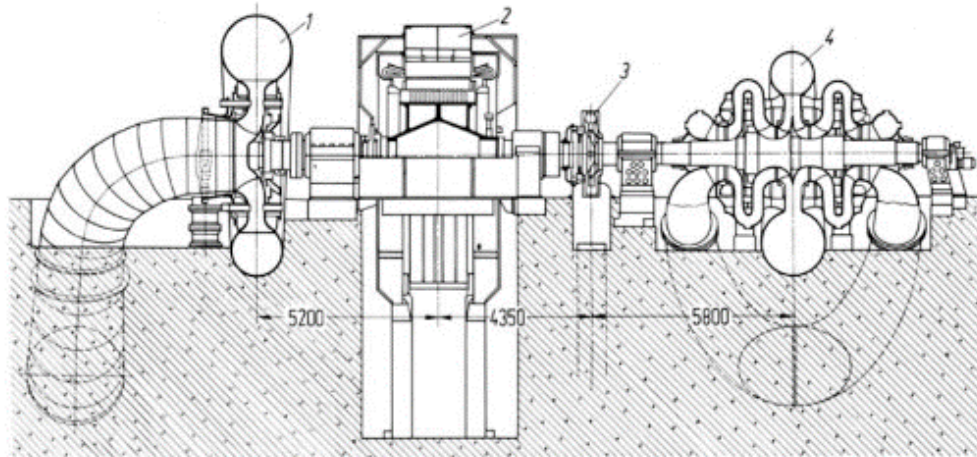


Bild 4.18. Maschinensatz des Pumpspeicherwerks Vianden (Luxemburg).

1 Francis-Spiralturbine, $H = (265 - 290) \text{ m}$, $Q = (37,2 - 39,5) \text{ m}^3/\text{s}$, $n = 428,6 \text{ min}^{-1}$, $P = (90 - 100) \text{ MW}$, $P_{\text{max}} = 104 \text{ MW}$;

2 Synchronmaschine (Generator oder Motor);

3 Anwurf-Freistrahlturbine mit Zahnschaltkupplung, $H = 288 \text{ m}$, $Q = 1,31 \text{ m}^3/\text{s}$, $P = 2,7 \text{ MW}$;

4 Zweiflutige-zweistufige Speicherpumpe, $P = (67 \dots 69) \text{ MW}$, $P_{\text{max}} = 76 \text{ MW}$

Abbildung 16 Maschinensatz des Pumpspeicherwerks Vianden (Happoldt & Oeding, 1978, S. 73)

Im Generatorbetrieb (Produktionsbetrieb) wird die Pumpe von dem Maschinensatz abgekoppelt. Wird das Ventil am Oberen Speicher geöffnet, bringt das Wasser sofort die nötige Geschwindigkeit, um die Turbine, und somit die daran angeschlossen Synchronmaschine (Generator) auf Tempo zu bringen. Der Generator produziert dann den Strom.



Abbildung 17 Die erstgebaute Maschinen im PSW Vianden

Beim Pumpspeicherwerk Vianden kann man die 10. Maschine hervorheben, da sie die einzige (und die erste in Europa verbaute) vertikale Maschine ist, sowie die Turbine 11, da sie nach vielen Komplikationen, erst 2014 in Betrieb genommen ist.

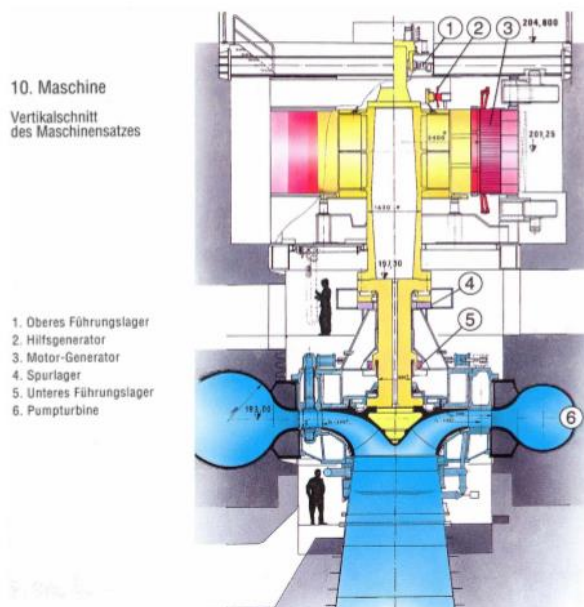


Abbildung 18 Querdurchschnitt des Maschinensatzes von Maschine 10 ("Société Electrique de l'Our" (SEO) , 2010)

Die Schlüsselrolle des Pumpspeicherkraftwerks in der Erneuerbare Energie

Pumpspeicherkraftwerke könnten für Stromversorgung mit Erneuerbarer Energie eine Schlüsselrolle haben, denn „das Problem mit den erneuerbaren Energien ist die schlechte

Planbarkeit“ (Stephan, 2017). Die Sonne habe zwar Unmengen mehr Energie als die Menschen brauchen würden, aber sie scheine oft dann, wenn nicht viel benötigt würde. Der Überschuss an Strom müsse oft durch das Ausschalten der Windkraftwerken gelöst werden (Gith, 2013). Auch das Mittel der negativen Strompreise (wo Konsumenten bezahlt werden um Strom zu verbrauchen) müsse immer öfter genutzt werden (Loesche, Schultz, & Stotz, 2016), da auch wenn die erneuerbaren Energien überproduzieren, es nur schwer möglich ist Kohlekraftwerke auszuschalten. Pumpspeicherwerke könnten dann eine Lösung darstellen um überschüssigen Strom so lange zu speichern, bis die Nachfrage wieder steigt respektiv das Angebot sinkt. Die EDF, der größte europäische Energielieferant bestätigt „Les STEP [Pumpspeicherkraftwerke] sont de plus en plus utiles dans des systèmes électriques qui développent des énergies intermittentes électriques“ (Barboux, 2017). André Niemann, Professor für Wasserbau ist gleicher Meinung „Speicherkraftwerke werden wegen der Energiewende [...] dringend gebraucht, um den in großer Zahl produzierten Wind- und Sonnenstrom aufzunehmen.“ (dab/dpa, 2016).

Doch trotz dem großen Bedürfnis, wird momentan nicht viel in neue Werke investiert. Die Einführung der Erneuerbaren Energien erfordert ein Umdenken in der Nutzung. Früher wurde immer nur nachts wenn der Strom billig ist, das Wasser hinaufgepumpt, um während den Spitzstunden (mittags fürs Kochen, resp. abends zum Fernsehen) wenn die Nachfrage am höchsten und am teuersten ist zu produzieren (Muller, 2012). Im Pumpspeicherwerk Vianden konnte man mir nicht sagen ob das Werk rentabel sei. Man sagte mir nur, ein Pumpspeicherwerk sei für das Gleichgewicht des Netzes sehr wichtig, man werde es nicht dem wegen abreißen.

Durch die erneuerbaren Energien schwankt die Produktion, und so kann es auch zu Überproduktionen (und billige Preise) tagsüber kommen. Im Sommer 2018 hat dies sich in Vianden besonders oft bemerkbar gemacht am Wochenende wurde oft fast nur gepumpt. Das Pumpspeicherwerk hat allerdings die Einschränkung, dass es nicht die gesamte Wassermenge nach oben Pumpen darf, da sonst der Lauf der Our, die im unteren Becken fließt, gestoppt wird. Das habe z.B. Konsequenzen für die Fische.

In den letzten Jahren passiere es auch immer öfters, dass miteinander (mit verschiedenen Maschinen) gepumpt und produziert werde. Dies scheint auf dem ersten Blick sehr unlogisch, dies erlaubt allerdings schnelleres Umschalten des Hauptzustands.

3.2 Windkraft

„Windkraft ist die großtechnische Nutzung des Winds als erneuerbare Energiequelle.“
(Wikipedia D. f., Windenergie - Wikipedia, 2018).

Die Windkraft hat sich, im Vergleich zur Wasserkraft, erst ziemlich rezent in der Energielandschaft Luxemburgs niedergelassen: Die erste Windkraftanlage wurde 1995 in Eschdorf errichtet. Ein Jahr später wurde dann der erste Windpark, mit einer Gesamtleistung von 2000 kW, verteilt auf vier Anlagen, auf dem Pafenberg in der Gemeinde Mompach gebaut. Das Windpark gehörte der Aktiengesellschaft „Winpower“, die inzwischen Zeit von der SEO übernommen ist. Die SEO ist aktuell im Gange die vier Anlagen durch eine einzige, leistungsfähigere zu ersetzen.

Der Vorteil der Stromproduktion auf Basis der Windkraft ist, dass er reichlich und dauerhaft zur Verfügung steht (denn im Gegensatz zur Sonnenenergie gibt es Wind sowohl tagsüber als auch nachts). Hinzu kommt, dass er relativ billig ist: die Windenergie sei 2017 schon (ohne Subventionen) billiger als die Stromproduktion mit herkömmlichen fossilen Kraftwerken⁵. Laut der Europäischen Kommission habe sich der Einsatz von Windkraft in der Zeit von 2004 bis 2015 mehr als vervierfacht⁶.

Windkraftanlagen können in zwei Kategorien eingeteilt werden: die Widerstands- und die Auftriebsläufer. Die zwei Typen unterscheiden sich an dem aerodynamischen Prinzip, das zur Erzeugung der Drehbewegung genutzt wird.

⁵ (Kramper, 2018)

⁶ (Ein kräftiger Schub für Windenergie - covestro, 2019)

3.2.1 Widerstandsläufer

Die Wirkungsweise der Widerstandsläufer ist auf die Ausnutzung des Strömungswiderstandes basiert. Die wohl älteste Windenergieanlage der Welt, die persische Windmühle nutzte im 7. Jahrhundert schon diese Technik.



Abbildung 19 Modell einer "Persischen Windmühle" im Deutschen Museum in München (Saupreiß, 2010)



Abbildung 20 Ein Widerstandsläufer in Helix-Form (Frost, 2009)

Ein Widerstandsläufer nutzt typischerweise den Strömungswiderstand eines Rotors. Durch das Abbremsen des Windes auf einer dem Wind zugewandten Fläche des Flügels, entsteht ein Staudruck. Dieser Staudruck, drückt den Flügel vom Wind weg. Bei der vertikalen Achse entsteht eine Drehbewegung, die wiederum per Generator in Strom umgewandelt wird.

Widerstandsläufer gibt es in folgende Formen:

- Savonius-Rotoren
- Helix-Form
- Schalen-Rotor
- Vertikalachs-Windrad mit einzeln drehbaren Flügeln
- Durchström-Rotor mit zahlreichen Schaufeln am Umfang

Widerstandsläufer haben gegenüber den Auftriebsläufer ein großer Nachteil: Sie bewegen sich nie schneller als die gerade vorherrschende Windgeschwindigkeit, da die Rotorfläche quasi vom Wind weggedrückt wird. Dadurch wird ein sehr niedriger Wirkungsgrad erzielt, was in niedrige Wirtschaftlichkeit resultiert. Da dies zur Folge hat, dass Widerstandsläufer nur wenig zur Stromproduktion genutzt wird nicht weiter auf die einzelnen Formen eingegangen.

Widerstandsläufer werden immer dann eingesetzt, wenn Kosten und Zuverlässigkeit wichtiger als Effizienz sind, was beispielsweise bei einem Anemometer, ein Gerät zur Messung der Windgeschwindigkeit, der Fall ist.

3.2.2 Auftriebsläufer

Für erneuerbare Energien, werden am häufigsten die andere Variante, die sogenannten Auftriebsläufer genutzt. Hier wird der dynamische Auftriebseffekt, der beispielsweise auch das Fliegen von Vögeln ermöglicht, genutzt.

Die Luft umströmt das Blatt und wird nach unten umgelenkt (und beschleunigt). Die nach unten gerichtete Kraft der Luft wird mit einer Gegenkraft (die Reaktion) der Tragfläche (das Rotorblatt) entgegengewirkt.

Laut dem Bernoulli-Prinzip entsteht bei höherer Luftströmungsgeschwindigkeit (die durch die Umströmung an der Oberseite entsteht) ein niedrigeren Druck. Dadurch entsteht senkrecht zur Luftströmung eine Kraft.

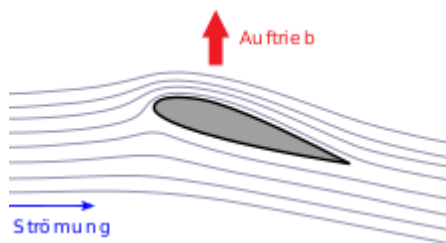


Abbildung 21: Graphische Darstellung des dynamischen Auftriebs. (Paetzold, 2018)

Diese Kraft nennt man in diesem Fall Auftrieb (sie wird Abtrieb genannt, wenn das Rotorblatt andersrum gerichtet ist, da die Gegenkraft dann in der anderen Richtung geht).

Auftriebsläufer gibt es sowohl in der vertikalen Bauweise (meistens mit Darrieus-Rotoren siehe Seite 30) als auch in klassischer Form (mit einem sternförmigen Rotor und meist drei Blättern).

Darrieus-Rotoren

Der Darrieus-Rotor wurde von dem Franzose Georges Jean-Marie Darrieus (1888-1979) erfunden. Während des ersten Weltkrieges leitete er die Frontbatterie und stellte fest, dass die Schießtische den Luftwiderstand nicht berücksichtigen. Als er wegen Verletzungen hospitalisiert wurde, schrieb er einige Notizen, woraus später ein neues Luftwiderstandsgesetz entstehen sollte. Nach dem Krieg beschäftigte sich Darrieus weiter mit der Luftwiderstand, und entwarf ein Prinzip für eine Vertikalachswindturbine. Das erste Patent geht auf 1925 zurück, sein Name wird aber erst 1931 in ein zweites, amerikanisches Patent genannt. Der erste Darrieus-Rotor wurde auch in den Vereinigten Staaten von Amerika produziert.



Abbildung 22: Bild von Darrieus (Georges Jean Marie Darrieus - upclosed.com)

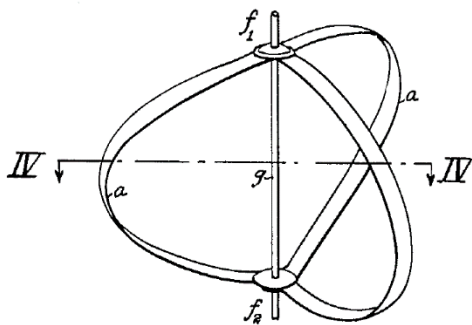


Abbildung 24: Skizze des Darrieus-Rotors, die sich im US-Patent befindet. (USA Patentnr. 1835018, 1931)



Abbildung 23: Darrieusrotor (Strömung und Kräfte) (Goellner, 2017)

Im ruhenden Zustand müssen Darrieus-Rotoren angeworfen werden um sie in Bewegung zu bringen. Bei kleinen Anlagen kann dies mit der Hand geschehen. Bei größeren (siehe Große Variante, Seite 31) geschieht das meistens mit einem Elektromotor. Eine andere Option, ist der Darrieus-Rotor mit einem Savoniusrotor (muss nicht angeworfen werden, siehe 3.2.1 Widerstandsläufer, Seite 28) zu kombinieren.

Varianten

Große Variante



Abbildung 25 Darrieus-Rotor („éole“) im Windpark „Le Nordais“ in Québec

Die größte jemals gebaute Windkraftzentrale mit vertikaler Drehachse ist „éole“. Er ist 1983 in Cap-Chat, Québec, gebaut worden. Der Rotor hat eine Höhe von 96 m, der Durchmesser beträgt 64m. Die Gesamtfläche im Wind ist 4000m² groß. Die maximale Geschwindigkeit, die die Anlage theoretisch ertragen konnte betrug 62 m/s (= 223,2km/h). Das Park war ein Pilot-Projekt, sollte diesen Zustand jedoch nie verlassen: 1992 wurde der Rotor von einem Sturm so viel beschädigt, dass das Projekt stillgelegt worden ist. Heute ist die Vertikal-Achs-Anlage nur noch eine Touristenattraktion.

H-Darrieus-Rotor



Abbildung 26 H-Darrieus-Rotor der einzigen noch existierenden Großanlage in Dülmen Rorup (Stahlkocher, 2007)

Der H-Darrieus-Rotor unterscheidet sich von der klassischen Variante durch die, parallel zur Drehachse, an Tragarme befestigte, angeordnete Blätter. Dies hat zur Konsequenz, dass die Blätter nicht am Rotor oben und unten zusammenlaufen, und stattdessen, wie von der Seite sichtbar, ein H formen, woher auch der Name.

H-Darrieus-Rotoren, haben gegenüber ihrer klassischen Variante das Vorteil, dass alle Bereiche eines Blattes sich gleich schnell bewegen. Dieses hat zur Konsequenz, dass auch sie keine Anfahrhilfe braucht. Hinzu kommt, dass für die gleiche wirksame Fläche, mit weniger Material, ein höherer Leistungsbeiwert erzielt werden kann.

Nichtdestotrotz existiert aber nur noch eine einzige Großanlage, die als H-Darrieus-Sorte bezeichnet werden kann.

Die H-Darrieus-Rotor-Technik ist aber nicht tot. Fairwind, ein belgischer Start-up, der während der CES in Las Vegas besondere Aufmerksamkeit bekam, hat eine kompakte Variante entwickelt. Diese Variante ist vor allem für kleine und mittlere Firmen, sowie für Bauernhöfe geeignet. 2018 hat Fairwind rund zwanzig Anlagen geliefert, die jeweils eine Leistung von 10 kW bei dem kleinen Modell, resp. 50 kW bei dem großen Modell haben. Eine Anlage kostet 100'000€ (klein) resp. 190'000€ (groß) und ist nach sechs bis acht Jahre rentabel.⁷

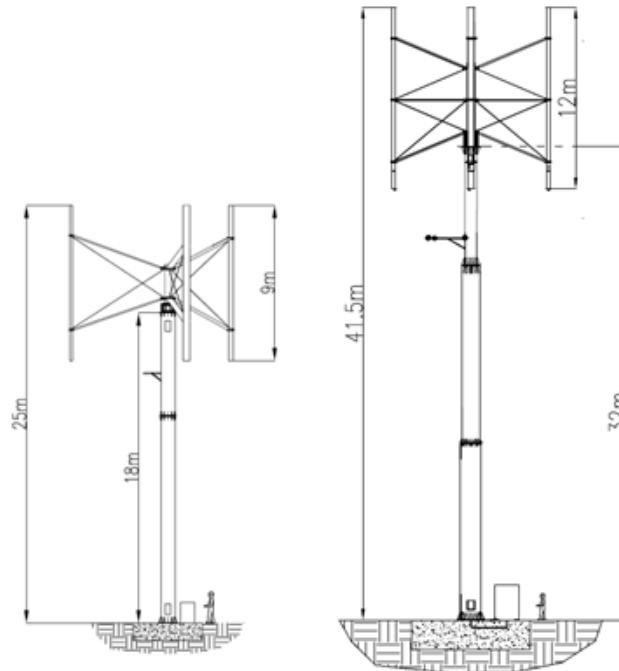


Abbildung 27 Die zwei verschiedene Modelle der Firma Fairwind nebeneinander. (Fairwind, 2019)

Nachteile der Darrieus-Rotoren

Ein großes Vorteil - die Anlage muss nicht nach dem Wind gedreht werden - ist gleichzeitig auch ein Nachteil: die Anlage kann nicht aus dem Wind gedreht werden. Obwohl Darrieus-Rotoren weitaus Sturmbeständiger sind als konventionelle Windkraftanlagen (Cordier & Roux, 2014) gibt es auch für diese eine Limit. Die fehlende Möglichkeit die Anlage aus dem Wind zu drehen verhindert, dass der Rotor bei Sturm gedreht werden kann um ihm außer Betrieb zu nehmen (was bei Kleinanlagen normalerweise gern gemacht wird). Zudem muss es gesetzlich, eine von der mechanischen Bremse unabhängige Möglichkeit geben, um zu verhindern, dass das der Rotor „Durchdreht“, das heißt, dass der Wind zu schnell für den Generator ist. In einer klassischen Anlage können hierzu die Blätter entsprechend gedreht werden. Da dies bei den Darrieus-Rotoren nicht möglich ist wird hier ein überdimensionierter Generator eingebaut (was dafür sorgt, dass Darrieus-Anlagen öfters mit Windgeschwindigkeiten von über 220 km/h

⁷ (Bembaron, 2018)

klarkommen, und deshalb in sehr windige Gegenden genutzt werden können (Cordier & Roux, 2014)), was aber auch die Kosten erheblich erhöht. Des Weiteren, auf die projizierte Rotorfläche bezogen, ist bei der klassischen Variante zudem ein Leistungsbeiwert (siehe Die kinetische Leistung, unten) von nur 30 bis maximal 40% erreichbar. Konventionelle Rotoren überschreiten dagegen die 50%.

Windkraftanlage mit horizontaler Achse



Abbildung 28 Eine Windkraftanlage mit horizontaler Achse im Windpark in Heinerscheid (Tomateus, 2006)

Eine Windkraftanlage mit horizontaler Achse besteht aus einem Mast mit einem Propeller der senkrecht zum Wind befestigt ist.

Schnelllaufzahl

Die Schnelllaufzahl gibt das Verhältnis zwischen der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors (die Geschwindigkeit an der äußeren Kante, wo man den Umfang messen würde) und der Windgeschwindigkeit dar. Hat man einen großen und einen kleinen Rotor mit gleicher Schnelllaufzahl, dann scheint der kleine Rotor langsamer zu drehen. Ein üblicher Dreiblattrotor hat heutzutage eine Schnelllaufzahl von 7 bis 8, d.h. die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors ist sieben bis acht Mal so hoch wie die Windgeschwindigkeit.

Die kinetische Leistung

Die Leistung des Windes in einem rechnet man folgend:

$$P_{kinetisch} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot a \cdot S \cdot V^3$$

Mit:

$$V = \frac{V_{Windrad}}{a} \quad 0,5 \leq a \leq 1$$

p : Luftdichte ($1,23 \frac{kg}{m^3}$ bei einer Temperatur von $15^\circ C$ und einen atmosphärischen Druck von $1,0132 \text{ bar}$)

V : Luftgeschwindigkeit

$V_{Windrad}$: Umfangsgeschwindigkeit

S : Fläche des Rotors, die vom Wind angetrieben wird in m^2

Mit einem Windrad kann man allerdings nur ein Teil dieser Leistung benutzen, da die Windströmung, nachdem er entlang dem Rotor geflossen ist, keine Nullgeschwindigkeit haben kann (es kann also nicht alles genutzt werden, wenn dies der Fall wäre, würde der Wind „anhalten“).

Die theoretische maximale Leistung (Formel von Betz)

Die Formel von Betz ist ein physikalisches Gesetz, welches besagt, dass die theoretisch maximale Leistung einer Windkraftanlage, $\frac{16}{27}$ ($\cong 60\%$) von der mechanischen Leistung (die der Wind ohne den bremsenden Rotor durch dessen Rotorfläche, senkrecht zur Windrichtung transportieren würde) entspricht. Diese Zahl wird in der Fachliteratur Leistungsbeiwert genannt, ist die theoretisch höchstmögliche und wurde durch Albert Betz entdeckt. In seinem Buch „Wind Energie“ (1926) bewies er sie erstmals. Er nannte sie *Leistungsziffer* und erklärte, dass die maximale nutzbare Leistung $\frac{16}{27}$ der kinetischen Leistung entspricht.

Hierausfolgend kann man die theoretische maximale Leistung rechnen:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot S \cdot V^3 \text{ was folgende Formel gibt}$$

$$P_{max} = 0,37 \cdot S \cdot V^3 \text{ wo dann}$$

- P = Leistung (in Watt)
- S = die Fläche der Turbine (in m^2)
- V = die Windgeschwindigkeit (in m/s)

Diese Formel kann bei Windturbinen jedes Typs angewendet werden, um die praktische Maximalleistung dann allerdings herauszufinden, muss P_{max} noch mit einem Koeffizienten multipliziert werden. Dieser Koeffizient ist von dem jeweiligen Modell, sowie dem Aufstellort abhängig, befindet sich aber in der Regel zwischen 0,20 und 0,70.

Größe der Windräder

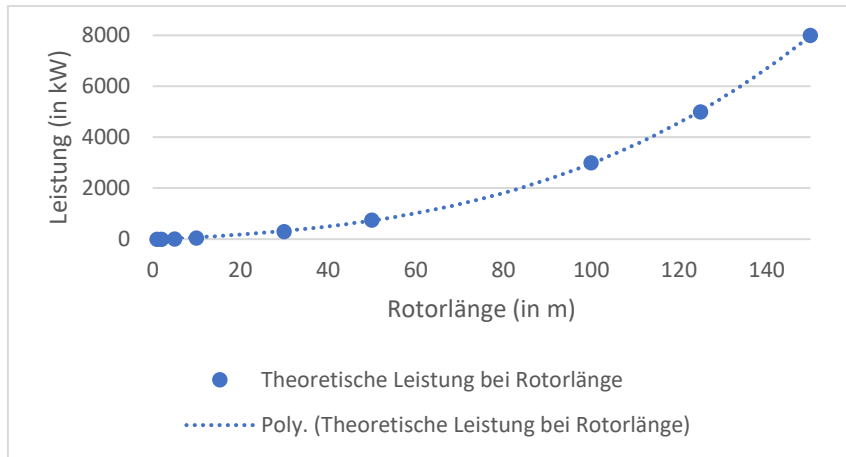


Abbildung 29 Die Grafik zeigt die Theoretische Leistung in Funktion von der Rotorlänge. Die Rotorlänge hat einen großen Einfluss auf der Leistung. (Fine Media, 2019)

Die Länge des Blattes bestimmt die Leistung auf exponentieller Weise: Je größer das Blatt, desto leistungsfähiger die Anlage. Die obere Grafik (Abbildung 29) veranschaulicht die theoretisch erreichbare Leistung.

Die Rotorlänge beeinflusst auch die Rotationsgeschwindigkeit.

Durchmesser (m)	1	2	10	50
Rotationsgeschwindigkeit (Umdrehungen/Minute)	2000	1000	200	40

Abbildung 30 Ein größerer Rotor verkleinert die Rotationsgeschwindigkeit auf drastischer Weise. (Fine Media, 2019)

Natürlich muss bei einem größeren Blatt auch ein höheren Mast genutzt werden - der Mast muss schließlich länger als das Blatt sein (sonst stößt das Blatt bei der Umdrehung am Boden).

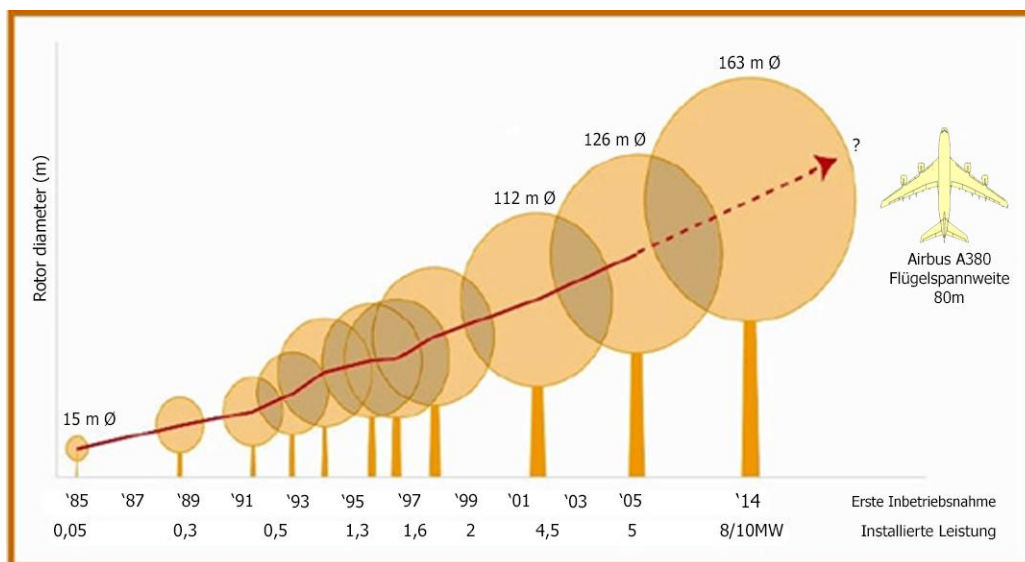


Abbildung 31 Mit der Zeit vergrößerten sich die Windräder und mit ihnen die installierten Leistung (für Meeresanlagen angegeben)

Generell ist die Blattlänge zwischen 50 und 65% der Mastgröße. Anlagen mit größeren Mästen

produzieren also nicht nur wegen des Windes der mit der Höhe zunimmt, mehr Strom, sondern sie haben auch wegen des größeren Rotorblattes eine höhere Leistung.

Größere Anlagen können bedeutend mehr Strom produzieren, und deshalb ist der Trend immer noch größer und größer. Das größte Windrad (für an Land) der Firma Vestas, der derzeit größte Windkraftanlagenhersteller, ist der Typ V162-5.6 MW. Diese Anlage hat einen Rotordurchmesser von 162 und der Aufbau des Prototyps ist für Mitte 2020 geplant (Wikipedia D. f., 2019). Die Anlage hat eine Leistung von 5,6 MW, was etwas mehr als die Hälfte der Meeresanlage gleicher Größe ist. Im Meer lohnt es sich, wegen den höheren Windstärken, Anlagen mit gleicher Rotorlängen mit viel leistungsfähigere Generatoren auszustatten.

In Frankreich gibt es in Yonne (an Land) ein Projekt mit ähnlichen Rädern eines anderen Herstellers gleicher Größe. 2020 sollen 25 Anlagen mit einer Höhe von 242m gebaut werden. Das Projekt ist allerdings bei den Bürgern, wegen der Landschaftsveränderung auf besonders viel Kritik gestoßen. Wahrscheinlich setzt es sich trotzdem durch, da die Anlagen ordentlich Geld in die Gemeindekassen bringen. Es wären die größten Anlagen Frankreichs.

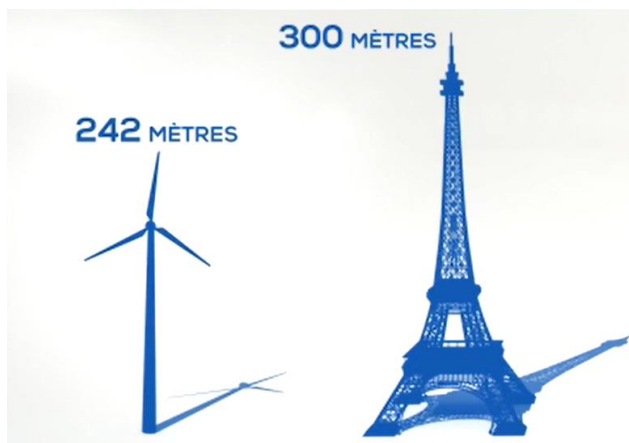


Abbildung 32 Die Rotoren der Windräder in Yonne kommen in Punkto Höhe schon nahe an der Spitze des Eiffelturms (Coudray, 2019)

Anzahl der Rotorblätter

Um einen maximalen Leistungsbeiwert zu erreichen, muss man die Schnelllaufzahl an der Geometrie sowie an der Anzahl der Rotorblätter anpassen. Herausgefunden wurde, dass die ideale Schnelllaufzahl bei Einblattrotoren bei 15, Zweiblattrotoren bei 10, sowie Dreiblattrotoren 7 bis 8 liegen.

3.2.3 Nachteile von Windenergie

Die Windenergie hat auch Nachteile: Windräder liefern - wie ein Großteil der erneuerbaren Energie - zumal in ländlichen Regionen (wie Luxemburg) nicht kontinuierlich Strom. Gibt es keinen Wind, stehen sie still. Zeitweise kann das sogar einige Stunden am Stück sein (Adler, 2015). Je nach Anlage gibt es eine minimal erforderliche Windgeschwindigkeit, die

üblicherweise um die 3 Meter pro Sekunde ist ($\cong 11 \text{ km/h}$). Pumpspeicherwerke können aushelfen (siehe 3.1.2 Pumpspeicherkraftwerk, Seite 19). Nichtsdestotrotz ist eine Stromversorgung ausschließlich durch (lokale) Windräder deshalb aber nicht zu verwirklichen (Frimmer, 2012).

3.2.4 Kritik

Gesundheitliche Schäden

Es gibt auch immer wieder Kritik bei den angrenzenden Wohngebieten. Windräder machen Lärm und haben bewegende Schatten. Laut der WHO sei „Lärm von Windenergieanlagen oberhalb dieses Wertes [45 Dezibel] mit schädlichen gesundheitlichen Auswirkungen verbunden“ (Gassmann, 2018). Dieser Pegel von 45 Dezibel entspricht etwa einem Flüstern.

„They say the noise (from windmills) causes cancer“, sagte der amerikanische Präsident Donald Trump am 2. April 2019 in einer Rede zu seinen Republikanischen Anhängern (Greenberg, 2019). Diese Aussage scheint allerdings mehr auf Mythen als auf Fakten basiert zu sein: noch keine Studie hat einen Zusammenhang zwischen Krebs und Windräder gefunden (Ries, 2013).

Doch auch der nichthörbare Bereich sei gefährlich: die These, der Infraschall von Windrädern verursache gesundheitliche Probleme (worunter Schlaflosigkeit, Kopfschmerzen und Konzentrationsstörungen) bei Anwohnern ist weitverbreitet (Wetzel, 2018). Diese These ist aber noch längst nicht bewiesen: eine Studie des Umweltbundesamtes kommt sogar zu dem Ergebnis „dass die Infraschallbelastung in Entfernungen über 700m kaum davon beeinflusst wird, ob eine WEA [Windenergieanlage] in Betrieb ist oder nicht“ (M. Bunz, 2016). Eine Studie aus dem Jahr 2015, die Steven Cooper von der Acoustic Group im Auftrag des australischen Windparkbetreibers Pacific Hydro durchgeführt hat kommt zu dem Schluss, dass es wohl eine Verbindung „zwischen den Symptomen [Kopfschmerzen, Herzrasen oder Druckgefühlen in Kopf oder Brust] der Anwohner und [...] der Drehgeschwindigkeit der Rotorblätter“ gibt, der Schalldruckpegel der Anlage „hatte hingegen keinen Einfluss auf die Symptome“ (Speicher, 2017).

Eine Gefahr für die Natur

Zudem fielen laut dem Spiegel jährlich mehr als 100 000 Vögel den Windrädern zu Opfer, was laut Experten unvermeidlich bliebe. (Frimmer, 2012). Die französische Vogelschutzliga (LPO) dagegen, kommt bei ihrer Studie allerdings zu dem Schluss, dass der Effekt von Windrädern auf der Vogelpopulation sehr von dem Standort abhinge, doch alles in allem äußerst gering sei (Boucher, 2017). Die LPO hat während einem Jahr 197 Monitoring-Berichte, die sich mit insgesamt 1065 Windrädern über 142 Windparke befassten, kompiliert und analysiert. Ihre Schlussfolgerung sei, dass ein Windrad, variierend vom Park, im Durchschnitt zwischen 0,3 und

18,3 Vögel pro Jahr tötet (LPO France, 2017). Diese Anzahlen haben auf die Population der meisten Vogelarten keinen großen Einfluss. Ein Windrad töte schließlich weniger Vögel als eine Katze (Prof. Arlettaz, 2017). Doch für die Arten, denen es schon schlecht ginge, wie z.B. der Bartgeier, könne laut Raphaël Arlettaz, Professor an der Universität Bern via demographischer Modelle festgestellt werden, dass eine kleine Erhöhung der Sterberate, fatale Konsequenzen für ihre Zukunft haben kann (Prof. Arlettaz, 2017). FNE (France nature environnement) hat EDF sogar angeklagt, als in ein Windpark 33 Rötelfalken erschlagen worden sind (Veyssié, 2017). Rötelfalken gelten als bedroht und sind geschützt (Wikipedia D. f., Rötelfalke - Wikipedia, 2019). Der Windpark befindet sich zwischen zwei Naturschutzzonen. Doch auch der Professor sieht die Windräder nur als ein weiterer Faktor, der sich zu den schon existierenden Fallen, des Transports (Autos sowie Züge töten auch Vögel) und des Fensters (Vögel sehen manchmal die Fenster nicht, und fliegen dann gegen ihnen) hinzufügt. Vergleicht man die Anzahl tote Vögel, gestorben aufgrund einer Windkraftanlage dann mit der Vogelsterberate verursacht durch einen Hochspannungsmast, erscheint die Diskussion nahezu lächerlich (Boucher, 2017). Eine Studie schätzte die Sterberate in den Niederlanden bei einer Hochspannungslinie zwischen 163 und 217 Tote pro Kilometer pro Jahr. In den USA spreche man sogar zwischen 130 et 174 Millionen Vögel.

Des Weiteren könnten auch Fledermauspopulationen von Windrädern geschadet werden.

Doch um den Schaden so minimal wie möglich zu halten wird vor dem Bau immer eine Studie gemacht. So wurde zum Beispiel in Rümelingen festgestellt, dass sich hier ein europäischer Hotspot für Fledermäuse befinde. Da in solchen Umständen die Räder nicht nachts drehen dürfen, war so das Projekt vom Tisch. Interessanterweise ist jedoch das französische Öttingen zwei Kilometer weiter nicht von dem riesigen Fledermaushotspot betroffen. Die Umweltstudien dort haben bewiesen, dass die Fledermäuse Rümelingen lieber haben, was sich daraus erklären kann, dass die Windräder nicht am Waldrand, sondern mitten auf Feldern geplant wurden. (Anen, 2019)

Richtet ein Projekt zu viel Schaden an der Natur, wird es gestoppt.

Zerstört das Landschaftsbild

Auch verändern Windräder das Landschaftsbild. Guido Romaschewsky schreibt im *Tageblatt* der „Wildwuchs an Windkraftanlagen in den schönsten Naturräumen und Schutzzonen des Hunsrücks und der Eifel“ (Romaschewsky, 2018) sei eine „Fehlentwicklung“, und es bleibe zu hoffen Luxemburg wisse „wo auf seinem alles andere als unerschöpflichen Territorium die Verträglichkeits- und Erträglichkeitsgrenzen liegen“. Die Windräder haben dann auch einen sichtlichen Einfluss auf das Landschaftsbild, und Bürgerrechtsinitiativen sprechen immer wieder

von eine „Verspargelung“. Doch oft ist dies auch auf die Angst für Landschaftsveränderung zurückzuführen (gluecktuning, 2018). Stehen die Räder einmal werden sie dann als Teil ihrer Umgebung (Coudray, 2019) und in manchen Fällen Teil der Umgebungsidentität (Anen, 2019) angesehen.

3.2.5 Windenergie in Luxemburg

Insgesamt gibt es heute (2019) in Luxemburg 14 Windparks, mit einer Leistung von insgesamt 124,55 MW verteilt über 67 Anlagen. Die Anzahl an Windrädern ist in der letzten Legislaturperiode verdreifacht, und eine weitere Erhöhung ist vorgesehen (siehe unter Zukunftspläne, 4.2 Das Zielszenario, Seite 52).

Die meisten Windparks liegen aktuell im Norden (Heinerscheid, Heiderscheid und Kehmen, Weiler, Hosingen und Putscheid, Roullingen und Goesdorf, Binsfeld, Derenbach, Stockem, Boxhorn, Doennange, Reimberg) und es gibt noch einige im Osten (Mompach, Remich) (Wikipedia D. f., Liste von Windkraftanlagen in Luxemburg - Wikipedia, 2018). Es gab auch schon Pläne für ein Windpark im Süden, diese sind verworfen worden (siehe Seite 39) aber schon durch neue ersetzt. So sollen in Redingen/Attert, Ell und Rambruch sechs Windräder errichtet werden (Vacon, Luxemburg investiert Millionen in neue Windparks - L'essentiel, 2018). Das Zentrum wird auch nicht vergessen: im „Parc Miersch“ zwischen Mersch und Lintgen sind ebenso 6 Windanlagen geplant (Vacon, Luxemburg investiert Millionen in neue Windparks - L'essentiel, 2018). Der Staat investiert nicht selbst in den Windparks, er begleitet nur privaten Firmen (Gira, 2015). Die Betreiber sind für die meisten Windparks die Société électrique de l'Our (7 von den 14-mal), sowie oft eine extra für das Windpark erstellte Gesellschaft. An drei Windparks ist zudem die Spuerkees beteiligt.



Abbildung 33 Windpark Burer Bierg (SEO Société électrique de l'Our, 2019)

3.3 Sonnenenergie

„Ich werde versuchen die Zahl der Fotovoltaikanlagen zu verzehnfachen [...]

Ich küsse jeden, der bereits eine Solaranlage auf seinem Dach hat.“

(Energieminister Claude Turmes im *Tageblatt* (Schmit J.-P. , 2019))

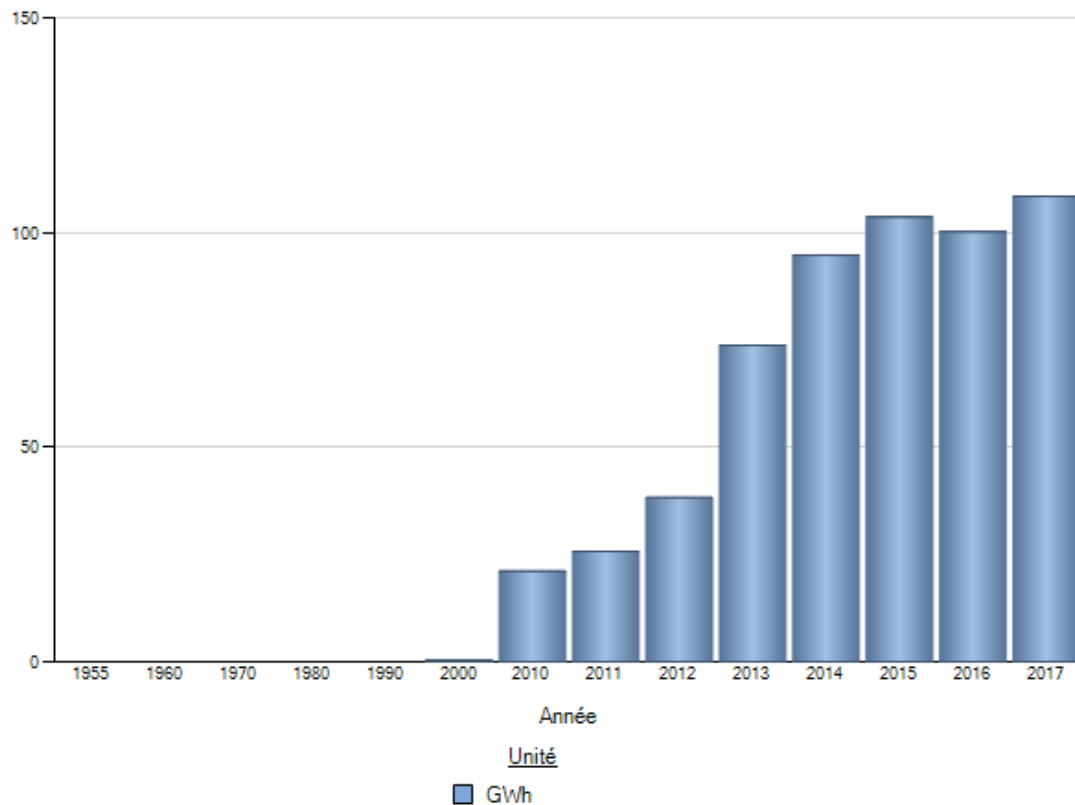


Abbildung 34 Die in Luxemburg produzierten Sonnenenergie. (Statec, 2019)

Heute stammen etwa 22% der in Luxemburg produzierten erneuerbaren Elektrizität (100 GWh) von Solarzellen (Oly, 2019). Seit 2000 wird in Luxemburg mit Solaranlagen Strom produziert. Mit 0,04 GWh, war damals die Produktion eher bescheiden. Doch bis 2010 hat sich der hergestellte Sonnenstrom auf 21,15 GWh um ein Vielfaches erhöht. In den kommenden Jahren, ist bis 2012 die Solarstromproduktion langsam bis auf 38,28 GWh gestiegen. Dann wurde von 2012 bis 2013 auffallend viel Solarenergie erzeugt: in dem Jahr hat sich die Anzahl Energie fast verdoppelt. Danach steigt die Solarenergieherstellung noch um 21 GWh auf 94,74 GWh, in den drei Jahren danach ist kaum ein Anstieg zu merken. 2016 wird sogar fürs erste Mal etwas weniger als im Vorjahr produziert. 2017 betrug der Solarenergieertrag 108,46 GWh, die größte Anlage mit 1,35 Megawatt stand auf dem Gymnasium in Redange-sur-Attert (Enkhardt, 2018). Es scheint, dass sich der Solarenergieertrag auch im sonnigen Jahr 2018 nicht erhöht hat (Oly, 2019). Da hat die im September 2017 gestartete Kampagne zur Förderung von Solarenergie (Ministerium für nachhaltige Entwicklung und Infrastrukturen, 2017) wohl (noch) nicht gewirkt. Doch vielleicht

wird eine Änderung der Rahmenbedingungen mehr Effekt haben: denn derzeit müssen Photovoltaikanlagenbesitzer ihren gesamten Strom noch an Netzbetreiber verkaufen, die ihnen mit Einspeisevergütungen bezahlen. Diese Vergütungen sind höher, als der Preis den die Besitzer für den Strom selbst bezahlen müssten. In Zukunft soll es nicht nur möglich sein, dass Solarenergie-Produzenten ihren Strom endlich zum Teil selbst nutzen dürfen, sondern soll es auch möglich sein, dass Nachbarn sich zusammentun um eine Ökostrom-Gemeinschaft „Communauté énergétique“ zu gründen, worin sie gemeinsam erzeugten Strom selbst verbrauchen können. Hiermit entfallen auch die Steuern, die bis jetzt auf dem Eigenverbrauchsanteil gezahlt wurden (Vacon, Luxemburg soll zum «Prosumer»-Land werden - L'essentiel, 2018). Parallel wurde auch die erste staatliche Ausschreibung für die Errichtung von Photovoltaik-Großanlagen vor. Ein Projekt mit einer Mindestleistung von 500 Kilowatt, das auf einem Industriegelände oder auf ein Gebäudedach errichtet wird konnte eingereicht werden. Das neue Klima- und Energieplan (siehe 4 Zukunftspläne, Seite 49) sieht auch einen konsequenten Einsatz auf Sonnenenergie vor. Energieminister Turmes spricht von einer Verzehnfachung der Leistung (Oly, 2019).



Abbildung 35 Aufbau der Solaranlage auf dem Depot der Gemeinde Junglinster (Chantier EquiSolar 2012 - Equienercoop, 2012)

3.3.1 Funktionsprinzip der photovoltaischen Zelle

„[Eine photovoltaische Zelle] ist ein elektrisches Bauelement, das Strahlungsenergie, in der Regel Sonnenlicht, direkt in elektrische Energie umwandelt (Wikipedia D. f., Solarzelle - Wikipedia, 2019)“. Um dieses zu realisieren, nutzt sie den photovoltaischen Effekt. Dieser Begriff bezeichnet die Emission von Elektronen durch ein Material, als Folge von einer Einwirkung des Lichts (Wikipédia, Effet photoélectrique - Wikipédia, 2018).

Wie dies genau passiert hängt vom Zelltyp ab, dieses Kapitel bezieht sich auf die übliche Silicium-Solarzelle.

Halbleitermaterialien (wie zum Beispiel Silicium) haben die Eigenschaft, dass deren Leitfähigkeit durch Zufuhr von Energie, bei Solarzellen in Form von Licht, erhöht wird. Denn ist ein Halbleiter dem Licht ausgesetzt, kann der Photon - wenn er genug Energie hat - dem Gitter ein Elektron wegnehmen. An dieser Stelle entsteht dann ein „Loch“. Normalerweise findet das Elektron schnell ein anderes freies Loch, und die vom Photon gebrachte Energie findet keine Verwendung mehr.

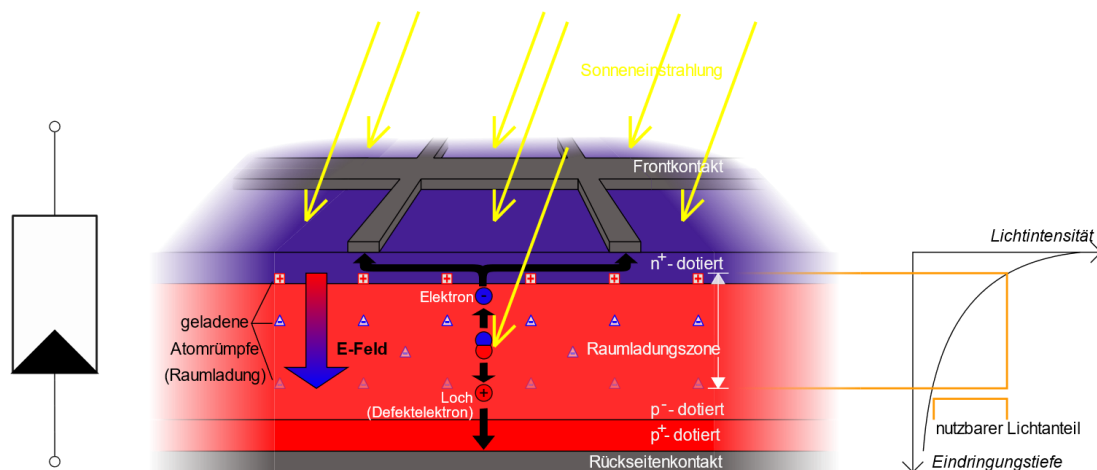


Abbildung 36 Einfallende Photonen erzeugen Elektronen und Löcher, die im elektrischen Feld der Raumladungszone des p-n-Übergangs getrennt werden. (Degreen, 2006)

Das Prinzip einer Solarzelle ist jedoch, die Elektronen und Löcher zu zwingen, sich jeweils zu einer gegenüberliegenden Seite des Materials zu bewegen, anstatt sich wieder als Ganzes zu kombinieren: so entsteht nämlich eine Potenzialdifferenz, also eine Spannung zwischen den zwei Seiten, sowie bei einer Batterie. Eine gängige Lösung, um selektiv Elektronen und Löcher zu extrahieren, benutzt ein elektrisches Feld mithilfe von einem sogenannten PN Übergang zwischen zwei P und N-Schicht.

Die obere Schicht der Zelle besteht aus einem sogenannten N-dotierten Halbleiter. Das heißt einen Halbleiter, wie z. B Silicium, der an manchen Stellen mit einem Fremdatom (oft Phosphor)

verbunden ist (Verhältnis 0,1 und 100×10^{-6} Fremdatomen pro Halbleiteratom), wodurch es eine negative Ladung (N-Ladung) zu viel gibt (siehe Abbildung 37).

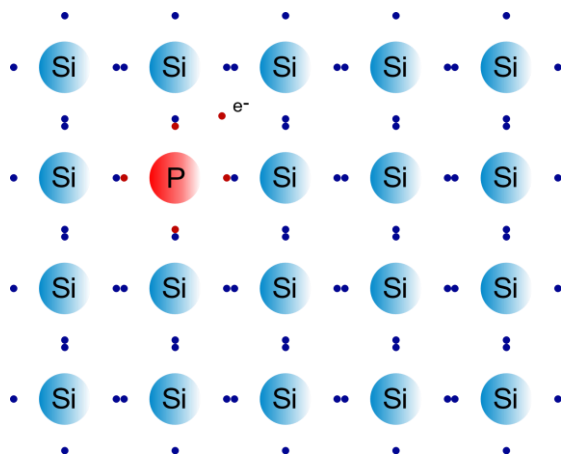


Abbildung 37 Ein mit Phosphor N-dotiertes Siliciumgitter (Guillom, 2005)

In dieser Schicht gibt es eine höhere Anzahl von freien Elektronen als im intrinsischen (d.h. nicht dotiertem) Material, weshalb die N-Dotierung als negativ gilt (Ladung eines Elektrons). Das Material bleibt elektrisch neutral, denn das Kristallnetz verträgt eine negative Ladung gut. Die untere Schicht der Zelle besteht aus einer P-dotierten Halbleitung. Diese Schicht besitzt im Schnitt also eine geringere Anzahl freier Elektronen, als das intrinsische Material. Die Elektronen sind mit dem Kristallnetz verbunden, das demgemäß positiv geladen ist. Die elektrische Leitung folgt mit den Löchern, positiv (P).

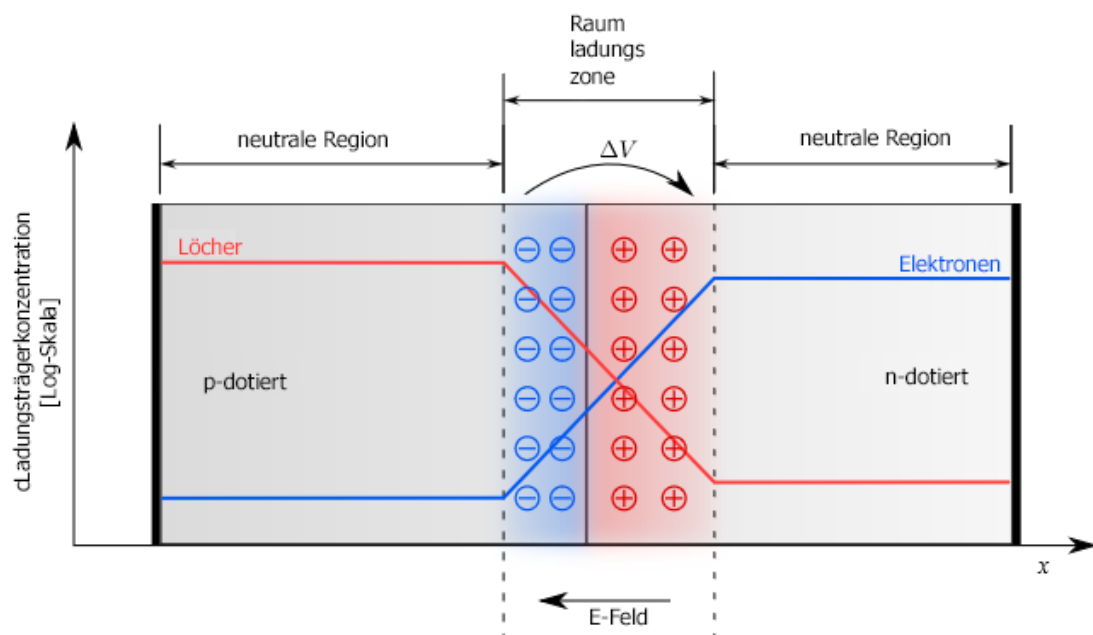


Abbildung 38 Aufbau einer Sperrschicht (Raumladungszone, RLZ) im asymmetrischen p-n-Übergang (p-Seite ist hier stärker dotiert). (Adundovi, 2010)

In dem Moment wo der P-N-Übergang geschaffen wird, verbreiten sich die freien Elektronen der N-Region in der P-Schicht. So gibt es, während der ganzen Lebensdauer des P-N-Übergangs, eine positive Ladung in der N-Region am Rande des Übergangs (da die Elektronen weggegangen sind) und eine negative Ladung in der P-Region am Rande des Übergangs (da die Löcher verschwunden sind). Dieses wird als Raumladungszone bezeichnet (RLZ) und es gibt ein elektrisches Feld zwischen beide, von N nach P. Dieses Feld macht von der RLZ eine Diode, die den Strom nur in einer Richtung erlaubt: die Elektronen können sich von der P-Region zur Region-N bewegen, aber nicht umgekehrt. Die Löcher dagegen gehen nur von N nach P.

Funktioniert die Zelle dann, löst ein Photon ein Elektron vom Gitter, wodurch ein freies Elektron so wie ein Loch entsteht. Diese Ladungsträger verbreiten sich bis zur Raumladungszone, wo das elektrische Feld dafür sorgt, dass sie sich jeweils in gegenüberliegender Richtung bewegen. Die Elektronen gehen zur Region N (die zum negativen Pol wird), währenddem die Löcher sich zur P-dotierten Schicht bewegen (die zum positiven Pol wird). Dieses Phänomen ist effizienter in der RLZ, da die Ladungsträger (Elektronen oder Löchern) sofort von dem elektrischen Feld (oder in unmittelbarer Nähe zu die RLZ) getrennt werden: wenn ein Photon ein Elektron-Loch-Paar schafft, trennt dies sich und hat nur wenig Chance um das jeweilige Gegenüber wieder zu treffen. Wenn die Schaffung des Paares allerdings weiter vom Übergang entfernt passiert, hat das neue Elektron (respektiv das neue Loch) eine große Chance sich wieder zu kombinieren, bevor es die N-Zone (für das Loch P-Zone) erreicht. Bleibt aber zu beachten, dass die RLZ sehr dünn ist, wodurch es nur wenig Sinn macht, die Zelle sehr dick zu gestalten.

Aus elektrischer Sicht ist eine Photovoltaische Zelle Äquivalent an einem Stromgenerator, an dem eine Diode angeschlossen ist.

3.3.2 Bisherige Entwicklung

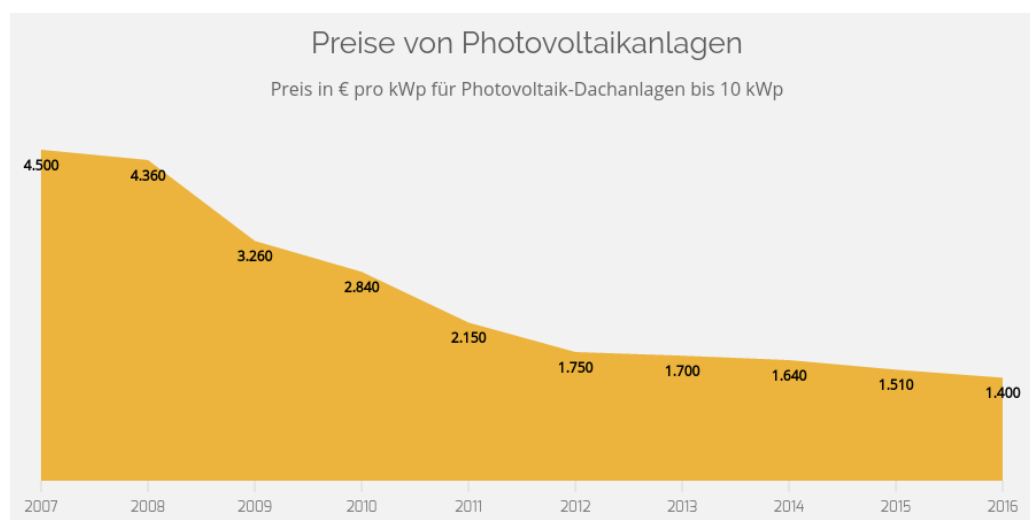


Abbildung 39 Innerhalb von einem Jahrzehnt hat sich der Preis von einer Photovoltaikanlage deutlich verringert (Schmitz, 2019). Die Grafik zeigt der Preis in Deutschland.

In den letzten Jahren sind die Preise für Solarenergie deutlich gefallen, was darauf zurückzuführen ist, dass China anfang in großen Mengen zu produzieren. Heutzutage kann man dann auch sagen, dass für neue Anlagen, „die Photovoltaik, wie auch die Windenergie, die billigste Form der Energiegewinnung [sind]. Das gilt auch für Europa und Luxemburg“ (Siebentritt, 2018) (Wissenschaftler an der Uni.lu).

Dies hatte zur Folge, dass obwohl die Investitionen in der Solarenergie 2016 im Vergleich zu 2015 um 34% gesunken sind, die zugebauten Kapazitäten gestiegen sind: wurden 2015 weltweit 56 Gigawatt installiert, waren es 2016 75 Gigawatt. Es ist auch durchaus realistisch, dass dieser Preisverfall sich fortsetzt. First Solar, der zweitgrößte Photovoltaikmodulen-Produzent (Wikipedia T. f., First Solar - Wikipedia, 2019), hat sich zum Ziel gesetzt bis 2020 seine Produktionskosten auf 0,25€ pro Watt zu reduzieren. 2017 lagen die Kosten noch je nach Technologie zwischen 0,40€ und 0,55€ (Diermann, 2017).

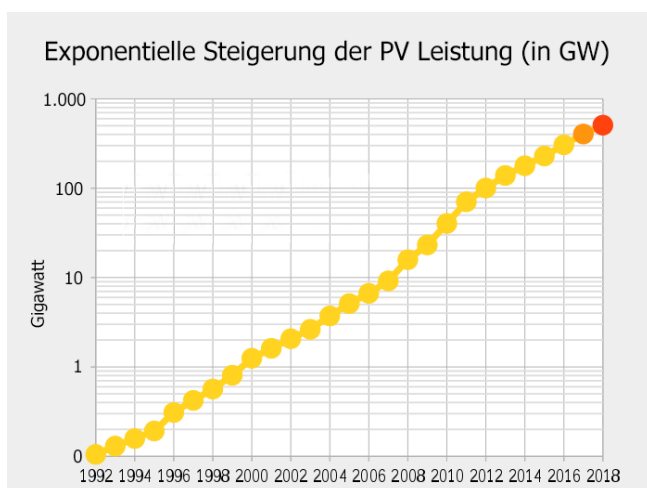


Abbildung 40 Die exponentielle Steigerung der weltweit installierten Photovoltaikleistung auf einer Halblogarithmischen Skala dargestellt (Rfassbind, 2014)

Dies hat zur Folge, dass der Preis zu dem Solarstrom verkauft werden kann auch gesunken ist. Kostete 2008 noch ein kW Solartstrom 0,50 € (Niemann, 2008), sind es 2017 nur noch 0,14€ und Experten rechnen damit, dass sich dieser Preis noch mal halbiert bis 2030 (Forster, 2017). In Abu Dhabi gaben es 2017 schon zwei Firmen, die ihren Solarstrom für nur 0,021 € verkauften - Nun scheint dort allerdings auch mehr Sonne.

3.3.3 Zukunft

In Zukunft wird weiterhin viel auf die Photovoltaiktechnologie eingesetzt, denn Forscher sehen ein großes Potenzial.

In der Schweiz haben Forscher eine Methode gefunden um im Winter mehr Strom mit Sonnenenergie zu produzieren. Dies löst ein großes Problem, denn im Winter wird am meisten Strom benötigt, gleichzeitig sind die Sonnenkollektoren aber am unproduktivsten.

Im Winter scheint die Sonne kürzer, aber auf niedrigeren Höhe. Nebel und Wolken verhindern jedoch oft, dass Sonnenstrahlen durchscheinen.

Die Idee ist, im Gebirge, auf großer Höhe die Sonne zur Stromproduktion zu nutzen. Die ersten Resultate sind vielversprechend (je höher man ist, desto besser sind sie). Auf 2.000 oder 2.500 Meter Höhe hat man mehr Chance über die Wolken zu sein. Folge ist eine bessere Insolation. Zusätzlich kommt noch, dass der Schnee Sonnenstrahlen reflektiert. Mit richtig, vertikal positionierten Sonnenkollektoren gelingt es die Energieproduktion um 20% zu steigern. Aktuell wird in Davos noch experimentiert. Die Forscher haben gerechnet, dass die Schweiz 45 km² an Photovoltaikanlagen bräuchte, um die Hälfte der Nuklearenergie, die heute 36% der Energieversorgung der Schweiz deckt, zu ersetzen (Garin, 2019).

Es gibt auch noch weitere Projekte, um Photovoltaikanlagen effektiver zu nutzen. So wurde 2014 in den Niederlanden ein erster Solarradweg (SolaRoad) gebaut. Der 100 Meter lange Radweg ist mit Photovoltaik-Panelen (die sich unter eine Glasfolie befinden) ausgestattet, und produziert (mit 9.800 kWh pro Jahr) genügend Strom um drei Personen damit zu versorgen (Oé, 2017). In Frankreich hat eine Firma (Wattway) sich auf ähnliche Solarstraßen spezialisiert, mit dem Unterschied, dass die Panels sich auf bestehende Fahrbahnen anbringen lassen. Laut dem ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) wäre 1 km Sonnenstraße (Wattway) schon genug um beispielsweise die gesamte öffentliche Beleuchtung einer 5.000 Einwohner-Stadt zu versorgen.



Abbildung 41 Die Sonnenstraße von Wattway in Chambéry wurde im Juni 2018 eingeweiht (Robert, 2018)

Dass amerikanische Ehepaar Brusaw errechnete, dass Amerika dreimal so viel Strom produzieren könnte als es verbraucht, wenn es alle Straßen mit Solarpanelen ausstatten würde.

Für Luxemburg kommt ein Solarradweg allerdings nicht infrage. Der Infrastrukturminister François Bausch teilt in seiner Antwort zu einer entsprechenden parlamentarischen Frage mit, für Luxemburg sei dies nicht interessant. Straßen-Photovoltaik-Module produzieren 30% weniger Strom als die auf den Dächern montierten Module. Des Weiteren ist eine Photovoltaikstraße erheblich teurer als eine normale Straße (Oé, 2017).

3.3.4 Kritik an Sonnenenergie

In den letzten zehn Jahren, hat sich viel verändert, und ein ehemaliges wichtiges Argument gegen die Solarenergie ist dann auch nicht mehr gültig: Denn Sonnenenergie ist nicht mehr teuer. 2008 schrieb Dr. Lutz Niemann noch „[es bringe] nur zusätzliche Kosten ohne jeglichen Nutzen, denn bei Sonnenschein muß der immer zur Verfügung stehende billigere Strom zurückgefahren werden, und [...] der teurere Solarstrom verwendet werden. Das ist unsinnig!“ (Niemann, 2008). Heutzutage ist eher das umgekehrte der Fall, der Sonnenstrom ist so billig, dass die Strombörse Epex Spot, schon in der ersten Hälfte 2018, wegen dem vielen Solarstrom ganze 104 Stunden, Strom zu einem negativen Preis verhandelte. Bei einem negativen Preis wird der Verbraucher dazu bezahlt um Strom abzunehmen. Dies ist auch daran zu verdanken, dass viele konventionelle Kraftwerke sich noch nicht auf den Produktionsschwankungen der Sonnenenergie eingestellt haben (Manuel Köhler, 2018).

Sonnenenergie hat allerdings das Problem, dass sie nur zur Verfügung steht, wenn die Sonne scheint. Am 24. Januar 2018, ein wolkenverhangener, düsterer und nahezu windstiller Wintertag, musste in Deutschland darum auf 90 % Kohle-, Gas- und Atomkraftwerke umgestellt werden. Das hatte zur Konsequenz, dass der Strompreis zeitweilig auf über 160 Euro pro Megawattstunde stieg, was viermal so viel als der Durchschnittspreis ist (Gorgs, 2017).

Sonnenenergie kann nicht immer dann produziert werden, wenn sie benötigt werden, doch auch da gibt es Entwicklungen um mehr Sonnenenergie im Winter zu nutzen (siehe Zukunft Seite 46). Zudem können Pumpspeicherwerke (siehe 3.1.2 Pumpspeicherkraftwerk, Seite 19) Produktionsunterschiede ausgleichen. In Kalifornien, wo an sonnigen Tagen 50% des gesamten Verbrauchs mit Sonnenenergie gedeckt wird, wird zurzeit der Hoover-Damm zum Pumpspeicherwerk umgebaut, um den Staat nachts mit Strom zu versorgen. Denn heute müssen klassische Kraftwerke oft nachts einspringen.

4 Zukunftspläne für Luxemburg

Am 27. Februar 2019 präsentierten der Minister für Umwelt, Klima und nachhaltige Entwicklung, Carole Dieschbourg und der Energieminister, Claude Turmes während einer gemeinsamen Pressekonferenz die Ziele und Leitlinien des neuen Klima- und Energieplans, welcher die Ziele Luxemburgs im Bereich der nachhaltigen CO₂ Reduktion und die Energieeffizienz im Zeithorizont 2030 definiert.

Da der definitive Plan zurzeit noch nicht vorlag (geplant ist das der Ende Dezember 2019 vorliegt (Oly, 2019)), ist das folgende Kapitel auf dem Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg (2019) basiert.

Das erste Ziel betrifft die Treibhausgas-Emissionen (wie z.B. Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffmonoxid (Lachgas)) für die Sektoren außerhalb des Emissionshandels. Das betrifft also nicht die Sektoren die sich mit Eisen- und Stahlverhüttung, mit Kokereien, Raffinerien, Cracker, oder Zement- und Kalkherstellung sowie mit Nichteisenmetallen befassen. Weiterhin sind Glas-, Keramik- und Ziegelindustrie, die Papier- und Zelluloseproduktion, die chemische Industrie, sowie die Mineralverarbeitende Industrie ausgeschlossen (Wikipedia D. f., 2019), da all diese Sektoren den Emissionshandel nutzen können.

Das Ziel ist die Treibhausgas-Emissionen für die restlichen Sektoren in einem Bereich zwischen 50% und 55% bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Basisjahr 2005 zu vermindern. Dieses Ziel strebt Luxemburg selbst an (ist allerdings nicht verbindlich) und ist ambitionierter als des verbindliche EU-Ziel, das eine Treibhausgasminderung für die Sektoren außerhalb des Emissionshandels von 40% bis 2030 gegenüber 2005 vorsieht (S. 21).

Ein weiteres Ziel ist, den Anteil erneuerbarer Energie (sowohl im Stromsektor, als auch im Wärmesektor, Kraftstoffsektor sowie im Transportsektor) von 11% im Jahr 2020, auf einen Bereich von 23% bis 25% bis zum Jahr 2030 zu erhöhen. Die im Entwurf gemachten Berechnungen beziehen sich alle auf das obere Ziel von 25% erneuerbare Energien (S. 22). Diese Zahl bezieht sich auf der Bruttoendenergienachfrage, das ist die Summe der sektoralen Energiebedarfe an Strom, Wärme und Kraftstoffen im Verkehr (S. 52).

4.1 Das Referenzszenario

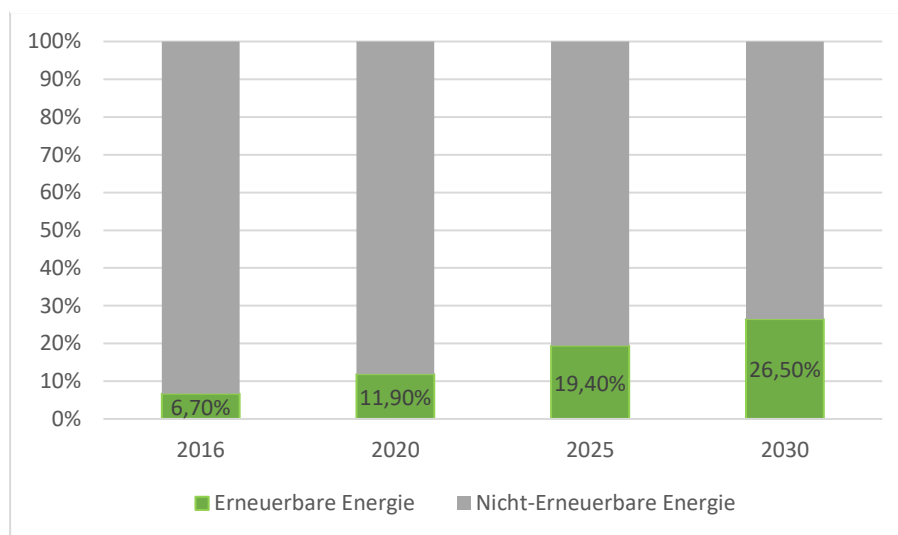
Was auch analysiert wurde, ist wie der Anteil erneuerbarer Energie in der Bruttoendenergienachfrage ohne neuen Plan aussehen würde, wenn also nur die bestehende Maßnahmen fortgeführt werden, und das sowohl auf Angebots- als auch auf Nachfrageebene (S. 52). Dieses Szenario wird als „Referenzszenario“ bezeichnet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Prognose des Erneuerbare Energie Anteils im Referenzszenario (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg, 2019, S. 53)

EE-Anteile	2016	2020	2025	2030
Stromsektor	6,7%	11,9%	19,4%	26,5%
Wärmesektor	7,3%	12,1%	15,4%	18,6%
Biokraftstoffe	4,6%	5,4%	8,1%	8,2%
Transportsektor	5,9%	-	-	14,9%
Gesamt (an BSW⁸)	5,4%	7,8%	11,2%	12,9%

Wie auf Tabelle 1 sichtbar, besteht im Referenzszenario (der Prognose nach) die Bruttoendenergienachfrage 2030 aus nur 12,9% Erneuerbarer Energie. Der Stromsektor profitiert allerdings schon von einem deutlichen Anstieg, von fast einer Vervielfachung, allerdings bleibt immer noch eine sehr große Mehrheit nicht erneuerbar.

Tabelle 2 Anteil Erneuerbare Energie im Stromsektor bei Referenzentwicklung. Auch in 2030 ist der Großteil noch immer nicht erneuerbar.

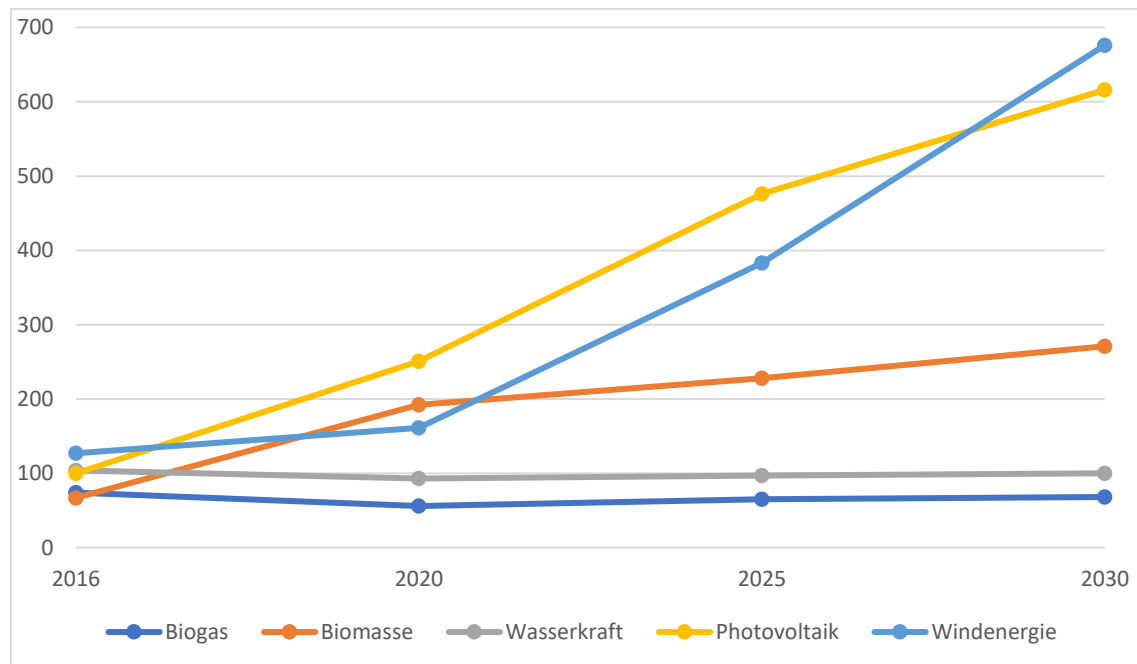


Im Elektrizitätssektor kann man die Erneuerbare Energie nach den verschiedenen Technologien mit den sie produziert wurde trennen (siehe Tabelle 3). Auffallend ist dann, dass vor allem auf Wind- und Sonnenenergie eingesetzt wird. Interessant ist, dass die Prognose sagt, dass im Jahr 2016 die Windenergie bedeutend wichtiger als die Photovoltaik sei. Von 2020 bis 2025 nehme

⁸ Bruttoendenergienachfrage (Summe der sektoralen Energiebedarfe an Strom, Wärme und Kraftstoffen im Verkehr)

allerdings die Photovoltaik die wichtigere Rolle, bis dann 2030 die Windenergie am meisten produziert werde. Weiter auch interessant ist, dass die Wasserkraft- und Biogasproduktion bis 2020 abnimmt, um danach nur langsam zuzunehmen. Unter dem Strich gebe es dann 2030 im Vergleich zu 2016 weniger Wasserkraft (-4 GWh) sowie auch weniger Biogas (-6 GWh).

Tabelle 3 Die Stromerzeugung in Luxemburg im Referenzszenario (in GWh). Daten: (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg, 2019, S. 54))



4.2 Das Zielszenario

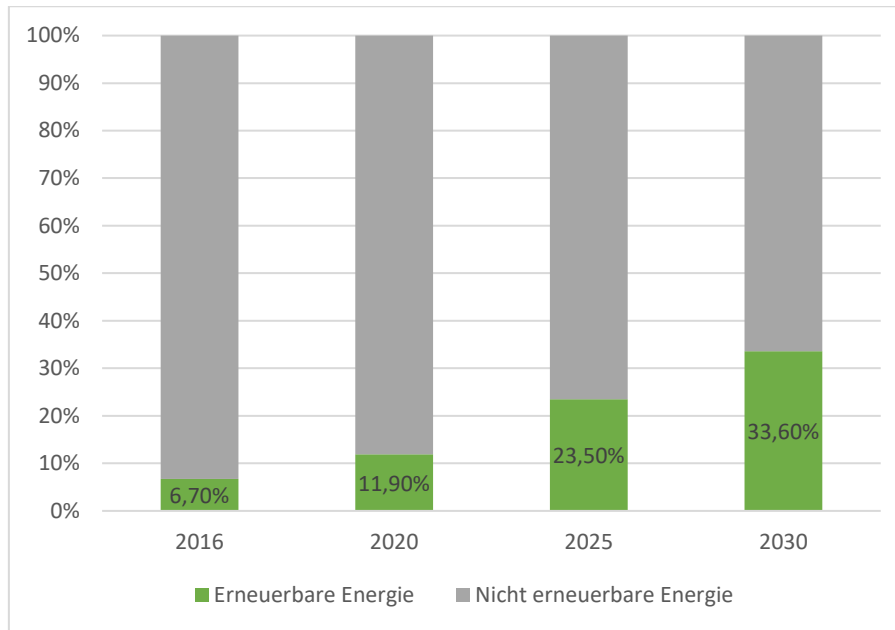
Das vorherige Kapitel behandelte das Referenzszenario. Der Entwurf legt allerdings ein anderes, besseres Zielszenario vor, in dem keine 12,9%, sondern 25% von der Bruttoendenergienachfrage im Jahr 2030 Erneuerbare Energien sind (S. 23). Des Weiteren sieht das Zielszenario die Klimaneutralität bis 2050 vor - was ein erheblicher Unterschied zu früheren Plänen ist, denn 2017, so schrieb *pv-magazine*, wären dann nur 70% des Energiemix als Erneuerbare Energien vorgesehen (Muth, 2017).

Tabelle 4 Prognose des Erneuerbare Energie Anteils im Zielszenario und Vergleich (des Jahres 2030) zum Referenzszenario. (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplanes für Luxemburg, 2019, S. 23)

EE-Anteile	2016	2020	2025	2030	Zu Referenz	
Stromsektor	6,7%	11,9%	23,5%	33,6%	+	7,1%
Wärmesektor	7,3%	13,6%	20,0%	30,3%	+	11,7%
Biokraftstoffe	4,6%	6,0%	9,1%	10,0%	+	1,8%
Transportsektor	5,9%	-	-	21,9%	+	7,0%
Gesamt (an BSW)	5,4%	8,7%	14,7%	19,8%	+	6,9%
inkl. EE-Kooperation	5,4%	11,1%	18,7%	25,0%	+	12,1%

Das Zielszenario unterscheidet sich am meisten vom Referenzszenario im Wärmesektor (siehe Tabelle 4), doch auch der Stromsektor hat im Zielszenario mehr erneuerbare Energie. Die 7,1% Extra erscheinen allerdings ein wenig bescheiden. Das Zielszenario sieht nicht vor, dass Luxemburg ganz allein auf dem angestrebten 25% der Bruttoendenergienachfrage Erneuerbare Energien kommt - alleine käme es nur auf 19,8%. Um die Fehlmenge zu decken ist eine Kooperation mit der Benelux, mit dem Pentalateralen Energieforum (Deutschland, Frankreich, Benelux, Österreich, Schweiz) und der „North Seas Energy Cooperation“. Der letzte sieht die Entwicklung eines Nordsee-Offshorenetzes (Übersee Windpark) welches zehn Ländern in der Nordseeregion (Belgien, Dänemark, Frankreich, Deutschland, Irland, den Niederlanden, Norwegen, Schweden, das Vereinte Königreich und Luxemburg) miteinander verbindet, vor (European Commission, 2019). Luxemburg würde, obwohl das Land nicht beim Nordsee liegt, auch an der Entwicklung beitragen, und könnte dann auch ein Teil der Produktion sein Eigen nennen. Es solle außerdem auch noch die Möglichkeit, von gemeinsamen Ausschreibungen von Photovoltaik-Kapazitäten mit Nachbarländern geprüft werden (S. 40).

Tabelle 5 Der Anteil Erneuerbare Energie im Stromsektor im Zielszenario



Auch im Zielszenario gibt es im Stromsektor 2030 überdurchschnittlich viel erneuerbare Energie, doch es bleibt mit 66,4% immer noch viel nicht erneuerbar, und um 2050 100% erneuerbar zu erreichen, müssen die Anstrengungen weiter steigen.

Schaut man sich dann an wo beim Zielszenario die Erneuerbare Energie herkommt, sieht man, dass es für die meisten Arten gar keinen Unterschied zum Referenzszenario gibt (siehe Abbildung 42). Biogas, Biomasse und Wasserkraft sind genau identisch. Zumal die Wasserkraftproduktion gleich ist, überrascht, da im Referenzszenario eine leichte Abnahme von heute bis 2030 vorgesehen war. Was auch überrascht, ist dass das Klimaplan keine Verbesserungen in punkto Windenergie sieht. Der Entwurf hat im Zielszenario sogar 2 GWh weniger als im Referenzszenario. Das Zielszenario sieht in punkto erneuerbarer Stromherstellung nur zwei Erhöhungen, wovon eine minimal: es soll etwas (25 GWh) mehr Strom auf Basis von Biogas produziert werden. Die andere Erhöhung ist ziemlich radikal: so sind die Solarstromproduktionsziele für 2030 um 496 GWh auf 1112 GWh erhöht.

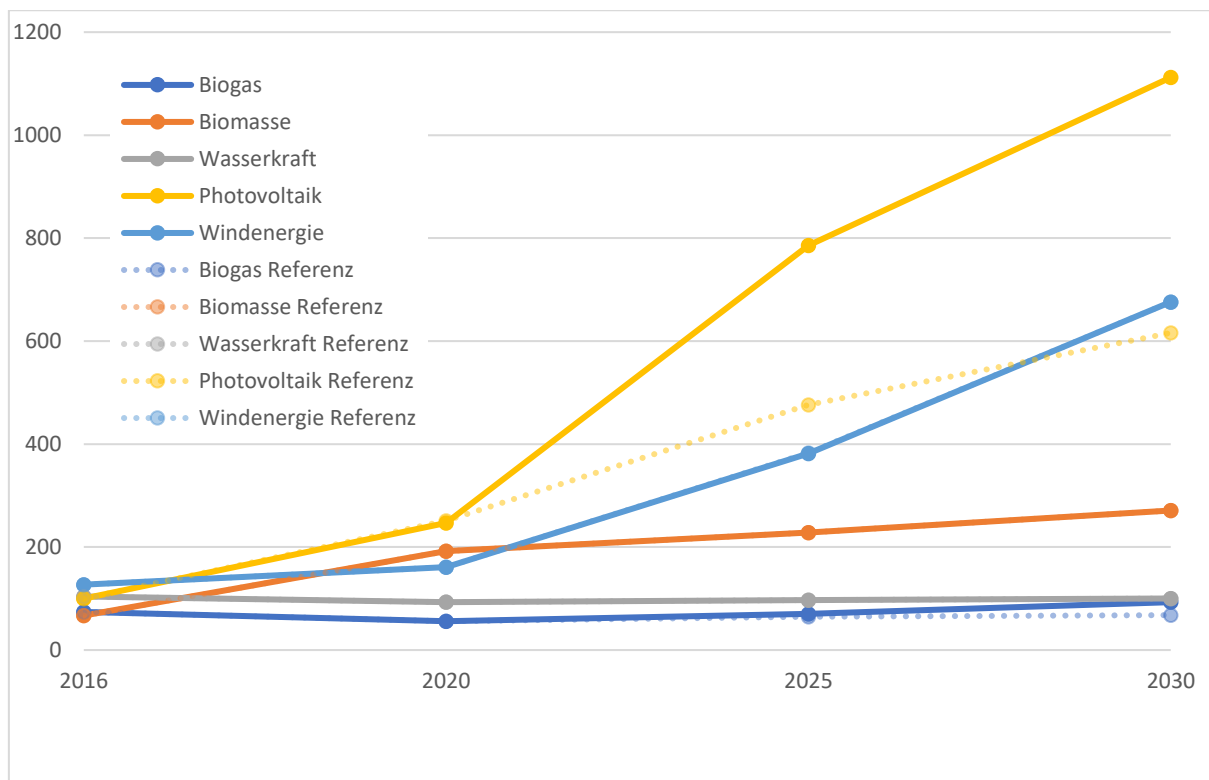


Abbildung 42 Die Stromerzeugung in Luxemburg im Zielszenario verglichen mit dem Referenzszenario (in GWh). Daten: (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplanes für Luxemburg, 2019, S. 23; 54)

Um die Photovoltaikanlagen zu fördern sind deshalb weitere Ausschreibungen für große Anlagen geplant (S. 39) und es ist vorgesehen um zusätzliche Flächen zuzulassen. Zu dem sollen Flächen entlang von Zuglinien und Autobahnen auf Tauglichkeit geprüft werden.

Der Klima- und Energieplan beschäftigt sich allerdings nicht nur mit der Stromproduktion. Auch der Stromverbrauch soll angepasst werden. Dieser soll nämlich (obwohl die Bevölkerung weiterwächst) verringert werden, in dem die Energieeffizienz gehoben wird. Insgesamt strebt Luxemburg eine Reduktion der Endenergienachfrage (wo also der Wärmesektor, die Biokraftstoffe und der Transportsektor auch mit einbezogen sind) um 40-44% im Jahr 2030 verglichen mit 2007.

Hierzu sollen unter anderem sogenannten Energieeffizienz-Netzwerken eingeführt werden. Energieeffizienz-Netzwerke sind ein systematischer, Erfahrung- und Ideenaustausch von Unternehmen, über einige Jahren zur Steigerung der Energieeffizienz (Initiative Energieeffizienz-Netzwerke, 2019). Es ist noch nicht klar, ob sich an dem Deutschen, mehr freiwilligen und wettbewerblichen Modell oder dem Schweizer Modell inspiriert werden soll. Hinzu sollen Firmen geholfen werden um energieeffizienter zu arbeiten. Die energietechnischen Berater sollen fortgebildet werden (S. 41). Es wird erwartet, dass die Akteure der Wirtschaft, da sie auf dem neuesten Stand über Energieeffizienz informiert sind, früher und höher in neue energieeffizientere Maschinen investieren werden (S. 42). Ein anderer Faktor, der den

Energieverbrauch der Wirtschaft verringern könnte, ist ein interindustrieller Strukturwandel, der für 2020 vorhergesagt wird. Die Bruttowertschöpfung (der Wert der produzierten Produkte) nimmt nämlich für Energieintensive Industrien 1% pro Jahr zu. Nach 2020 wird aber eine Bruttowertschöpfungssteigerung in nicht Energieintensive Industrien von 2% pro Jahr erwartet (S. 42). Nicht Energieintensive Industrien werden also attraktiver, und wichtiger.

Im integrierten Klima- und Energieplan bezieht sich die Erhöhung der Energieeffizienz vor allem auf dem Wärme- und Transportsektor. Zumal in den Haushalten soll viel weniger verbraucht werden: Einsparungen von 37% (verglichen mit 2007) sollen 2030 Realität sein. Die Brennstoffe im Straßenverkehr sollen, ausgenommen E-Mobilität, um 35% effizienter sein. Die E-Mobilität (Plug-In Hybrids werden mitgezählt) soll allerdings 2030 49% des Fahrzeugbestands einnehmen.

5 Diskussion

Der kleine Anteil erneuerbare Energien im Gesamtenergiemix Luxemburgs könnte man damit relativieren, dass der Tanktourismus (auf dem 34% des Energieverbrauchs im Verkehrssektor zurückzuführen ist) die Resultate verfälscht. Luxemburg steht allerdings auch schlecht im Stromsektor. Zu lange wurde gewartet. Luxemburg, das Land, das den Touristen unter dem Motto „Let's make it happen“ verkauft wird, verbraucht relativ den meisten verschmutzenden Strom der ganzen EU. Bisher lässt Luxemburg die Transition nicht geschehen. Nicht schnell genug. Luxemburg sollte schnellstens sein Motto gerecht werden und sich zum Musterschüler entwickeln.

Ich glaube, dass dieser Rückstand vielen nicht bewusst ist, denn fast alle luxemburgische Energiebetreiber bieten Privatpersonen (zumindest Neukunden) ausschließlich erneuerbaren Strom an. Die Angebote unterscheiden sich fast nur nach Stromherkunft und Preisschwankungen. Das Problem hierbei ist allerdings, dass die Haushalte nur 15% des Stromverbrauchs ausmachen (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplane für Luxemburg, 2019, S. 63) und der Großteil der Stromverbraucher immer noch Zugriff auf „schwarzer“ Elektrizität hat.

Diese Intransparenz wird dadurch, dass Luxemburg nur 2-4% des Stroms selbst produziert (Siebentritt, 2018), noch vergrößert. Denn Luxemburg produziert selbst nur noch „grünen“ Strom und so entsteht schnell ein nicht realitätsnahes Bild.

Doch es scheint, dass endlich ein Umdenken in der Politik stattfindet. Die erneuerbare Stromproduktion wird in Luxemburg ständig erweitert und im neusten Klima- und Energieplane, ist vor allem ein Ausbau der Photovoltaikzentralen vorgesehen und das Ziel der 100% Erneuerbaren Energien wurde gesetzt. Nun ist das erst für das Jahr 2050 (mit den Mitteln Luxemburgs wäre sicherlich früher möglich) doch das ist ein Schritt in die richtige Richtung. Ein Ziel allein bringt nichts (Neuseeland hat mithilfe kreativer Buchhaltung scheinbar auch die Klimaneutralität erreicht, obwohl Emissionen stiegen und Wälder verkleinerten (Lomborg, 2019)), wenn keine konkreten Maßnahmen folgen. Doch der heutige Energieminister macht einen engagierten Eindruck und ich bin überzeugt, dass angekündigte Maßnahmen durchgeführt werden.

Die erneuerbaren Energien sind in ständiger Entwicklung. Windräder, werden größer und leistungsfähiger, die Sonnenenergie wird immer billiger. Luxemburg, ist mit dem Pumpspeicherwerk, bestens für diese flexible Energieproduzenten gerüstet. Denn auch 2019 bietet ein Pumpspeicherkraftwerk noch die besten und effizientesten Speichermöglichkeiten. Die Laufwasserkraftwerkstechnologie wird hierzulande allerdings vernachlässigt und teilweise

sogar abgebaut, obwohl es eine der einzigen grünen Stromherstellungsprinzipien ist, die mit konstanter Stärke Strom liefern kann. Der Rundführer im Pumpspeicherwerk Vianden wies mir darauf hin, dass es hier auch noch viel Potenzial gäbe. Ich vermute, dass die geringen Leistungen an den Bachen sowie die erforderliche Kanalisation an den Flüssen, Grund für das mangelnde Interesse sind.

Die Photovoltaik dagegen wird voll auf eingesetzt. Was für mich allerdings auf Unverständnis stößt, ist das Luxemburg (so Transportminister Bausch) nicht in der Solarstraßentechnik interessiert ist. Luxemburg hat ein großes Straßennetz und wenig Platz. Luxemburg will auf Photovoltaik einsetzen. Es scheint mir also, dass diese innovative Technologie wegen der Platzsparmöglichkeiten gerade für Luxemburg sehr interessant sein muss.

In dieser Arbeit bin ich auch im Windenergiebereich noch auf alternative Anlagen, wie denen mit Darrieus-Rotoren, eingegangen. Ziel war herauszufinden, ob dies nun besser wie die klassische Anlage ist und für Luxemburg vielleicht eine Option wäre. Obwohl ein belgisches Start-up gerade voll darauf einsetzt und Darrieus Anlagen auch sicherlich Vorteile bietet (die Windrichtung spielt keine Rolle) bin ich davon überzeugt, dass wegen den besseren Leistungen, bei gleichem Wind die klassischen horizontale Windkraftanlagen besser geeignet sind.

Luxemburg könnte ausschließlich mit grüner Elektrizität versorgt werden, indem 1,3% der Fläche des Landes mit Solarzellen ausgestattet wird (Siebentritt, 2018). In Kombination mit Windenergie wäre das noch weniger. Um das zu realisieren, und auch über Nacht und im Winter Strom zu haben, sind die Speicherkapazitäten aktuell nicht groß genug, doch wenn neue Speicher gebaut werden kann dies realisiert werden. Nur sind die Speicher im Ausland nicht lukrativ und da liegt ein Problem. 1,3% der Fläche ist eigentlich nicht so viel, das ist etwa zehnmal die Fläche des Findels - ist aber bedeutend mehr als zum Beispiel das ganze Autobahnnetz an Fläche bieten würde.

Doch um das zu realisieren ist der politische Wille dann doch nicht groß genug. Bestimmt ist es auch gar nicht wünschenswert, dass Luxemburg all seine Bemühungen den Treibhausgas-Ausstoß zu verringern nur auf der Stromproduktion konzentriert, denn es soll sich auch in andere Bereiche - wo das Bedürfnis noch größer ist - bemüht werden. Doch Elektrizität wird auch in der Zukunft eine große Rolle spielen, weshalb eine Transition in dem Bereich notwendig ist.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf dem Stromsektor. Es gilt zu beachten, dass der größte Teil der Treibhausgase gar nicht hiervon kommen, sondern aus dem Straßenverkehr. In Luxemburg ist dieses Verhältnis ein wenig verzerrt - aus dem Ausland wird hier getankt (dieser CO₂ wird Luxemburg zugerechnet), Ausstoße in der Stromproduktion für Luxemburg dagegen sind alle im Ausland, deswegen kann man sich nur schwer auf Zahlen basieren. Nichtsdestotrotz

bleibt aber der Straßenverkehr am meisten Treibhausgase ausstoßen. Das Umdenken scheint im Straßenverkehr nicht zu passieren - der Tanktourismus ist für Luxemburg sehr lukrativ. Meiner Meinung nach soll europaweit für große Distanzen sowie für den Pendlerverkehr, mehr noch als auf E-Autos und E-Lkws, auf dem Schienentransport eingesetzt werden. So dass dies richtig Effekt hat ist jedenfalls der Ausbau Erneuerbaren Energien im Stromsektor ausschlaggebend.

Shell sagt sie sehen es als plausibel, dass im Jahr 2060 40% der verbrauchten Energien von erneuerbarer Herkunft ist (Shell, 2019). Luxemburgs Energieplan setzt das Ziel der Klimaneutralität für 2050. Die Technologien würden die Klimaneutralität sicherlich schon früher erlauben, doch vielleicht führt ein überstürztes Handeln zu Unverständnis und Klimaverleugnung bei der Bevölkerung. Vielleicht ist es aber auch ein zu spätes Handeln, dass eine Gegenreaktion hervorruft.

Ich hoffe, dass Luxemburg sich engagiert um die Treibhausgase schnellstens zu vermindern. Luxemburg soll sich an ihre Ziele halten, und nicht nur das tun, was Ölgiganten für realistisch halten.

6 Schlussfolgerung

Heute ist Luxemburg weit von einem Musterschüler in Punkto Erneuerbare Energien entfernt, und das nicht nur im Gesamtenergiemix, sondern auch im Stromsektor, wo Luxemburg den aktuellen Zahlen nach, den zweitgeringsten Anteil an erneuerbaren Energien der ganzen EU hat. Doch der motivierte Energieminister, sowie der neuste Energieplan, versprechen Besserung. Vor allem die Sonnenenergie habe noch viel ungenutztes Potenzial. Mit neuen Regelungen soll dies angekurbelt werden. Um grüner Strom zu verbrauchen, muss Luxemburg selbst mehr Elektrizität produzieren, und es sieht danach aus, dass das auch geschehen wird. Doch Luxemburg hat noch einen weiten Weg vor sich.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Luxemburg hat der zweitkleinste Anteil erneuerbare Elektrizität (Eurostat, 2016).	5
Abbildung 2 Energieflussdiagramm von Belgien und Luxemburg. Belgien hat viel mehr Ausfuhren.....	9
Abbildung 3 Das Laufwasserkraftwerk Rosport am Staudamm an der Sauerschleife Rosport-Ralingen (SEO Société électrique de l'our - Laufwasserkraftwerke, kein Datum).....	15
Abbildung 4 Schema eines Laufwasserkraftwerkes (Wikimedia, 2015)	16
Abbildung 5 Skizze einer vertikalen Kaplan-Turbine. (Jahobr, 2016).....	17
Abbildung 6 Skizze der eigentliche Kaplan-Rohrturbine; Der Generator liegt im inneren der „Birne“. (Jahobr, 2016).....	17
Abbildung 7 Postkarte einer Ölmühle am Anfang des 20ten Jahrhunderts (Dieschbourg, Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg, 2007, S. 127).....	18
Abbildung 8 Turbine der "Lauterburer Millen" (Dieschbourg, Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg, 2007, S. 36)	18
Abbildung 9 Hydroenergie Produktion 1928 - 2016 (Institut Luxembourgeois de Régulation (ILR), 2018)	19
Abbildung 10 Das Elektrizitätswerk am Limmatfluss und der Weiher, wo das Wasser raufgepumpt wurden lagen ca. 1.5 km Luftlinie auseinander und waren unterirdisch verbunden. Karte: (Stadt Zürich - Tiefbau und Entsorgungsdepartement, 2018).....	21
Abbildung 11 Kraftwerk Letten (Kurz, 2017).....	21
Abbildung 12 Auch eine Briefmarke war 1967 dem Pumpspeicherwerk gewidmet (Briefmarkenblog, 2017)	22
Abbildung 13 100 Frank Schein aus 1963 (100 Francs 18.9.1963 1963 Luxemburg unz. - Laurens Schulman BV - MA-SHOPS).....	22
Abbildung 14 Die zwei Wasserspeicher, oben auf dem Nikolausberg (1) und unten (abgeschlossener Teil der Our) (2) (Luxembourg for Tourism ©).....	23
Abbildung 15 Vereinfachte Darstellung eines Pumpspeicherkraftwerks während Turbinenbetrieb (links) und im Pumpbetrieb (rechts). (Axpo Holding AG, 2018)	23
Abbildung 16 Maschinensatz des Pumpspeicherwerks Vianden (Happoldt & Oeding, 1978, S. 73)	24
Abbildung 17 Die erstgebaute Maschinen im PSW Vianden	25
Abbildung 18 Querdurchschnitt des Maschinensatzes von Maschine 10 ("Société Electrique de l'Our" (SEO) , 2010)	25
Abbildung 19 Model einer "Persischen Windmühle" im Deutschen Museum in München (Saupreiß, 2010)	28

Abbildung 20 Ein Widerstandsläufer in Helix-Form (Frost, 2009)	28
Abbildung 21: Graphische Darstellung des dynamischen Auftriebs. (Paetzold, 2018).....	29
Abbildung 22: Bild von Darrieus (Georges Jean Marie Darrieus - upclosed.com)	30
Abbildung 23: Darrieusrotor (Strömung und Kräfte) (Goellner, 2017)	30
Abbildung 24: Skizze des Darrieus-Rotors, die sich im US-Patent befindet. (USA Patentnr. 1835018, 1931)	30
Abbildung 25 Darrieus-Rotor ("éole") im Windpark "Le Nordais" in Québec	31
Abbildung 26 H-Darrieus-Rotor der einzigen noch existierenden Großanlage in Dülmen Rorup (Stahlkocher, 2007)	32
Abbildung 27 Die zwei verschiedene Modelle der Firma Fairwind nebeneinander. (Fairwind, 2019)	33
Abbildung 28 Eine Windkraftanlage mit horizontaler Achse im Windpark in Heinerscheid (Tomateus, 2006)	34
Abbildung 29 Die Grafik zeigt die Theoretische Leistung in Funktion von der Rotorlänge. Die Rotorlänge hat einen großen Einfluss auf der Leistung. (Fine Media, 2019).....	36
Abbildung 30 Ein größerer Rotor verkleinert die Rotationsgeschwindigkeit auf drastischer Weise. (Fine Media, 2019)	36
Abbildung 31 Mit der Zeit vergrößerten sich die Windräder und mit ihnen die installierten Leistung (für Meeresanlagen angegeben)	36
Abbildung 32 Die Rotoren der Windräder in Yonne kommen in Punkto Höhe schon nahe an der Spitze des Eiffelturms (Coudray, 2019)	37
Abbildung 33 Windpark Burer Bierg (SEO Société électrique de l'Our, 2019).....	40
Abbildung 34 Die in Luxemburg produzierten Sonnenenergie. (Statec, 2019)	41
Abbildung 35 Aufbau der Solaranlage auf dem Depot der Gemeinde Junglinster (Chantier EquiSolar 2012 - Equienercoop, 2012).....	42
Abbildung 36 Einfallende Photonen erzeugen Elektronen und Löcher, die im elektrischen Feld der Raumladungszone des p-n-Übergangs getrennt werden. (Degreen, 2006)	43
Abbildung 37 Ein mit Phosphor N-dotiertes Siliciumgitter (Guillom, 2005)	44
Abbildung 38 Aufbau einer Sperrschicht (Raumladungszone, RLZ) im asymmetrischen p-n-Übergang (p-Seite ist hier stärker dotiert). (Adundovi, 2010)	44
Abbildung 39 Innerhalb von einem Jahrzehnt hat sich der Preis von einer Photovoltaikanlage deutlich verringert (Schmitz, 2019). Die Grafik zeigt der Preis in Deutschland.....	45
Abbildung 40 Die exponentielle Steigerung der weltweit installierten Photovoltaikleistung auf einer Halblogarithmischen Skala dargestellt (Rfassbind, 2014).....	46
Abbildung 41 Die Sonnenstraße von Wattway in Chambéry wurde im Juni 2018 eingeweiht (Robert, 2018)	47

Tabelle 1 Prognose des Erneuerbare Energie Anteils im Referenzszenario (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg, 2019, S. 53).....	50
Tabelle 2 Anteil Erneuerbare Energie im Stromsektor bei Referenzentwicklung. Auch in 2030 ist der größteil noch immer nicht erneuerbar.	50
Tabelle 3 Die Stromerzeugung in Luxemburg im Referenzszenario (in GWh). Daten: (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg, 2019, S. 54))	51
Tabelle 4 Prognose des Erneuerbare Energie Anteils im Zielszenario und Vergleich (des Jahres 2030) zum Referenzszenario. (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg, 2019, S. 23).....	52
Tabelle 5 Der Anteil Erneuerbare Energie im Stromsektor im Zielszenario.....	53
Abbildung 42 Die Stromerzeugung in Luxemburg im Zielszenario verglichen mit dem Referenzszenario (in GWh). Daten: (Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan für Luxemburg, 2019, S. 23; 54)	54

8 Quellen

Luxembourg for Tourism ©. (kein Datum). *Fotogalerie - SEO Wasserkraftwerk - VisitLuxembourg.com*. Abgerufen am 15. 12 2018 von <https://www.visitluxembourg.com/de/ansicht/misc/seo-wasserkraftwerk-vianden>

“Société Electrique de l’Our” (SEO) . (19. 2 2010). *Pumpspeicherkraftwerk Vianden wird um eine 11. Maschine erweitert - Revue Technique*. (revue-technique.lu, Hrsg.) Abgerufen am 5. 4 2019 von https://revue-technique.lu/wp-content/uploads/2010/04/PSW-Vianden_09_03_2010-CopyII.pdf

100 Francs 18.9.1963 1963 Luxemburg unz. - Laurens Schulman BV - MA-SHOPS. (kein Datum). Abgerufen am 15. 12 2018 von <https://www.ma-shops.de/laurensschulman/item.php?id=4002>

Adler, F. (22. 6 2015). *Warum sich ein Windrad nicht immer dreht - Stadtwerke Münster*. Abgerufen am 21. 2 2019 von <https://www.stadtwerke-muenster.de/blog/energie/warum-sich-ein-windrad-nicht-immer-dreht/>

Adundovi. (21. 11 2010). *Pn junction equilibrium graph - Wikimedia*. (D. f. Wikimedia, Herausgeber) Abgerufen am 5. 4 2019 von <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pn-junction-equilibrium-graph.svg>

alt-zueri.ch. (kein Datum). *Resiweiher*. Abgerufen am 24. 11 2018 von <https://www.alt-zueri.ch/turicum/freizeit/resiweiher/resiweiher.html>

Anen, N. (8. 2 2019). Windpark: 1-0 für Ottange gegen Rümelingen - Wort.lu. *Luxemburger Wort*. Abgerufen am 9. 3 2019 von <https://www.wort.lu/de/lokales/windpark-1-0-fuer-ottange-gegen-ruemelingen-5c5c7c9cda2cc1784e33d5af>

Auch Menschheit in Gefahr? : Forscher warnen vor Massenaussterben - NTV.de. (20. 6 2015). (n-tv.de) Abgerufen am 14. 10 2018 von <https://www.n-tv.de/wissen/Forscher-warnen-vor-Massenaussterben-article15342481.html>

Axpo Holding AG (Hrsg.). (2018). *Pumpspeicherwerk - Hintergrundwissen Wasserkraft A-Z - Axpo*. Abgerufen am 18. 11 2018 von <https://www.axpo.com/axpo/ch/de/dossiers/dossier-wasser.html>

Barbaux, A. (3. 11 2017). Pourquoi EDF n'investit pas plus dans les STEP pour le stockage des énergies renouvelables - L'usine nouvelle. *L'Usine nouvelle*. Abgerufen am 16. 3 2019 von <https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-edf-n-investit-pas-plus-dans-les-step-pour-le-stockage-des-energies-renouvelables.N620998>

- Bembaron, E. (18. 1 2018). Fairwind invente un nouveau type d'éolienne verticale. *Le Figaro*. Abgerufen am 8. 2 2019 von <http://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/start-up/2018/01/18/32004-20180118ARTFIG00139-fairwind-invente-l-eolienne-verticale.php>
- Bibliographisches Institut GmbH. (2018). *Duden | Energiemix | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition*. Abgerufen am 20. 10 2018 von Duden: Bibliographisches Institut GmbH
- Boeing, N. (12. 6 2018). Watt satt - Zeit online. *Zeit Wissen*(Nr. 4/2018). Abgerufen am 17. 3 2019 von <https://www.zeit.de/zeit-wissen/2018/04/erneuerbare-energien-stromspeichertechnologie-lithium>
- Bojanowski, A. (3. 12 2015). *Klimawandel: Alle Fakten zu Ursachen und Folgen der Erderwärmung - SPIEGEL ONLINE*. (Spiegel Online) Abgerufen am 14. 10 2018 von <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/klimawandel-alle-fakten-zu-ursachen-und-folgen-der-erderwaermung-a-1063650.html#sponfakt=8>
- Boucher, S. (21. 6 2017). *Les éoliennes ne massacrent pas les oiseaux, confirme la LPO - consoglobe*. Abgerufen am 9. 3 2019 von <https://www.consoglobe.com/eoliennes-tuent-oiseaux-3617-cg>
- Briefmarkenblog. (9. 4 2017). *Luxembourg – 1967 – Turbinenhalle des Pumpspeicherwerk Vianden - briefmarken-sammlung.info*. Abgerufen am 15. 12 2018 von briefmarken-sammlung.info/2017/04/briefmarken/luxembourg/luxembourg-1967-pumpspeicherwerk-vianden/
- Chantier EquiSolar 2012 - Equienercoop. (6. 10 2012). Abgerufen am 11. 4 2019 von <http://www.equienercoop.lu/chantier/2012-2/>
- Cordier, & Roux. (2014). *Le guide de l'éolienne*. 204, rond-point du Pont de Sèvres - 92649 Boulogne-Billancourt, Île-de-France, Frankreich: Fine Media. Abgerufen am 19. 2 2019 von <https://eolienne.ooreka.fr/>
- Coudray, A.-C. (9. 2 2019). *Éoliennes : le vent de la controverse - Journal télévisé de 20H du 09/02/2019 sur TF1*. Abgerufen am 9. 4 2019 von <https://www.lci.fr/social/eoliennes-le-vent-de-la-controverse-2112482.html>
- Courty, J.-M., & Kierlik, É. (23. 5 2014). *Les éoliennes verticales - Pour la science*. Abgerufen am 17. 2 2019 von <https://www.pourlascience.fr/sd/physique/les-eoliennes-verticales-7934.php>

- dab/dpa. (25. 8 2016). Bottroper Zeche hat das Zeug zur Riesenbatterie - Spiegel Online. *Spiegel*.
 Abgerufen am 16. 3 2019 von <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/bottroper-zeche-koennte-riesiges-pumpspeicherkraftwerk-werden-a-1109446.html>
- Darrieus, G. (1931). *USA Patentnr. 1835018*. Abgerufen am 7. 2 2019 von https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/Darrieus_rotor_patent_drawing.png
- Das Umweltbundesamt. (23. 05 2017). *Folgen des Klimawandels | Umweltbundesamt*.
 Abgerufen am 14. 10 2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels#textpart-1>
- Degreeen. (9. 10 2006). *Solarzelle Funktionsprinzip - Wikimedia*. (D. f. Wikimedia, Hrsg.)
 Abgerufen am 5. 4 2019 von https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solarzelle_Funktionsprinzip2.svg
- Diermann, R. (14. 4 2017). *Forscher prognostizieren gigantischen Solarboom - Fotovoltaik - Wissenschaft - Spiegel Online*. Abgerufen am 7. 4 2019 von <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/solarenergie-gigantischer-photovoltaik-boom-prognostiziert-a-1143145.html>
- Dieschbourg, C. (2007). *Les moulins du Müllerthal au Grand-Duché de Luxembourg* (1. Ausg.). (S. Feyereisen, Hrsg., Y. Conrardy, & C. Serres, Übers.) Luxemburg, Müllerthal, Luxemburg: Editions Guy Binsfeld. Abgerufen am 6. 4 2019
- Dieschbourg, C. (22. 8 2018). Umweltministerin Carole Dieschbourg setzt auf Politik mit Augenmaß. (P. Welter, Interviewer, & L. Journal, Herausgeber) Abgerufen am 17. 10 2018 von <http://www.journal.lu/top-navigation/article/umweltministerin-carole-dieschbourg-setzt-auf-politik-mit-augenmass/>
- dpa/pos. (12. 8 2015). Absurde Regelung verhindert neue Ökostrom-Speicher - Welt.de. *Welt*.
 Abgerufen am 17. 3 2019 von <https://www.welt.de/wirtschaft/energie/article145126011/Absurde-Regelung-verhindert-neue-Oekostrom-Speicher.html>
- Ein kräftiger Schub für Windenergie - covestro*. (2019). (Covestro AG) Abgerufen am 17. 2 2019 von <https://www.windpower.covestro.com/de>
- Energieinfo.lu. (2018). *Energie hydraulique - Energieinfo.lu*. Abgerufen am 31. 10 2018 von http://www.energieinfo.lu/ksm_Leau.31-2.html

Enkhardt, S. (11. 5 2018). Photovoltaik-Markt in Luxemburg entwickelt sich. *pv magazine*.
Abgerufen am 11. 4 2019 von <https://www.pv-magazine.de/2018/05/11/photovoltaik-markt-in-luxemburg-entwickelt-sich/>

Enzyklo. (2019). *Laufwasserkraftwerk* - *Enzyklo.de*. Abgerufen am 7. 4 2019 von
<http://www.enzyklo.de/Begriff/Laufwasserkraftwerk>

Erneuerbare Energie lohnt sich endlich - Frankfurter Allgemeine Zeitung. (3. 4 2017). (Frankfurter
Allgemeine Zeitung) Abgerufen am 12. 1 2019 von
<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/energiepolitik/windparks-ohne-foerderung-erneuerbare-energie-lohnt-sich-endlich-14971139.html>

European Commission. (2019). *North Seas Energy Cooperation* - *European Commission*.
Abgerufen am 9. 4 2019 von
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/infrastructure/high-level-groups/north-seas-energy-cooperation>

European Commission. (Unbekannt). *Folgen des Klimawandels / Klimapolitik*. (ec.europa.eu)
Abgerufen am 14. 10 2018 von Europäische Kommission:
https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_de

Eurostat. (2016). *Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table*. (Eurostat)
Abgerufen am 15. 10 2018 von Energy dependence:
https://ec.europa.eu/eurostat/estat-navtree-portlet-prod/NodelnfoServices?lang=en&code=t2020_rd320

Eurostat. (2016). *Share of of electricity from renewable sources*. Von
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20180921-1?inheritRedirect=true&redirect=%2Feurostat%2F> abgerufen

Eurostat. (26. 6 2018). *Anteil von Energie aus erneuerbaren Quellen* - *Eurostat*. Abgerufen am
12. 4 2019 von
http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?query=BOOKMARK_DS-253950_QID_2CBAC721_UID_-3F171EB0&layout=TIME,C,X,0;GEO,L,Y,0;UNIT,L,Z,0;INDIC_EN,L,Z,1;INDICATORS,C,Z,2;&zSelection=DS-253950UNIT,PC;DS-253950INDICATORS,OBS_FLAG;DS-253950INDIC_EN,119820;&

Eurostat. (2018). *RAMON - Reference And Management Of Nomenclatures: Eurostat's Concepts and Definitions Database* - *Eurostat*, 5500. Abgerufen am 25. 10 2018 von
ec.europa.eu/eurostat:

http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=DSP_GLOSSARY_NOM_DTL_VIEW&StrNom=CODED2&StrLanguageCode=EN&IntKey=16576935&RdoSearch=BEGIN&TxtSearch=renewable&CboTheme=36940303&IsTer=&IntCurrentPage=1&ter_valid=0

Fairwind. (2019). *Fairwind, leader belge du petit éolien vertical* - fairwind.be. Abgerufen am 8. 2 2019 von <http://www.fw4sea.com/images/QuickPresentation.PNG>

Fine Media. (2019). *Hauteur d'une éolienne* - ooreka. Abgerufen am 19. 2 2019 von <https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/376182/hauteur-d-une-eolienne>

Forster, C. (17. 5 2017). Solarstrom wird immer günstiger. *Neue Zürcher Zeitung*. Abgerufen am 8. 4 2019 von <https://www.nzz.ch/schweiz/energiestrategie-2050-solarstrom-wird-immer-guenstiger-ld.1293946>

Fraunhofer-Gesellschaft. (2019). *Energie und Rohstoffe – Erneuerbare Energie* - Fraunhofer-Gesellschaft. Abgerufen am 12. 1 2019 von <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/forschungsfelder/energie-rohstoffe/erneuerbare-energie.html>

Frimmer, V. (7. 8 2012). *Unzuverlässig und teuer: Gegenwind für die Windenergie* - Focus.de. Abgerufen am 21. 2 2019 von https://m.focus.de/wissen/technik/tid-26814/platz-der-offshore-traum-unzuverlaessig-teuer-nicht-ergiebig-gegenwind-fuer-die-windenergie_aid_794918.html

Frost, D. (18. 11 2009). *Hornblower-Hybrid* - Wikimedia. (d. f. Wikimedia Commons, Hrsg.) Abgerufen am 19. 1 2019 von [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hornblower-Hybrid_\(3\).jpg?uselang=de](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hornblower-Hybrid_(3).jpg?uselang=de)

Garin, V. (18. 1 2019). Suisse : des chercheurs ont trouvé comment produire de l'électricité solaire en plein hiver - RTL.fr. *C'est notre Planète*. Frankreich. Abgerufen am 7. 4 2019 von <https://www.rtl.fr/actu/conso/suisse-des-chercheurs-ont-trouve-comment-produire-de-l-electricite-solaire-en-plein-hiver-7796241429>

Garvey, S. (24. 10 2018). *Let's store solar and wind energy – by using compressed air* - Theconversation.com. (The Conversation Trust (UK) Limited, Herausgeber) Abgerufen am 12. 1 2019 von <https://theconversation.com/lets-store-solar-and-wind-energy-by-using-compressed-air-103183>

- Gassmann, M. (11. 10 2018). Laute Windräder gefährden die Gesundheit. *Welt*. Abgerufen am 21. 2 2019 von <https://www.welt.de/wirtschaft/article181940094/Laute-Windraeder-schaden-der-Gesundheit.html>
- Georges Jean Marie Darrieus - *upclosed.com*. (kein Datum). Abgerufen am 7. 2 2019 von <https://upclosed.com/people/georges-jean-marie-darrieus/>
- Gira, C. (7. 10 2015). Neue Projekte in Planung - Luxemburger Wort. (L. Wort, Interviewer) Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST). Abgerufen am 9. 4 2019 von <https://www.list.lu/fr/espace-media/presse/neue-projekte-in-planung/>
- Gith, T. (9. 11 2013). Neuer Speicher für Energie aus Windkraftwerken - Deutschlandfunk. Deutschland. Abgerufen am 16. 3 2019 von https://www.deutschlandfunk.de/erneuerbare-energien-neuer-speicher-fuer-energie-aus.676.de.html?dram:article_id=269524
- gluecktuning. (2. 9 2018). *Windenergie: Jede Veränderung produziert auch Angst* - UTR. Abgerufen am 9. 4 2019 von <https://gluecktuning.com/2018/09/02/windenergie-jede-veraenderung-produziert-auch-angst/>
- Goellner, M. (4. 12 2017). *Darrieusrotor* - *Wikipedia*. (D. f. Wikipedia, Hrsg.) Abgerufen am 7. 2 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Darrieus_01.tif
- Gorgs, C. (27. 3 2017). Warum Wind- und Solarstrom bedroht sind. *manager magazin*. Abgerufen am 8. 4 2019 von <http://www.manager-magazin.de/extra/artikel/a-986727.html>
- Greenberg, J. (8. 4 2019). *Donald Trump's ridiculous link between cancer, wind turbines* - *politifact*. Abgerufen am 20. 4 2019 von <https://www.politifact.com/truth-o-meter/statements/2019/apr/08/donald-trump/republicans-dismiss-trumps-windmill-and-cancer-cla/>
- Guillom, W. (13. 9 2005). *N-doped Si* - *Wikimedia*. (D. f. Wikimedia Commons, Hrsg.) Abgerufen am 5. 4 2019 von https://commons.wikimedia.org/wiki/File:N-doped_Si.svg
- Happoldt, H., & Oeding, D. (1978). *Elektrische Kraftwerke und Netze* (5. Ausg.). (Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, Hrsg.) Würzburg, Deutschland: Universitätsdruckerei H. Stürtz AG. doi:10.1007/978-3-662-06962-2
- Hecking, C. (2. 1 2019). *40 Prozent des deutschen Stroms waren 2018 öko* - *Spiegel online*. Abgerufen am 12. 1 2019 von <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/strom-2018-gab-es-erstmal-mehr-als-40-prozent-oekostrom-a-1246124.html>

- Initiative Energieeffizienz-Netzwerke. (2019). *Was ist ein Energieeffizienz-Netzwerk? - Initiative Energieeffizienz-Netzwerke*. Abgerufen am 11. 4 2019 von <http://www.effizienznetzwerke.org/initiative/hintergrund/>
- Institut Luxembourgeois de Régulation (ILR). (8. 1 2018). *Production d'énergie électrique par type de procédés 1928 - 2016 - Le portail des statistiques Grand-duché de Luxembourg*. (Statec, Hrsg.) Abgerufen am 31. 10 2018 von [statistiques.public.lu: https://statistiques.public.lu/stat/TableView/chartView.aspx?ReportId=12762&sCS_ChosenLang=fr](http://statistiques.public.lu: statistiques.public.lu: https://statistiques.public.lu/stat/TableView/chartView.aspx?ReportId=12762&sCS_ChosenLang=fr)
- Institut Luxembourgeois de Régulation. (3. 8 2018). *Institut Luxembourgeois de Régulation - CHIFFRES CLÉS DU MARCHÉ DE L'ÉLECTRICITÉ*. Abgerufen am 24. 10 2018 von Institut Luxembourgeois de Régulation: <https://assets.ilr.lu/energie/Documents/ILRLU-1685561960-523.pdf>
- Institut Luxembourgeois de Régulation. (3. 8 2018). *Institut Luxembourgeois de Régulation - Statistiques*. Abgerufen am 21. 10 2018 von Institut Luxembourgeois de Régulation: <https://assets.ilr.lu/energie/Documents/ILRLU-1685561960-527.pdf>
- Jahobr. (23. 9 2016). *Wikipedia*. Abgerufen am 2. 9 2018 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserturbine#/media/File:KaplanSketch.svg>
- Jüttemann, P. (kein Datum). *Vertikale Windkraftanlagen* - www.Klein-Windkraftanlagen.com. Abgerufen am 19. 1 2019 von <https://www.klein-windkraftanlagen.com/technik/vertikale-windkraftanlagen/#preise-kosten>
- Kramper, G. (29. 12 2018). *Haben Schweizer das größte Problem sauberer Energie gelöst? - Stern.de*. Abgerufen am 12. 1 2019 von <https://www.stern.de/digital/technik/windenergie--so-wollen-die-schweizer-das-groesste-problem-loesen-8444858.html>
- Kurz, D. (9. 10 2017). (Wikipedia, Hrsg.) Abgerufen am 24. 11 2018 von https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Letten#/media/File:KW_Letten_Seiltransmission_1883.jpg
- Loesche, D., Schultz, S., & Stotz, P. (13. 5 2016). *Bitte, nehmt meinen Strom! Ich zahl auch dafür! - Spiegel Online. Spiegel*. Abgerufen am 16. 3 2019 von <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/negative-strompreise-zunehmend-haeufiger-a-1092088.html>

- Lomborg, B. (26. 2 2019). Falsche Daten zum Klimawandel. *Tageblatt*. Abgerufen am 12. 4 2019 von <https://www.pressreader.com/luxembourg/tageblatt-luxembourg/20190226/281539407244406>
- LPO France. (2017). *Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune*. Rochefort: LPO. Abgerufen am 9. 3 2019 von https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/eolien_lpo_2017.pdf
- Luvside. (kein Datum). *Windkraftanlagen - Luvside*. Abgerufen am 19. 1 2019 von <https://www.luvside.de/windkraftanlagen-info/>
- M. Bunz, I. L. (2016). *Mögliche gesundheitliche Effekte von Windenergieanlagen*. Umweltbundesamt, Mensch und Umwelt; I 2.3, I 3.4, II 1.5 und II 1.6. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen am 21. 2 2019 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/161128_uba_position_windenergiegesundheits.pdf
- Manuel Köhler. (2. 7 2018). Warum negative Strompreise nicht häufiger werden. *Tagesspiegel Background*. Abgerufen am 8. 4 2019 von <https://background.tagesspiegel.de/warum-negative-strompreise-nicht-haeufiger-werden>
- Mihm, A. (1. 6 2017). Betriebsunfall von historischer Tragweite. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Abgerufen am 20. 4 2019 von <https://www.faz.net/aktuell/politik/ausland/pariser-klimaabkommen-hat-viele-schwachstellen-15042820.html>
- Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire; Ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement durable. (27. 2 2019). *Le projet de plan national intégré en matière d'énergie et de climat (2021-2030) - Ministère de l'Énergie et de l'Aménagement du territoire*. Abgerufen am 9. 4 2019 von <https://mea.gouvernement.lu/dam-assets/actualites/2019/NECP-draft-LUX.pdf>
- Ministerium für nachhaltige Entwicklung und Infrastrukturen. (13. 9 2017). *Neue Maßnahmen zugunsten der Solarenergie vorgestellt - .lu | Das offizielle Internetportal des Großherzogtums Luxemburg*. Von <http://luxembourg.public.lu/de/actualites/2017/09/13-photovoltaique/index.html> abgerufen
- Muller, C. (27. 8 2012). Spitzenstrom für den deutschen Markt - *Tageblatt.lu*. *Tageblatt*. Abgerufen am 17. 3 2019 von <http://www.tageblatt.lu/nachrichten/luxemburg/spitzenstrom-fur-den-deutschen-markt-24073496/>

- Muth, C. J. (16. 5 2017). Luxemburg plant Zubau von 2,5 Gigawatt Photovoltaik bis 2050. *p.v. magazine*. Abgerufen am 11. 4 2019 von <https://www.pv-magazine.de/2017/05/16/luxemburg-plant-zubau-von-25-gigawatt-photovoltaik-bis-2050/>
- Niemann, D. L. (5. 8 2008). *Argumente gegen Solarstromerzeugung - Bürger für Technik*. Abgerufen am 8. 4 2019 von http://www.buerger-fuer-technik.de/body_argumente_gegen_solarstromerze.html
- Oé, J. (26. 8 2017). Keine Solarradwege für Luxemburg. *Tageblatt*. Abgerufen am 7. 4 2019 von <http://www.tageblatt.lu/headlines/keine-solarradwege-fuer-luxemburg/>
- Oly, D. (29. 3 2019). Effizienz hoch! *Lëtzebuurger Journal*. Abgerufen am 9. 4 2019 von <https://www.journal.lu/top-navigation/article/effizienz-hoch/?L=0&cHash=303ccb6f5edbd829518d89c58e72ca1a>
- Paetzold, M. (14. 4 2018). *Deflection and lift - Wikimedia*. (W. Commons, Hrsg.) Abgerufen am 7. 2 2019 von https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DeflectionAndLift_W3C.svg
- Prof. Arlettaz, R. (19. 1 2017). Eoliennes et oiseaux: le problème est plus sérieux qu'il n'en a l'air - *letemps.ch*. *LE TEMPS*. Abgerufen am 9. 3 2019 von <https://www.letemps.ch/opinions/eoliennes-oiseaux-probleme-plus-serieux-quil-nen-lair>
- Rfassbind. (8. 11 2014). *PV cume semi log chart 2014 estimate - Wikimedia*. (d. f. Wikimedia Commons, Hrsg.) Abgerufen am 7. 4 2019 von https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PV_cume_semi_log_chart_2014_estimate.svg?uselang=de-formal
- Ries, G. (10. 10 2013). *Macht Windenergie Krebs? - Spektrum.de*. Abgerufen am 20. 4 2019 von <https://scilogs.spektrum.de/mente-et-malleo/macht-windenergie-krebs/>
- Robert, B. (2018). *Chambéry (France) - La médiathèque Wattway - Wattway*. Abgerufen am 7. 4 2019 von Chambéry (France)
- Romaschewsky, G. (1. 6 2018). Windrad, Windpark, Windplantage. *Tageblazz*. Abgerufen am 21. 2 2019 von <http://www.tageblatt.lu/meinung/forum/windrad-windpark-windplantage/>
- Saupreiß. (4. 6 2010). *Modell einer persischen Windmühle im Deutschen Museum - Wikimedia*. (d. f. Wikimedia Commons, Hrsg.) Abgerufen am 19. 1 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Persische_Windmühle#/media/Datei:3APersische_Windmühle_Model_-_Deutsches_Museum_München.jpg

- Schmit, J.-P. (23. 10 2018). Energiewende light. *Tageblatt Luxemburg*, Nr.248, S.6. Abgerufen am 23. 10 2018
- Schmit, J.-P. (12. 4 2018). Strom aus Luxemburg. *Tageblatt*. Abgerufen am 31. 3 2019 von <http://www.tageblatt.lu/meinung/kommentar/strom-aus-luxemburg/>
- Schmit, J.-P. (27. 3 2019). Klimaland Luxemburg. *Tageblatt*, Nr.73, S.5. Abgerufen am 27. 3 2019
- Schmitz, J. (2019). *So viel kostet 2019 eine Photovoltaikanlage* - *Solaranlagen-Portal.de*. Abgerufen am 7. 4 2019 von <https://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik/preis-solar-kosten.html>
- SEO | Société électrique de l'our - Laufwasserkraftwerke. (kein Datum). Abgerufen am 2. 11 2018 von <http://www.seo.lu/Hauptaktivitaeten/Laufwasserkraftwerke/Vorstellung>
- SEO Société électrique de l'Our. (2019). *Wandpark Burer Bierg*. Abgerufen am 11. 4 2019 von <http://www.seo.lu/Hauptaktivitaeten/Windkraft/Wandpark-Burer-Bierg#>
- Shell. (2019). *Un avenir énergétique plus propre* - *Shell.com*. Abgerufen am 12. 4 2019 von <https://www.shell.lu/energy-and-innovation/the-energy-future.html>
- Siebert, S. (12. 4 2018). Die ungenutzte Sonne. (C. Muller, Interviewer) Luxemburg: Editpress. Abgerufen am 7. 4 2019 von <https://www.pressreader.com/luxembourg/tageblatt-luxembourg/20180412/281517931700080>
- SolarRoad BV. (2019). *SolarRoad*. (SolarRoad BV) Abgerufen am 7. 4 2019 von <https://www.solaroad.nl/>
- Speicher, C. (22. 7 2017). Der stille Lärm der Windturbinen. *Neue Zürcher Zeitung*. Abgerufen am 21. 2 2019 von <https://www.nzz.ch/wissenschaft/infraschall-der-stille-laerm-der-windturbinen-ld.1307044>
- Springer, A. (1. 5 2015). *Klimawandel bedroht jede sechste Art auf der Erde* - *WELT*. (Welt) Abgerufen am 14. 10 2018 von <https://www.welt.de/wissenschaft/article140371518/Klimawandel-bedroht-jede-sechste-Art-auf-der-Erde.html>
- Stadt Zürich - Tiefbau und Entsorgungsdepartement (Hrsg.). (2018). *Historische Karten - Stadt Zürich*. Abgerufen am 23. 11 2018 von https://www.maps.stadt-zuerich.ch/zueriplan3/stadtplan.aspx#route_visible=true&basemap=Z%C3%BCrich+um+1900&map=&scale=4000&xkoord=2682643.883709744&ykoord=1248877.52603407

2&lang=&layer=&window=&selectedObject=&selectedLayer=&toggleScreen=&legacyU
rlState=&

Stahlkocher. (21. 6 2007). *H-Darrieus-Rotor in Dülmen-Rorup* - *Wikimedia*. (Wikimedia, Hrsg.)
Abgerufen am 8. 2 2019 von [https://de.wikipedia.org/wiki/Darrieus-
Rotor#/media/File:H-Darrieus-Rotor.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Darrieus-Rotor#/media/File:H-Darrieus-Rotor.jpg)

Stalder, H. (4. 9 2016). Die Batterie im Berg - nzz.ch. *Neue Zürcher Zeitung*. Abgerufen am 17. 3
2019 von [https://www.nzz.ch/schweiz/aktuelle-themen/pumpspeicherwerk-linth-
limmern-die-batterie-im-berg-ld.114664](https://www.nzz.ch/schweiz/aktuelle-themen/pumpspeicherwerk-linth-limmern-die-batterie-im-berg-ld.114664)

Statec. (2016). *Le portail des statistiques | Grand-duché de Luxembourg - Principaux indicateurs
énergétiques 2000 - 2015*. Abgerufen am 29. 10 2018 von Le portail des statistiques |
Grand-duché de Luxembourg:
[https://statistiques.public.lu/stat/TableView/tableView.aspx?ReportId=12758&IF_La
nguage=fra&MainTheme=1&FldrName=4&RFPPath=50](https://statistiques.public.lu/stat/TableView/tableView.aspx?ReportId=12758&IF_Language=fra&MainTheme=1&FldrName=4&RFPPath=50)

Statec. (2019). *Production renouvelable d'énergie électrique par type de processus 1955 - 2017 -
Le portail des statistiques*. Abgerufen am 11. 4 2019 von
<https://statistiques.public.lu/stat/TableView/tableView.aspx>

Stephan, E. (9. 9 2017). Wie kann man Energie speichern? - Welt.de. *Welt*. Abgerufen am 16. 3
2019 von [https://www.welt.de/print/die_welt/hamburg/article168476254/Wie-kann-
man-Energie-speichern.html](https://www.welt.de/print/die_welt/hamburg/article168476254/Wie-kann-man-Energie-speichern.html)

Tomateus. (28. 1 2006). *Techno wandenergieanlag* - *Wikimedia*. (D. f. Wikimedia, Hrsg.)
Abgerufen am 5. 4 2019 von
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Techno_wandenergieanlag1.jpg

Traufetter, G. (26. 8 2017). *Wind und Sonne sind billiger als Kohle* - *Spiegel Online*. Abgerufen am
12. 1 2019 von [http://www.spiegel.de/wirtschaft/erneuerbare-energien-sind-billiger-
als-kohle-a-1164579.html](http://www.spiegel.de/wirtschaft/erneuerbare-energien-sind-billiger-als-kohle-a-1164579.html)

Turmes, C. (4. 9 2018). Le bilan du MDDI au Luxembourg. (J. Wiss, Interviewer, & lessentiel.lu,
Herausgeber) Luxembourg. Abgerufen am 17. 10 2018 von
[http://www.lessentiel.lu/de/luxemburg/story/so-werden-wir-die-lebensqualitat-nicht-
halten-11451147](http://www.lessentiel.lu/de/luxemburg/story/so-werden-wir-die-lebensqualitat-nicht-halten-11451147)

Unionpedia, D. C.-M. (Hrsg.). (kein Datum). *Elektrizitätswerk der Stadt Zürich* - *Unionpedia*.
Abgerufen am 24. 11 2018 von
https://de.unionpedia.org/i/Elektrizitätswerk_der_Stadt_Zürich

Vacon, M. (27. 3 2018). *Luxemburg investiert Millionen in neue Windparks - L'essentiel*. (Editpress, Herausgeber) Abgerufen am 9. 4 2019 von <http://www.lessentiel.lu/de/luxemburg/story/Luxemburg-investiert-Millionen-in-neue-Windparks-20764655>

Vacon, M. (1. 3 2018). *Luxemburg soll zum «Prosumer»-Land werden - L'essentiel*. Abgerufen am 11. 4 2019 von <http://www.lessentiel.lu/de/wirtschaft/story/luxemburg-soll-zum-prosumer-land-werden-16056174>

Veyssié, E. (27. 1 2017). Dans l'Hérault, les pales d'éoliennes tuent des oiseaux protégés - Le Monde. *Le Monde*. Abgerufen am 9. 3 2019 von https://www.lemonde.fr/planete/article/2017/07/27/dans-l-herault-des-oiseaux-proteges-meurent-sous-les-pales-d-eoliennes_5165794_3244.html

Voith GmbH. (6. 4 2018). *Wasserenergie: Pumpspeicherkraftwerk in Luxemburg wird von Voith "Leistungs-verbessert" - Windkraft - Journal*. Abgerufen am 9. 12 2018 von <https://www.windkraft-journal.de/2018/04/06/wasserenergie-pumpspeicherkraftwerk-in-luxemburg-wird-von-voith-leistungs-verbessert/119537>

Wattway by Colas. (2019). *Faisons de la route l'énergie de demain - Wattway*. (Colas) Abgerufen am 7. 4 2019 von <http://www.wattwaybycolas.com/>

Wetzel, D. (26. 2 2018). Forscher klären endlich, ob Windkraft krank macht. *Welt*. Abgerufen am 21. 2 2019 von <https://www.welt.de/wirtschaft/article173958303/Infraschall-Studien-sollen-Aufklaerung-ueber-moegliche-Gefahren-der-Windkraft-geben.html>

Wikimedia, D. f. (Hrsg.). (13. 10 2015). *Hydroelectric dam german - Wikimedia*. Abgerufen am 7. 4 2019 von https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/Hydroelectric_dam_german.png

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (25. 12 2017). *Wandenergieanlag - Wikipedia*. Abgerufen am 12. 1 2019 von <https://lb.wikipedia.org/wiki/Wandenergieanlag>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (26. 11 2017). *Widerstandsläufer (Turbine) - Wikipedia*. Abgerufen am 19. 1 2019 von [https://de.wikipedia.org/wiki/Widerstandsläufer_\(Turbine\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Widerstandsläufer_(Turbine))

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (30. 11 2018). *Darrieus-Rotor - Wikipedia*. Abgerufen am 7. 2 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Darrieus-Rotor>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (17. 12 2018). *Dynamischer Auftrieb - Wikipedia*. Abgerufen am 7. 2 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Dynamischer_Auftrieb

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (21. 11 2018). *Elektrizitätswerk der Stadt Zürich* - *Wikipedia*. Abgerufen am 24. 11 2018 von https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrizitätswerk_der_Stadt_Zürich#Limmatwerke

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (3. 4 2018). *Kraftwerk Letten* - *Wikipedia*. Abgerufen am 24. 11 2018 von https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerk_Letten#Elektrizitätswerk

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (20. 10 2018). *Liste von Pumpspeicherkraftwerken* - *Wikipedia*. Von https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Pumpspeicherkraftwerken#Gr%C3%B6%C3%9Fte_Pumpspeicherkraftwerke_weltweit abgerufen

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (22. 3 2018). *Liste von Windkraftanlagen in Luxemburg* - *Wikipedia*. Abgerufen am 9. 4 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Windkraftanlagen_in_Luxemburg

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (29. 7 2018). *Pumpspeicherkraftwerk* - *Wikipedia*. Abgerufen am 18. 11 2018 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (2. 12 2018). *Vertikalrotor (Windturbine)* - *Wikipedia*. Abgerufen am 19. 1 2019 von [https://de.wikipedia.org/wiki/Vertikalrotor_\(Windturbine\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Vertikalrotor_(Windturbine))

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (27. 8 2018). *Wasserkraft* - *Wikipedia*. Abgerufen am 31. 10 2018 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserkraft>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (12. 1 2018). *Wasserwerk* - *Wikipedia*. Abgerufen am 24. 11 2018 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserwerk>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (25. 10 2018). *Windenergie* - *Wikipedia*. Abgerufen am 28. 12 2018 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Windenergie>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (25. 9 2018). *Windgenerator* - *Wikipedia*. Abgerufen am 17. 2 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Windgenerator>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (6. 2 2019). *Betzsches Gesetz* - *Wikipedia*. Abgerufen am 17. 2 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Betzsches_Gesetz

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (22. 2 2019). *Dotierung* - *Wikipedia*. Abgerufen am 5. 4 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Dotierung#p-n-Übergang,_Bauteile

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (7. 4 2019). *EU-Emissionshandel* - *Wikipedia*. Abgerufen am 9. 4 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/EU-Emissionshandel>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (4. 3 2019). *Raumladungszone* - *Wikipedia*. Abgerufen am 5. 4 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Raumladungszone>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (3. 1 2019). *Rötelfalke* - *Wikipedia*. Abgerufen am 9. 3 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Rötelfalke>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (30. 3 2019). *Silicium* - *Wikipedia*. Abgerufen am 31. 3 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Silicium>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (13. 3 2019). *Solarzelle* - *Wikipedia*. Abgerufen am 31. 3 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Solarzelle>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (25. 2 2019). *Vestas Wind Systems* - *Wikipedia*. Abgerufen am 9. 4 2019 von https://de.wikipedia.org/wiki/Vestas_Wind_Systems#5-MW-Plattform

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (8. 1 2019). *Windkraftanlage* - *Wikipedia*. Abgerufen am 19. 1 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage>

Wikipedia, D. f. (Hrsg.). (3. 4 2019). *Wirkungsgrad* - *Wikipedia*. Abgerufen am 5. 4 2019 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad>

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (9. 11 2018). *Centrale de Vianden* - *Wikipédia*. Abgerufen am 24. 11 2018 von https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_de_Vianden

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (20. 11 2018). *Effet photoélectrique* - *Wikipédia*. Abgerufen am 31. 3 2019 von https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photoélectrique

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (22. 7 2018). *Georges Darrieus* - *Wikipédia*. Abgerufen am 7. 2 2019 von https://fr.wikipedia.org/wiki/Georges_Darrieus

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (10. 11 2018). *Parc Éole* - *Wikipédia*. Abgerufen am 17. 2 2019 von https://fr.wikipedia.org/wiki/Parc_Éole

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (28. 3 2019). *Cellule photovoltaïque* - *Wikipédia*. Abgerufen am 5. 4 2019 von https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovoltaïque

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (2. 4 2019). *Énergie solaire* - *Wikipédia*. Abgerufen am 5. 4 2019 von https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_solaire#Techniques_pour_utiliser_l'énergie_solaire

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (6. 2 2019). *Éolienne* - *Wikipédia*. Abgerufen am 7. 2 2019 von <https://fr.wikipedia.org/wiki/Éolienne>

Wikipédia, L. I. (Hrsg.). (11. 2 2019). *Limite de Betz* - *Wikipédia*. Abgerufen am 17. 2 2019 von https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz

Wikipedia, T. f. (Hrsg.). (3. 8 2018). *Savonius wind turbine* - *Wikipedia*. Abgerufen am 19. 1 2019 von https://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine

Wikipedia, T. f. (Hrsg.). (6. 2 2019). *Betz's law* - *Wikipedia*. Abgerufen am 17. 2 2019 von https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law

Wikipedia, T. f. (Hrsg.). (21. 1 2019). *Darrieus wind turbine* - *Wikipedia*. Abgerufen am 7. 2 2019 von https://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine

Wikipedia, T. f. (Hrsg.). (6. 4 2019). *First Solar* - *Wikipedia*. Abgerufen am 7. 4 2019 von https://en.wikipedia.org/wiki/First_Solar