

Potenziale der erneuerbaren Energieproduktion im Kanton Luzern



Photovoltaikanlage Swissporarena © BE Netz AG

Impressum

Auftraggeber

Regierungsrat Fabian Peter
Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement (BUWD)
c/o Dienststelle Umwelt und Energie (uwe)
www.uwe.lu.ch

Projektsteuerung

Jürgen Ragaller, Politik und Strategie, Klima (BUWD)
Bruno Rösli, Dienststelle Landwirtschaft und Wald (lawa)
Paul Hürlimann, Dienststelle Umwelt und Energie (uwe)

Projektleitung

Tobias Sommer, Dienststelle Umwelt und Energie (uwe)

Projektgruppe

Michiel Fehr, Dienststelle Landwirtschaft und Wald (lawa)
Jules Gut, Dienststelle Umwelt und Energie (uwe)

Externe fachliche Begleitung

Chris Steffen, diePROJEKTFABRIK AG, Luzern

Luzern, 22. Mai, 2024, Version 1.0

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	4
2 Ziel	6
3 Methodik	7
3.1 Vereinfachungen und Annahmen	7
3.2 Energieperspektiven 2050+ des Bundes	8
3.3 Skalierung auf den Kanton Luzern	9
3.4 Ausbauziele pro Energieträger	9
3.5 Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Kanton Luzern	10
3.6 Ziele der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion im Kanton Luzern	12
3.7 Systemgrenzen	13
4 Politische Rahmenbedingungen	15
4.1 Planungsbericht über die Klima- und Energiepolitik	15
4.2 Offensive Holz	16
4.3 Biogasstrategie	16
4.4 Revisionen des kantonalen Richtplans und des kantonalen Energiegesetzes	16
4.5 Politische Vorstösse	16
5 Potenziale erneuerbarer Energieproduktion	18
5.1 Solarenergie Photovoltaik	18
5.2 Windenergie	20
5.3 Wasserkraft	22
5.4 Geothermie untief	24
5.5 Luft	26
5.6 Oberflächengewässer	28
5.7 Grundwasser	30
5.8 Solarenergie Thermisch	32
5.9 Geothermie tief	34
5.10 Abwärme	36
5.11 Biomasse verholzt	38
5.12 Biomasse nicht verholzt	40
6 Übersicht aller Ausbauziele	43
6.1 Strom	44
6.2 Wärme	45
6.3 Kühlen	47
7 Anhang	47
7.1 Anhang A1: Involvierte Organisationen	47
7.2 Anhang A2: Ausbauziele basierend auf den EP2050+	48
8 Literatur	50

1 Zusammenfassung

Der Kanton Luzern strebt den Ausbau der erneuerbaren Energien an. Diesen Auftrag erhielt die Regierung aus der parlamentarischen Beratung des Planungsberichts Klima und Energie. Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist nötig, damit der Kanton das Klimaschutzziel «Netto null bis 2050» erreichen kann. Mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger löst sich der Kanton Luzern aus der Abhängigkeit von Energieträgern aus dem Ausland und setzt dabei auf ein modernes und zugleich kosteneffizientes Energiesystem. Mit der Nutzung einheimischer Energien trägt der Kanton Luzern nicht nur zum Erreichen der Ausbauziele in der Schweiz bei, sondern generiert auch Wertschöpfung vor Ort. Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist mit der Energiestrategie 2050 des Bundes und mit den Vorgaben des Klima- und Innovationsgesetzes konform.

In diesem Bericht wird aufgezeigt, wie hoch das Potenzial zur Strom- und Wärmeproduktion der verschiedenen erneuerbaren Energieträger im Kanton Luzern ist. Zusätzlich werden aus fachlicher Sicht für jeden Energieträger kantonale Ausbauziele vorgeschlagen, um das Ziel «100 Prozent erneuerbare Energieversorgung bis 2050» zu erreichen.

Die vorgeschlagenen Ausbauziele dienen als Grundlage für die Erarbeitung von weiterführenden Strategien und Umsetzungsmassnahmen zu den einzelnen erneuerbaren Energieträgern. Die Ergebnisse sind eine Grobabschätzung und basieren auf aktuell zur Verfügung stehenden Daten. Bei der Datenerhebung wurde der Schwerpunkt auf die Reproduzierbarkeit gelegt, so dass die Daten regelmässig und automatisiert ins Luzerner Klima- und Energieinformationssystem (LU-KEIS) übertragen und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden können. Die Daten ermöglichen ein Monitoring der aktuellen Energieproduktion im Vergleich zu den vorgeschlagenen Zielpfaden. Bei Änderung der technologischen und politischen Rahmenbedingungen können die Ausbauziele der einzelnen Energieträger angepasst werden. Der Fokus liegt auf dem Gesamtüberblick des Energiesystems und nicht auf der Detailausarbeitung einzelner Technologien. Saisonale Dynamiken und die Abstimmung der Energieträger untereinander sind nicht explizit berücksichtigt, jedoch durch Abstützung auf die Energieperspektiven 2050+ (Szenario ZERO-Basis) implizit beachtet. Die Abschätzung soll die Technologien mit dem grössten Potenzial bzw. den grössten Herausforderungen identifizieren. Für diese Technologien sind dann weitere Detailstudien nötig.

Der Bericht wurde durch die Projektgruppe verfasst und in regelmässigen Abständen mit der Projektsteuerung gepiegelt. Im Herbst 2023 wurden die Ergebnisse mit Repräsentanten und Repräsentantinnen von zwölf Organisationen diskutiert und Vorschläge eingearbeitet. Im Frühjahr 2024 wurde der Bericht allen involvierten Personen (Workshopteilnehmende sowie weitere Fachexperten und Fachexpertinnen) zur Konsultation zugestellt und anschliessend überarbeitet.

Insgesamt wurden zwölf erneuerbare Energieträger untersucht: Photovoltaik, Solarthermie, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse verholzt, Biomasse nicht verholzt und die Umweltwärmequellen Geothermie tief, Geothermie untief, Grundwasser, Oberflächengewässer, Luft und Abwärme ([Abbildung 1](#)).

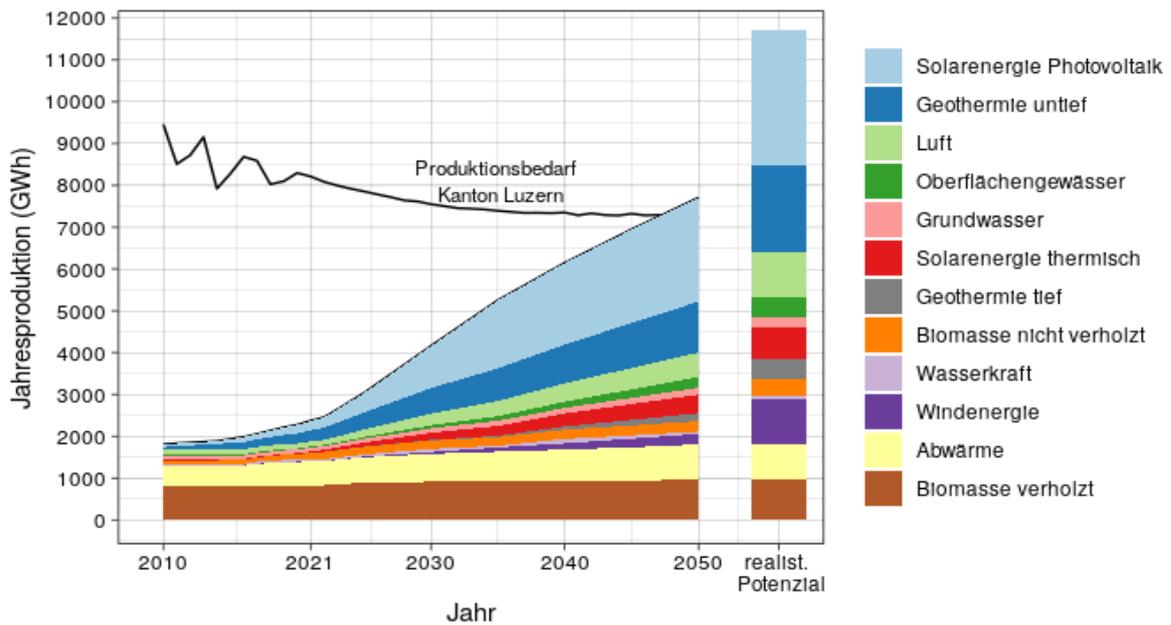


Abb. 1: Übersicht der Entwicklung der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion im Kanton Luzern bis 2050 und die realistischen Potenziale (Balken rechts) der einzelnen Energieträger. Die schwarze durchgezogene Linie zeigt den Produktionsbedarf im Kanton Luzern. Für mehr Details, siehe [Kapitel 6](#).

	Einheit	2021	2050
Endenergie			
Endenergie Kanton Luzern	GWh	13'190	9'210
Endenergie Treibstoffe Kanton Luzern	GWh	3'810	1'150
Endenergie Strom Kanton Luzern	GWh	3'640	4'000
Endenergie Wärme Kanton Luzern	GWh	5'730	4'060
Produktionsbedarfe			
Produktionsbedarf Strom und Wärme Kanton Luzern	GWh	9'960	9'070
Produktionsbedarf Strom Kanton Luzern	GWh	3'940	4'810
Produktionsbedarf Wärme Kanton Luzern	GWh	6'020	4'260
Produktionsbedarf Strom innerhalb Kanton Luzern	GWh	2'190	2'970
Produktionsbedarf Strom ausserhalb Kanton Luzern	GWh	1'740	1'830
Produktionsbedarf Wärme innerhalb Kanton Luzern	GWh	6'020	4'260
Produktionsbedarf Wärme innerhalb Kanton Luzern inkl. Wärmepumpenstrom	GWh	7'000	5'350
Produktionsbedarf Wärme ausserhalb Kanton Luzern	GWh	0	0
Produktionsbedarf Strom und Wärme innerhalb Kanton Luzern	GWh	8'210	7'240
Produktionsziele			
erneuerbare Produktion Strom und Wärme innerhalb Kanton Luzern	GWh	2'400	7'710
erneuerbare Produktion Strom innerhalb Kanton Luzern	GWh	540	3'100
erneuerbare Produktion Wärme innerhalb Kanton Luzern ohne Wärmepumpenstrom	GWh	1'870	4'610
erneuerbare Produktion Wärme innerhalb Kanton Luzern inkl. Wärmepumpenstrom	GWh	2'080	5'510
Anteile			
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am Produktionsbedarf für Strom	-	0.14	0.65
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am Produktionsbedarf für Wärme	-	0.30	1.03
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am innerkantonalen Produktionsbedarf für Strom	-	0.24	1.04
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am innerkantonalen Produktionsbedarf für Wärme	-	0.30	1.03

Abb. 2: Übersicht der Energielandschaft im Jahr 2021 und 2050 im Kanton Luzern¹

¹ Zahlen zur Endenergie und zu den Produktionsbedarfen basierend auf skalierten Werten der EP2050+, gerundet auf 10 GWh.

Im Jahr 2050 müssen voraussichtlich etwa 4'810 GWh Strom produziert werden, um den Strombedarf im Kanton Luzern zu decken (eine Übersicht aller genannten Werte findet sich in [Abbildung 2](#)). Von diesen 4'810 GWh wird angenommen, dass 2'970 GWh innerhalb des Kantons Luzern und 1'830 GWh ausserhalb des Kantons Luzern produziert werden². Der Bedarf an Wärmeproduktion im Jahr 2050 beträgt 5'350 GWh inklusive Wärmepumpenstrom und 4'260 GWh exklusive Wärmepumpenstrom. Diese Wärme soll vollständig im Kanton Luzern produziert werden. Daraus ergibt sich ein Gesamtproduktionsbedarf für Strom und Wärme von 7'240 GWh (2'970 GWh Strom + 4'260 GWh Wärme³), welcher im Jahr 2050 innerhalb des Kantons Luzern produziert werden soll.

Die Summe der Ausbauziele aller erneuerbarer Energieträger soll im Jahr 2050 den Produktionsbedarf des Kantons Luzern decken. Das vorgeschlagene Ausbauziel für Strom beträgt 3'100 GWh und übersteigt den Produktionsbedarf von 2'970 GWh um 4 %. Mit diesem Ausbauziel werden 65 % des gesamten Produktionsbedarfs des Kantons innerhalb des Kantons Luzern produziert. Das Ausbauziel für Wärme beträgt 5'510 GWh inklusive Wärmepumpenstrom (4'610 GWh exklusive Wärmepumpenstrom). Das Produktionsziel für Wärme übersteigt den Produktionsbedarf von 5'350 GWh um 3 %. Insgesamt ergibt sich ein Produktionsziel für Strom und Wärme von 7'710 GWh (3'100 GWh Strom + 4'610 GWh Wärme⁴).

Um diese Ziele zu erreichen ist eine über dreifache Steigerung der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion von 2'400 GWh im Jahr 2021 auf 7'710 GWh nötig ([Abbildung 1](#), [Abbildung 2](#)). Beim Strom ist eine Steigerung der erneuerbaren Energieproduktion von aktuell 540 GWh auf 3'100 GWh um einen Faktor 5.8 nötig. Bei der Wärme ist eine Steigerung von 2'080 GWh auf 5'510 GWh um einen Faktor 2.7 nötig.

Sowohl beim Strom als auch bei der Wärme ist mit diesen ambitionierten Zielen das Potenzial noch nicht ausgeschöpft (Balken in [Abbildung 1](#)). Die Ziele «100 Prozent erneuerbare Energieversorgung bis 2050» und «Netto null bis 2050» sind daher realistisch und machbar. Zur Zielerreichung werden alle erneuerbaren Energieträger benötigt. Werden die aus fachlicher Sicht anzustrebenden Ausbauziele je Energieträger erreicht, könnte die Energieproduktion im Kanton Luzern im Jahr 2050 wie folgt aussehen: Die Photovoltaik leistet mit einem Anteil von 32 % den grössten Beitrag zur kantonalen Energieproduktion ([Abbildung 1](#)). Die untiefe Geothermie folgt mit 16 %. Verholzte Biomasse und Abwärme spielen im Jahr 2050 mit 12 % und 11 % weiterhin eine tragende Rolle. Die restlichen Energieträger sind in der Summe ebenso wichtig, tragen jedoch einzeln mit weniger als 10 % bei.

2 Ziel

Übergeordnetes Ziel dieses Berichts sind «Netto-Null Treibhausgasemissionen bis 2050» gemäss Planungsbericht über die Klima- und Energiepolitik des Kantons Luzern (PB K&E, [B 87](#)) (Kanton Luzern, 2021). Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist mit der Energiestrategie

² Die ausserkantonale Stromproduktion wurde aus der nationalen Wasserkraftproduktion abgeleitet, siehe [Kapitel 3.6](#).

³ Bei dieser Summe ist der Strom für Wärmepumpen im Strom enthalten. Daher wird bei der Wärme der Wärmepumpenstrom nicht mitgezählt.

⁴ Wie weiter oben ist der Strom für Wärmepumpen im Strom enthalten. Daher wird bei der Wärme der Wärmepumpenstrom nicht mitgezählt.

2050 des Bundes und mit den Vorgaben des Klima- und Innovationsgesetzes (KIG) konform. Um das Netto-Null-Ziel bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernenergie zu erreichen, muss die Energieproduktion basierend auf erneuerbaren Energieträgern im Kanton Luzern zügig ausgebaut werden. Der vorliegende Fachbericht schlägt deshalb für jeden erneuerbaren Energieträger Ausbauziele zur Energieproduktion im Kanton Luzern vor. Diese sind so gewählt, dass sie den zu erwartenden Produktionsbedarf an Strom und Wärme im Jahr 2050 mit erneuerbaren Energien decken. Die Ausbauziele bilden die Grundlage, um die Strategien und Umsetzungsmassnahmen für die einzelnen Energieträger zu definieren. Aufgrund der fortschreitenden technologischen Entwicklung und sich verändernden politischen Rahmenbedingungen werden die Ziele regelmässig überprüft und gegebenenfalls angepasst. Der Umstieg auf erneuerbare Energieproduktion alleine reicht nicht aus, um das Ziel "Netto null bis 2050" zu erreichen. Zusätzlich müssen die nichtenergiebedingten Treibhausgasemissionen aus den Sektoren Abfall und Landwirtschaft reduziert bzw. durch natürliche oder technischen Senken aus der Atmosphäre entfernt werden. Der Energieaufwand für diese Senken ist durch die Abstützung auf die Energieperspektiven (Bundesamt für Energie, 2020a, siehe auch [Kapitel 3.2](#)) enthalten. Eine umfassende Treibhausbilanz ist jedoch nicht Teil dieses Berichts.

3 Methodik

3.1 Vereinfachungen und Annahmen

Die aktuelle Energieproduktion sowie die Ausbauziele in diesem Bericht sind eine Grobabschätzung und spiegeln eine fachliche Sicht wieder. Der Fokus liegt auf der Gesamtenergiesystembetrachtung und nicht auf einer detaillierten Ausarbeitung der einzelnen Energieträger. Dieser Bericht soll ausreichend genau sein, um strategische Fragestellungen, welche das Gesamtenergiesystem betreffen, beantworten zu können. Folgende Einschränkungen sind zu beachten:

1. *Speicher*: Es werden Jahresenergiebilanzen gezeigt. Saisonale Dynamiken und der Ausgleich dieser Dynamiken durch Speicher werden nicht explizit betrachtet. Durch die Abstützung auf EP2050+ werden Speicher jedoch implizit in dem Masse vorausgesetzt, wie sie im Szenario ZERO-Basis vorgesehen sind (siehe hierzu auch [Kapitel 3.2](#)). Die Massnahme "Förderung Winterstromproduktion und Technologien für Strom und Wärme zum saisonalen Ausgleich (KS-E2.3)" des PB K&E befasst sich mit Speichern.
2. *Importe*: Auch im Jahr 2050 werden rund 25 % der Energieträger aus dem Ausland importiert (im Vergleich zu den heutigen rund 75 %). Importiert werden in der Jahresbilanz insbesondere Biogas, Wasserstoff und darauf basierende synthetische Brenn- und Treibstoffe. Diese Importe werden weitgehend im Verkehrs- und Transportsektor verwendet. Ein kleinerer Teil wird in der Industrie für Prozesswärme eingesetzt sowie zur Spitzenlastdeckung in thermischen Netzen. Der Importanteil im Wärmesektor wird in diesem Bericht vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass kein Biogas und kein Wasserstoff für die Wärmeproduktion verwendet wird.
3. *Wärmepumpen*: Für die Jahresarbeitszahlen von Wärmepumpen werden die Mittelwerte der Jahresarbeitszahlen des Jahres 2019 und der Prognose für 2050 angenommen (Tabelle 42 in Bundesamt für Energie, 2020b):
 - Luft-Wasser-Wärmepumpen: 3
 - Erdsonden-Wärmepumpen: 3.6

- Oberflächengewässer-Wärmepumpen: 3.8
- Grundwasser-Wärmepumpen: 4

Eine Jahresarbeitszahl von 3 bedeutet, dass für drei Energieeinheiten Heizwärme auf Nutztemperatur zwei Energieeinheiten aus der Umwelt (z.B. dem Erdreich) und eine Energieeinheit Strom aufgewendet werden.

4. *Graue Energie*: Graue Energie bezeichnet die "versteckte" Energie, welche für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produkts aufgewendet wird. Für die Definition der Ausbauziele pro Energieträger wurde die graue Energie nicht mitbetrachtet.
5. *Kühlen*: Der Fokus bei den einzelnen Energieträgern liegt auf Heizen, nicht auf Kühlen. In [Kapitel 6.3](#) wird die Entwicklung des Kühlbedarfs grob abgeschätzt und mit der Wärmeproduktion in Bezug gesetzt. Kühlen ist auch ein Thema der Massnahme "KA-E1 Gesamtsystembetrachtung Klima und Bau" des PB K&E.
6. *Rundungsdifferenzen*: Für die Berechnungen von Energien wurden Zahlen ungerundet aus den jeweiligen Datengrundlagen verwendet. Um die Lesbarkeit zu verbessern und keine unrealistische Genauigkeit vorzutäuschen, wurden diese Zahlen im Bericht auf die etwa zu erwartenden Genauigkeiten gerundet. In manchen Fällen kann es im Bericht dadurch zu Abweichungen zwischen den Summen von gerundeten Werten und den gerundeten Summen kommen.
7. *Skalierung*: Werden im Bericht Bundesziele aus den EP2050+ auf den Kanton Luzern skaliert, wird konsequent mit einer Skalierung von 6.3 % gearbeitet. Da jeder Energieträger standortspezifische Besonderheiten aufweist, sind die skalierten Werte als Referenz aufzufassen, welche angibt, ob sich der Kanton Luzern im Vergleich zu den Bundeszielen über- oder unterdurchschnittlich verhält. Es gibt jedoch Energieträger, bei denen aufgrund mangelnder Datenlage die skalierten Werte direkt für die kantonalen Potenziale bzw. die Ausbauziele übernommen wurden. Dies ist im Text dann so vermerkt. Die übergeordneten Ziele für Wärme und Strom setzen sich aus einem Mix aus Energieträgern zusammen. Hier halten wird die Skalierung aus den EP2050+ auf den Kanton Luzern für gültig.

3.2 Energieperspektiven 2050+ des Bundes

Die dargestellten Ausbauziele orientieren sich an den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+), Szenario ZERO-Basis des Bundes (Bundesamt für Energie, 2020a). In den EP2050+ werden insgesamt fünf Szenarien untersucht: (i) Weiter wie bisher (WWB) (ii) ZERO-Basis, (iii) ZERO-A, (iv) ZERO-B und (iv) ZERO-C. Alle "ZERO"-Szenarien führen zu Netto-Null Emissionen im Jahr 2050, jedoch basierend auf unterschiedlichen Technologieschwerpunkten. In diesem Bericht wird das Szenario ZERO-Basis verwendet, weil es für den Kanton Luzern aktuell das realistischste Szenario darstellt. ZERO-Basis zeichnet sich durch eine hohe Kosteneffizienz, eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz, eine hohe energetische Versorgungssicherheit und durch seine Robustheit bezüglich der Zielerreichung aus. Der Fokus liegt bei diesem Szenario auf Energieeffizienz, Elektrifizierung des Verkehrs und der Wärme (Raumwärme) und dem Ausbau thermischer Netze. Biogene Brenn- und Treibstoffe sowie Wasserstoff und darauf aufbauende synthetische Energieträger werden zudem wichtig sein, um Hochtemperaturprozesse in der Industrie, die Spitzenlastabdeckung bei Fernwärmenetzen, Segmente des schweren Güterverkehrs und den internationalen Flugverkehr zu dekarbonisieren. Zusätzlich werden Technologien eingesetzt, um CO₂-Emissionen aus der

Atmosphäre zu entfernen (Carbon Capture and Storage [CCS] oder Negativemissionstechnologien [NET])⁵.

3.3 Skalierung auf den Kanton Luzern

Der mittlere Stromverbrauch der Schweiz in den Jahren 2015 bis 2021 betrug 57.7 TWh, im Kanton Luzern 3.6 TWh. Der Stromverbrauch des Kantons Luzern beträgt damit 6.3 % des Stromverbrauchs in der Schweiz. Im vorliegenden Bericht wird mit diesem Skalierungsfaktor von 6.3 % eine erste Abschätzung des künftigen Verbrauchs von Strom, Wärme und Gesamtenergie des Kantons Luzern basierend auf den EP2050+ abgeleitet. Da der Wärmeverbrauch nicht flächendeckend gemessen wird, scheint eine Übernahme des Skalierungsfaktors basierend auf Strommessungen als erste pragmatische Näherung legitim. Die Skalierung der Bundeswerte berücksichtigt keine standortspezifischen Besonderheiten des Kantons Luzern. Dies wird z.B. besonders deutlich beim Energieträger Wasserkraft ([Kapitel 5.3](#)). Da der Kanton Luzern im Vergleich zum Bundesdurchschnitt kaum Wasserkraftpotenzial besitzt und damit auch wenig Energie aus Wasserkraft produziert, sind bei diesem Energieträger die kantonalen Werte deutlich geringer als die skalierten Bundeswerte. Für die Ausbauziele der meisten Energieträger werden die skalierten Bundesziele daher lediglich als Orientierungshilfe verwendet und die kantonalen Auswertungen bestimmen die Ausbauziele. Wenn keine kantonalen Abschätzungen für die Zukunft möglich sind und keine Abweichung vom Bundesdurchschnitt erwartet wird, werden die skalierten Bundesziele für den Kanton Luzern übernommen.

3.4 Ausbauziele pro Energieträger

Die sechs Hauptenergieträger sind Sonne, Wind, Wasser, Biomasse, Umweltwärme und Abwärme. Diese werden weiter aufgeteilt in die zwölf Energieträger: Solarenergie Photovoltaik (PV), Solarenergie thermisch, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse verholzt, Biomasse nicht verholzt (Biogas), Geothermie tief, Geothermie unteuf (hauptsächlich Erdsonden), Grundwasser, Oberflächengewässer, Luft und Abwärme.

In einem ersten Schritt werden kantonale Datensätze und Berichte verwendet um für jeden der zwölf Energieträger die aktuelle Produktion, das theoretische Potenzial und das realistische Potenzial zu bestimmen (für Definitionen siehe [Kapitel 3.7](#)). Basierend auf diesen Daten wird ein erster kantonaler Zielwert für 2050 festgelegt und die Etappenziele von heute bis 2050 bestimmt (blau in [Abbildung 3](#)). Zur Kontrolle, dass die kantonalen Werte die richtige Grössenordnung haben, werden zusätzlich aus den EP2050+ pro Energieträger die entsprechenden Werte mit dem Skalierungsfaktor auf den Kanton Luzern umgerechnet (grau in [Abbildung 3](#)).

Diese Schritte werden für alle zwölf erneuerbaren Energieträger durchgeführt. Anschliessend werden die Ausbauziele der einzelnen Energieträger separat für die Bereiche Wärme und Strom aufsummiert und mit den auf den Kanton Luzern skalierten Bundeszielen verglichen (siehe [Kapitel 3.6](#)). Stimmen die kantonalen Ausbauziele für Strom und Wärme nicht mit den skalierten Bundeszielen überein, werden die kantonalen Ausbauziele der einzelnen

⁵ Die Szenarien ZERO-A, ZERO-B, und ZERO-C legen ein grösseres Gewicht auf Elektrifizierung (ZERO-A), Biogas, synthetische Gase, Wasserstoff (ZERO-B) bzw. Wärmenetze, flüssige biogene und synthetische Treibstoffe (ZERO-C) im Vergleich zu ZERO-Basis. Die für diesen Bericht verwendeten Daten der Energieperspektiven 2050+ sind als Excel-Datei online publiziert (Bundesamt für Energie, 2020c). Für diesen Bericht wurden folgende Arbeitsblätter dieser Excel-Datei verwendet: Bruttoenergieverbrauch (03 BEV), Endenergieverbrauch (04 EEV), Stromverbrauch (05 Elektrizität), Endverbrauch erneuerbarer Energien (07 Erneuerbare Energien), Wärmeverbrauch (11 Wärme), Stromverbrauch der Wärmepumpen (12 Wärmepumpen) und Stromerzeugung (19 Energiewirtschaft).

Energieträger so lange angepasst, bis deren Summe den skalierten Bundeszielen entspricht. Die kantonalen Ausbauziele für die Einzelenergieträger können dabei weiterhin von den auf den Kanton Luzern skalierten Bundeszielen abweichen.

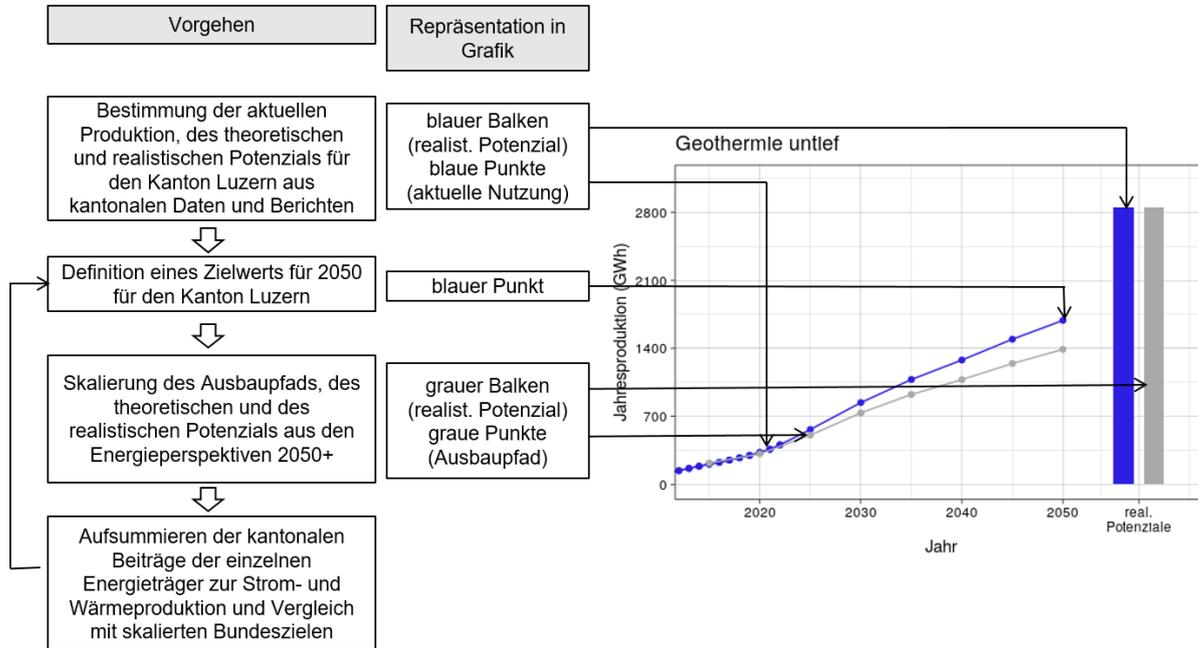


Abb. 3: Schematisches Vorgehen zur Festlegung der Ausbauziele für die einzelnen Energieträger am Beispiel der untiefen Geothermie.

3.5 Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Kanton Luzern

Der Endenergieverbrauch im Kanton Luzern (skaliert aus den EP2050+) soll von aktuell 13'190 GWh im Jahr 2021 auf 9'210 GWh im Jahr 2050 sinken ([Abbildung 4](#), [Abbildung 5](#)). Dies entspricht einer Reduktion von 30 %. Diese Reduktion beruht sowohl auf Effizienzmassnahmen (z.B. Dämmung der Gebäudehülle) als auch auf dem Wechsel von den fossilen Energieträgern Öl und Erdgas hin zu Elektrizität, welcher mit grösseren Wirkungsgraden verbunden ist, vor allem auch im Treibstoffsektor. Der Strombedarf selbst steigt aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung in den Sektoren Verkehr (Elektrofahrzeuge) und Wärme (Wärmepumpen) an⁶ (blau in [Abbildung 4](#)). Dieser Anstieg wird jedoch durch die Einsparungen im Bereich Wärme (orange) und Treibstoffe⁷ (grau) mehr als kompensiert. Der Endenergieverbrauch von 9'210 GWh im Jahr 2050 kann in eine Dauerleistung von 3'320 W pro Person umgerechnet werden⁸. Mit der angestrebten Reduktion wird das Ziel "2000-Watt-Dauerleistung" der 2000-Watt-Gesellschaft bis zum Jahr 2050 noch nicht erreicht⁹.

⁶ Der Anstieg beim Stromverbrauch beträgt trotz vermehrtem Einsatz von Wärmepumpen und Elektrifizierung des Verkehrs lediglich 10 %. Prozesse wie Carbon Capture and Storage (CCS), Stromverbrauch durch Grosswärmepumpen für Wärmenetze und Elektrolyse zur Wasserstoffherzeugung sind im Umwandlungssektor bilanziert und werden beim Produktionsbedarf berücksichtigt, siehe [Kapitel 3.6](#).

⁷ Treibstoffe beinhalten Benzin, Diesel, Kerosin, sonstige Mineralölprodukte, biogene Treibstoffe und Power-to-X (PtX, d.h. synthetische Treibstoffe, hergestellt unter Einsatz von Elektrizität, wie z.B. Wasserstoff). Im Jahr 2050 tragen nur biogene Treibstoffe und PtX zu den Treibstoffen bei.

⁸ Diese Leistung ist bezogen auf einen Primärenergieverbrauch (hergeleitet aus dem Endenergieverbrauch) von 12'110 GWh, welcher mit der Einwohneranzahl des Kantons Luzern von 416'350 und 8'800 Jahresstunden in die angegebene mittlere Leistung (Dauerleistung) umgerechnet wird.

⁹ In Kanton Luzern (2024) sowie in Kanton Luzern (2019) (Art. 1 Abs. 3) ist die 2000-Watt-Gesellschaft als langfristiges Ziel erwähnt.

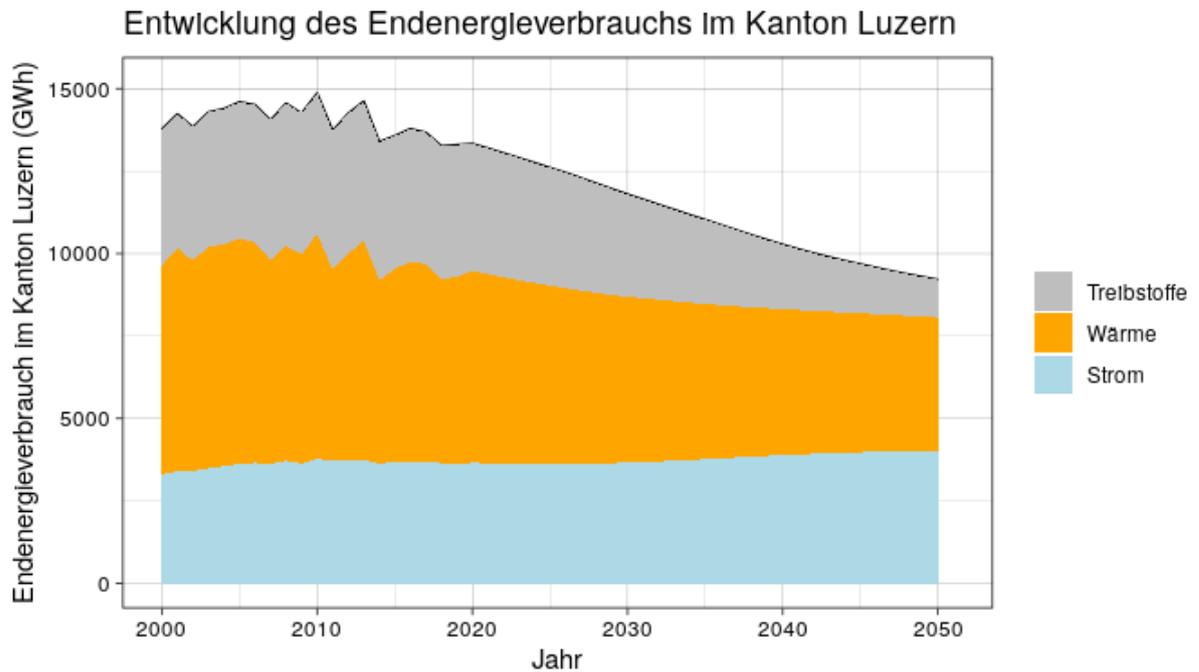


Abb. 4: Erwartete Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Kanton Luzern

	Einheit	2021	2050
Endenergie			
Endenergie Kanton Luzern	GWh	13'190	9'210
Endenergie Treibstoffe Kanton Luzern	GWh	3'810	1'150
Endenergie Strom Kanton Luzern	GWh	3'640	4'000
Endenergie Wärme Kanton Luzern	GWh	5'730	4'060
Produktionsbedarfe			
Produktionsbedarf Strom und Wärme Kanton Luzern	GWh	9'960	9'070
Produktionsbedarf Strom Kanton Luzern	GWh	3'940	4'810
Produktionsbedarf Wärme Kanton Luzern	GWh	6'020	4'260
Produktionsbedarf Strom innerhalb Kanton Luzern	GWh	2'190	2'970
Produktionsbedarf Strom ausserhalb Kanton Luzern	GWh	1'740	1'830
Produktionsbedarf Wärme innerhalb Kanton Luzern	GWh	6'020	4'260
Produktionsbedarf Wärme innerhalb Kanton Luzern inkl. Wärmepumpenstrom	GWh	7'000	5'350
Produktionsbedarf Wärme ausserhalb Kanton Luzern	GWh	0	0
Produktionsbedarf Strom und Wärme innerhalb Kanton Luzern	GWh	8'210	7'240
Produktionsziele			
erneuerbare Produktion Strom und Wärme innerhalb Kanton Luzern	GWh	2'400	7'710
erneuerbare Produktion Strom innerhalb Kanton Luzern	GWh	540	3'100
erneuerbare Produktion Wärme innerhalb Kanton Luzern ohne Wärmepumpenstrom	GWh	1'870	4'610
erneuerbare Produktion Wärme innerhalb Kanton Luzern inkl. Wärmepumpenstrom	GWh	2'080	5'510
Anteile			
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am Produktionsbedarf für Strom	-	0.14	0.65
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am Produktionsbedarf für Wärme	-	0.30	1.03
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am innerkantonalen Produktionsbedarf für Strom	-	0.24	1.04
Anteil der innerkantonalen erneuerbaren Produktion am innerkantonalen Produktionsbedarf für Wärme	-	0.30	1.03

Abb. 5: Übersicht der Energielandschaft im Jahr 2021 und 2050 im Kanton Luzern

Die Endenergieverbräuche in den Sektoren Strom und Wärme im Jahr 2050 bilden die Basis für den Produktionsbedarf des Kantons Luzern im Jahr 2050 und betragen 4'000 GWh respektive 4'060 GWh. Beim Produktionsbedarf müssen allerdings zusätzlich Verluste und der Bedarf im Umwandlungssektor miteinbezogen werden, siehe [Kapitel 3.6](#). Es ist weiterhin zu beachten, dass die Sektoren Strom und Wärme nicht eindeutig trennbar sind, da Strom teilweise zur Wärmeerzeugung beiträgt (z.B. mittels Wärmepumpen). Dieser Anteil ist in [Abbildung 4](#) im Sektor Strom bilanziert.

3.6 Ziele der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion im Kanton Luzern

Die in Kapitel [Kapitel 3.5](#) ermittelten Endenergieverbräuche für Strom (4'000 GWh) und Wärme (4'060 GWh) sollen im Jahr 2050 vollständig durch erneuerbare Energien gedeckt werden (rechte Balken in [Abbildung 6](#)). Um dieses Ziel zu erreichen, müssen bei der Produktion ebenfalls Verluste miteinbezogen werden. Im Stromsektor beinhalten die Verluste neben den Verteilverlusten ebenso die Energie für Umwandlungsprozesse (z.B. Wasserstoffherzeugung) und Energie zur Abscheidung und Speicherung von CO₂ (CCS, Carbon Capture and Storage, NET, Negativemissionstechnologien). Im Wärmesektor wurden Verteilverluste von 5 % angenommen¹⁰.

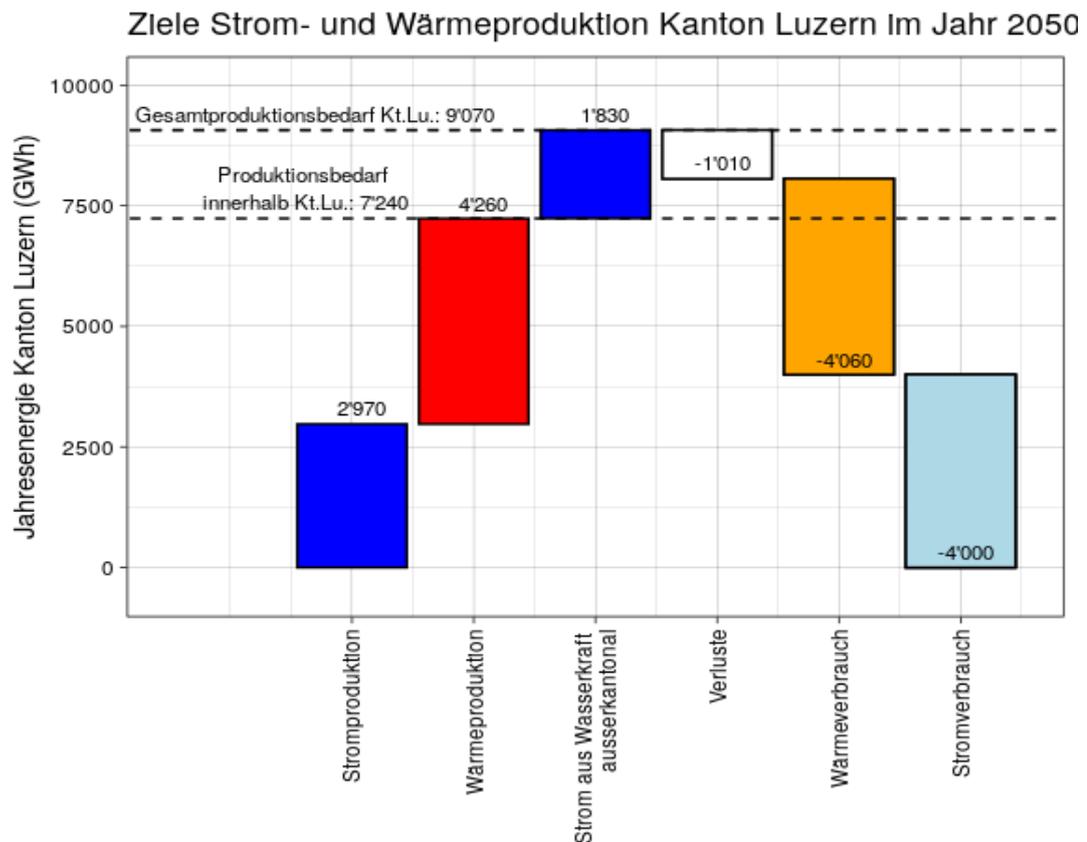


Abb. 6: Ziellandschaft für Strom und Wärme im Jahr 2050 im Kanton Luzern. Der Strom für Wärmepumpen ist in dieser Grafik in der Stromproduktion (blaue Balken) beinhaltet und bei der Wärmeproduktion (rote Balken) abgezogen, um Doppelzählungen zu vermeiden.

¹⁰ Verteilverluste in thermischen Netzen liegen zwischen 10 % bis 15 % bei Hochtemperaturnetzen und 0 % bei Niedertemperaturnetzen (Anergienetze) (Hangartner u. a., 2018). Bei einem Grossteil des Wärmesektors sind Produktion und Nutzung fast am gleichen Ort (z.B. bei Erdsonden oder Luft-Wasser-Wärmepumpen). In diesem Fall sind kaum Wärmeverluste zu erwarten. Daher ist ein mittlerer Verteilverlust von 5 % eine vertretbare Annahme.

Die Gesamtverluste betragen 1'010 GWh. Unter Berücksichtigung der Verluste resultiert im Stromsektor ein Produktionsbedarf von 4'810 GWh und im Wärmesektor von 4'260 GWh ([Abbildung 5](#)). In der "Vorlage für eine sichere Stromversorgung"¹¹ ist für die erneuerbare Stromproduktion (skaliert auf den Kanton Luzern) im Jahr 2050 aktuell ein Zielwert von 5'330 GWh definiert, welcher das Ziel der EP2050+ (4'810 GWh) deutlich übertrifft. In diesem Bericht wird vorerst weiterhin von den Produktionszielen der EP2050+ ausgegangen. Die Wärmeversorgung soll vollständig durch Produktion innerhalb des Kantons Luzern gedeckt werden¹².

Im Stromsektor bildet auf Bundesebene die Wasserkraft eine wichtige Stütze. Da der Kanton Luzern kein Wasserkraftkanton ist, wird davon ausgegangen, dass der Kanton Luzern weiterhin Strom aus Wasserkraft beziehen wird, welcher in anderen Kantonen mit besseren Standortbedingungen erzeugt wird¹³. Hier wird angenommen, dass 80 % der Gesamtproduktion aus Schweizer Wasserkraft prozentual auf alle Kantone verteilt wird. Die verbleibenden 20 % werden direkt für den Bedarf in den Produktionskantonen (etwa 14 %) und den Strombedarf der Schweizer Bundesbahnen (etwa 6 %) eingesetzt¹⁴. Mit diesen Annahmen wird der Kanton Luzern im Jahr 2050 1'830 GWh Strom beziehen, welcher durch Wasserkraft ausserhalb der Kantonsgrenzen produziert wurde. Die verbleibenden 2'970 GWh des Produktionsbedarfs - das sind 65 % der Produktionsbedarfs - sollen innerhalb des Kantons Luzern produziert werden¹⁵.

Zusammenfassend resultiert folgender Produktionsbedarf für die Produktion innerhalb des Kantons Luzern im Jahr 2050, welcher ausschliesslich mit erneuerbaren Energieträgern erreicht werden soll:

- Stromproduktion: **2'970 GWh**
- Wärmeproduktion: **5'350 GWh** inkl. Wärmepumpenstrom (4'260 GWh ohne Wärmepumpenstrom)
- Gesamtproduktion Strom und Wärme: **7'240 GWh**

3.7 Systemgrenzen

Im Folgenden werden die Systemgrenzen für das theoretische Potenzial, das realistische Potenzial, die aktuelle Produktion und das Ausbauziel für 2050 definiert ([Abbildung 7](#)).

¹¹ Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien, noch nicht rechtskräftig, Referendum im Oktober 2023 ergriffen, Abstimmung am 9. Juni 2024

¹² Die Stromproduktion soll zu 62 % innerhalb des Kantons Luzern stattfinden. Der Rest wird mit ausserkantonaler Wasserkraft produziert. Da Wärmepumpen zur Wärme-
produktion Strom benötigen, welcher teilweise nicht innerhalb des Kantons Luzern produziert wird, findet streng genommen die Wärmeproduktion ebenfalls nicht zu 100 % innerhalb des Kantons statt.

¹³ Das Stromnetz endet nicht an den Kantonsgrenzen. Im Stromnetz kann zudem nicht nach Energieträger unterschieden werden. Es werden daher in der Realität auch andere Energieträger Strom über die Kantonsgrenzen liefern. Bei der Definition der kantonalen Produktionsziele wird jedoch ausschliesslich bei der Wasserkraft von einer ausserkantonalen Produktion ausgegangen.

¹⁴ Der [Stromverbrauch der Schweizer Bundesbahnen](#) betrug im Jahr 2021 2'130 GWh, dies entspricht 4 % des Stromverbrauchs der Schweiz und 6 % der Stromerzeugung durch Schweizer Wasserkraftwerke (ohne Pumpspeicherkraftwerke).

¹⁵ Zum Vergleich: Die Energiestrategie des Kantons Zürich (Kanton Zürich, 2022) geht davon aus, dass ein Anteil von 57 % des Stromproduktionsbedarfs durch innerkantonale Produktion gedeckt wird.

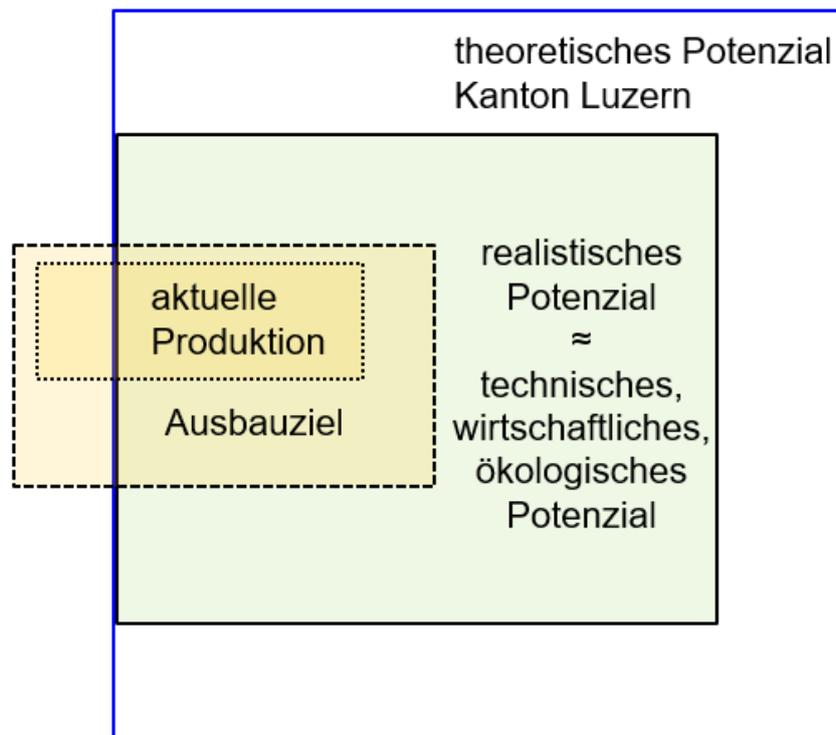


Abb. 7: Schematische Darstellung der Systemgrenzen für die Potenziale, die aktuelle Produktion und das Ausbauziel für 2050. Das theoretische und realistische Potenzial basiert auf Ressourcen innerhalb des Kantons Luzern. Bei der aktuellen Produktion und dem Ausbauziel können Ressourcen ausserhalb des Kantons Luzern miteinbezogen sein.

3.7.1 Theoretisches Potenzial

Das theoretische Potenzial gibt die maximale Energiegewinnung an, welche pro Energieträger basierend auf den verfügbaren Ressourcen innerhalb des Kantons Luzern theoretisch möglich wäre, ohne rechtliche, technische, wirtschaftliche und ökologische Einschränkungen ([Abbildung 7](#)).

3.7.2 Realistisches Potenzial

Das realistische Potenzial gibt an, wieviel Energie pro Energieträger realistisch gewonnen werden könnte. Dabei fliessen rechtliche, technische, ökologische und wirtschaftliche Überlegungen ein. Bei Oberflächengewässern basiert das theoretische Potenzial z.B.: auf dem Wasservolumen der Gewässer und einer Annahme zur akzeptablen Temperaturdifferenz. Das realistische Potenzial ist geringer, weil eine thermische Nutzung nur in gewässernahen Gebieten wirtschaftlich realisierbar ist. Eine genaue Betrachtung der rechtlichen, technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekte für jede der zwölf Technologien übersteigt den Rahmen dieses Berichts. Beim realistischen Potenzial handelt sich um eine Grobabschätzung. Das realistische Potenzial ist kleiner als das theoretische Potenzial ([Abbildung 7](#)) und basiert ebenfalls auf Ressourcen innerhalb der Kantongrenzen. Bei einzelnen Technologien wird das realistische Potenzial in weiterführenden Studien noch genauer untersucht werden müssen (z.B. bei nichtverholzter Biomasse/Biogas). Bei der Windenergie wurde dies bereits gemacht (Kanton Luzern, 2022b).

3.7.3 Ausbauziel

Das Ausbauziel für 2050 ist für die meisten Technologien kleiner als das realistische Potenzial. Die Ressourcen dafür befinden sich innerhalb der Kantonsgrenzen. Vor allem bei verholzter Biomasse und nicht verholzter Biomasse ist ein Import von Holz und Biogas denkbar, um im Kanton Luzern Energie zu produzieren.

3.7.4 Aktuelle Produktion

Die aktuelle Produktion bezieht sich auf die tatsächliche momentane Energieproduktion im Kanton Luzern. Die Ressourcen für diese Produktion können zum Teil von ausserhalb der Kantonsgrenzen kommen.

4 Politische Rahmenbedingungen

4.1 Planungsbericht über die Klima- und Energiepolitik

Im Planungsbericht über die Klima- und Energiepolitik des Kantons Luzern (PB K&E, [B 87](#)) (Kanton Luzern, 2021) sind zahlreiche Massnahmen definiert, um den Energieverbrauch durch Effizienzsteigerung zu reduzieren, die erneuerbare Energieproduktion zu steigern, Energie zu speichern und fossile Energieträger zu ersetzen. Der Regierungsrat hat dazu die Massnahmen- und Umsetzungsplanung für die Jahre 2022 bis 2026 (Kanton Luzern, 2023) verabschiedet. Die relevanten Massnahmen zu den genannten Bereichen sind im Folgenden aufgeführt. Die Grundlage für dieses Projekt bilden die Massnahmen KS-E2.1 und KS-E2.2.

- Klimaschutz und Effizienzsteigerung
 - KS-G1.2: Anpassung energetische Vorschriften für Neubauten
 - KS-G2.1: Markante Erhöhung der kantonalen Mittel für das Gebäudeprogramm
 - KS-G2.2: Einführung Energiekennzahl für Wohngebäude verbunden mit Sanierungspflicht
 - KS-I1.1: Individuelle Analysen der grossen Industriebetriebe bezüglich Prozessenergie
 - KS-I2.1: Erhöhung Eigenverbrauchsvorschriften für industrielle Betriebe
 - KS-I2.2: Weiterentwicklung Betriebsoptimierung und Vorschriften für Grossverbraucher
 - KS-V1.3: Aufbau und Führen eines systematischen Monitorings des Verbrauchs für alle Gebäude
 - KS-E2.4: Beratungsangebot für Landwirtinnen und Landwirte im Bereich der betrieblichen Energieeffizienz (Agrocleantech)
- Steigerung der erneuerbaren Energieproduktion im Kanton Luzern
 - KS-G3.2: Kantonaler Stromrappen für die Förderung von grossen Photovoltaikanlagen
 - KS-V2.1: Zubauplan für PV-Anlagen bei, auf und an Gebäuden und Infrastrukturen des Kantons
 - KS-V2.2: Sicherstellung Stromproduktion als integraler Bestandteil der Konzeption bei Bauprojekten
 - **KS-E2.1: Definieren der Potenziale und kantonalen Ziele für erneuerbare Energien**
 - **KS-E2.2: Erarbeitung und Umsetzung einer Roadmap zur Erreichung der Ziele gemäss Massnahme KS-E2.1**

- Speicherung von Energie zu Zeiten hoher Produktion und Abgabe in Zeiten geringer Produktion
 - KS-M1.1: Förderung Ladeinfrastruktur für Elektromobilität
 - KS-E2.3: Förderung Winterstromproduktion und Technologien für Strom und Wärme zum saisonalen Ausgleich
- Substitution von Energieträgern beim Endverbraucher und Priorisierung von Energieträgern
 - KS-M2.2: Investitionsbeiträge für Busse mit alternativen Antrieben
 - KS-M3.2: Infrastrukturelle Massnahmen für emissionsarme Verkehrsmittel
 - KS-M3.6: Prüfung monetärer Anreize zur Verlagerung von MIV zu Fuss-/Veloverkehr und öV
 - KS-G3.1: Erhöhung der Anforderungen beim Heizungsersatz im Rahmen einer KEnG-Revision.
 - KS-V3.2: Erarbeitung einer Richtlinie zur Beschaffung von (fossilfreien) Strassenfahrzeugen
 - KS-E1.1: Erarbeitung und Umsetzung einer Strategie für die Dekarbonisierung der Gasversorgung
 - KS-E1.3: Erstellung von «Netto null 2050»-kompatiblen Energieplanungen in allen Gemeinden
 - KS-W3.1: Stärkung der regionalen Wertschöpfungskette von Luzerner Holz

4.2 Offensive Holz

Synergien mit der Offensive Holz (Kanton Luzern, 2022a) ergeben sich insbesondere bezüglich der Schwerpunktmassnahmen

- M1.1: Konkretisierung des effektiven Nutzungspotentials des Luzerner Waldes
- M4.2: Erstellung und Bewirtschaftung einer Übersicht über den Rohstoffbedarf von bestehenden und geplanten Holzenergiekraftwerken.

4.3 Biogasstrategie

Eine Überarbeitung der bestehenden Biogasstrategie (Kanton Luzern, 2013) ist vorgesehen. Die Erkenntnisse aus diesem Bericht bilden dafür die Grundlage.

4.4 Revisionen des kantonalen Richtplans und des kantonalen Energiegesetzes

Die Ziele des Kantons Luzern in der Teilrevision des Richtplans zum Thema Windenergie ([B 160](#)) (Kanton Luzern, 2022b) wurden im Kapitel zur Windenergie übernommen. Zukünftige Teilrevisionen des kantonalen Richtplans und des Energiegesetzes berücksichtigen die Ergebnisse dieses Berichts und tragen zur Erreichung der Produktionsziele bei.

4.5 Politische Vorstösse

Folgende politische Motionen und Postulate stehen in thematischem Zusammenhang mit diesem Bericht:

- [M 174](#): Motion Meier Thomas und Mit. über die Abschaffung der Konzessionsgebühren für die Grundwassernutzung zu thermischen Zwecken (erheblich als Postulat)
- [M 612](#): Motion Nussbaum Adrian und Mit. über die Beschleunigung von Bau und Betrieb von PV-Anlagen zur Stromproduktion im Kanton Luzern (erheblich)

- [M 633](#): Motion Heeb Jonas und Mit. über eine Solaranlage auf oder an jedes Gebäude (erheblich als Postulat)
- [M 382](#): Motion Meier Thomas und Mit. über die Anpassung der kantonalen Gesetzgebung bezüglich der Besteuerung der Energielieferung, welche den Eigenverbrauch übersteigt (erheblich als Postulat)
- [M 653](#): Motion Frye Urban und Mit. über die Förderung von grossen Solaranlagen (teilweise erheblich als Postulat)
- [P 634](#): Postulat Frey Maurus und Mit. über die Förderung von Zusammenschlüssen zum Eigenverbrauch und die Beteiligung am Herkunftsnachweissystem (erheblich)
- [P 554](#): Postulat Brücker Urs und Mit. über die technischen Möglichkeiten zur Reduktion des Treibhausgasausstosses durch die Nutztierhaltung (teilweise erheblich)
- [P 964](#): Postulat Özvegyi András und Mit. über die Vereinfachung der Meldepflicht von Solaranlagen (teilweise erheblich)
- [P 50](#): Postulat Brücker Urs und Mit. über den Vollzug der Pegelkorrekturen bei Blockheizkraftwerken (hängig)
- [P 90](#): Postulat Bärtsch Korintha und Mit. über die Förderung der finanziellen Beteiligung der lokalen Bevölkerung an Windkraftanlagen (erheblich)

5 Potenziale erneuerbarer Energieproduktion

5.1 Solarenergie Photovoltaik

5.1.1 Definition

Mit Photovoltaik (PV) wird die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie durch die Verwendung von Solarzellen bezeichnet. Die Umwandlung von Sonnenlicht in Wärme wird in [Kapitel 5.8](#) separat behandelt. Die Potenzialanalyse beinhaltet Dächer, Fassaden sowie Strasseninfrastrukturanlagen des Kantons, nicht jedoch Freiflächen. Freiflächenanlagen sind im Rahmen der aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen kaum bewilligungsfähig. Für Photovoltaik-Grossanlagen zur Winterstromproduktion (z.B. alpine PV-Anlagen) wurden auf Bundesebene im September 2022 erleichterte Bewilligungsverfahren eingeführt. Für solche Anlagen fehlen im Kanton Luzern nach einer ersten Analyse jedoch entweder die Voraussetzungen¹⁶ oder potenzielle Flächen befinden sich in Landschaftsschutzgebieten. PV auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (Agri-PV) ist aktuell noch wenig erforscht und wird in der Potenzialanalyse ebenfalls nicht berücksichtigt.

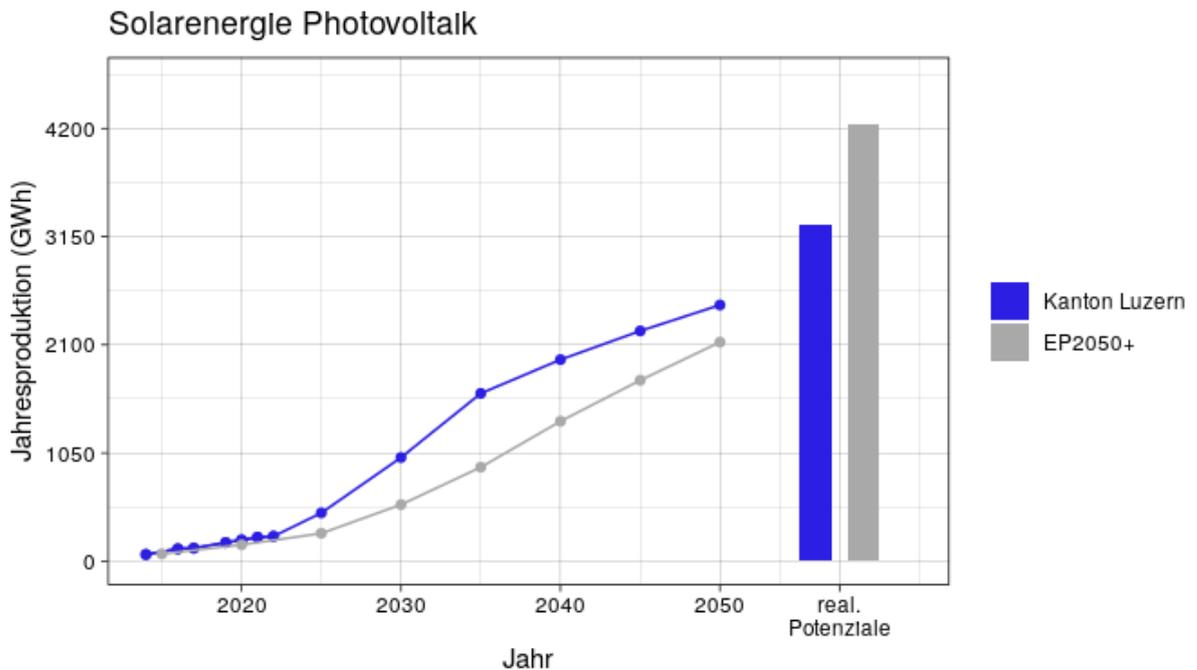


Abb. 8: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus Photovoltaik und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.1.2 Aktuelle Produktion (240 GWh)

Im Jahr 2022 wurden im Kanton Luzern etwa 240 GWh Strom durch PV-Anlagen produziert. Diese Zahl beruht auf einer installierten Gesamtleistung von 250 MW und der Annahme eines spezifischen Ertrags von 950 kWh/kWp¹⁷ (Bundesamt für Energie, 2023). Die ins Netz eingespeiste Energie ist mit 210 GWh geringer, weil ein Teil der produzierten Energie für den Eigenverbrauch verwendet wird.

¹⁶ Minimale Stromproduktion im Winterhalbjahr (mind. 500 kWh/kW), minimale Grösse (mind. 10 GWh jährliche Produktion)

¹⁷ 2021: 895 kWh/kW, 2022: 970 kWh/kW

5.1.3 Theoretisches Potenzial (-)

Das theoretische Potenzial ist durch die Fläche des Kantons Luzern limitiert. Eine Berechnung des theoretischen Potenzials basierend auf der Gesamtfläche des Kantons Luzern ist wenig sinnvoll. Für mögliche Teilflächen konnten aktuell ebenfalls keine vernünftigen Annahmen getroffen werden. Auf eine Bestimmung des theoretischen Potenzials wird daher verzichtet.

5.1.4 Realistisches Potenzial (3'260 GWh)

Das Solarpotenzial aller Schweizer Dächer und Fassaden beträgt 50 TWh¹⁸ respektive 17 TWh, insgesamt 67 TWh (Bundesamt für Energie, 2022b). Im Kanton Luzern besteht ein Potenzial von 2'440 GWh auf Dächern und 810 GWh auf Fassaden, insgesamt rund 3'260 GWh (Bundesamt für Energie, 2019). Ein Viertel des Gesamtpotenzials entfällt damit auf die Fassaden. Zusätzlich existiert Potenzial auf Strasseninfrastrukturen¹⁹ des Kantons Luzern, welches etwa 8 GWh beträgt (Kanton Luzern, unveröffentlicht, 2024) und das Gesamtpotenzial nicht wesentlich verändert. Insgesamt ergibt sich für den Kanton Luzern ein realistisches Potenzial von etwa 3'260 GWh²⁰.

5.1.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (2'490 GWh)

Das Ausbauziel für PV gemäss EP2050+ beträgt 34 TWh. Skaliert auf den Kanton Luzern entspricht dies 2'130 GWh. Swissolar geht von einer Produktion von 45 TWh bis 2050 aus. Dies entspricht auch dem Ziel für die erneuerbare Stromproduktion ohne Wasserkraft im Jahr 2050 gemäss der Vorlage zum "Gesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien". 45 TWh national entsprechen 2'850 GWh für den Kanton Luzern. Als Ausbauziel für den Kanton Luzern wird ein Mittelwert von 2'490 GWh verwendet, zehn Mal mehr als die aktuelle Produktion. Der Kantonsrat hat dem Regierungsrat zum PB K&E den Auftrag überwiesen, im nächsten Klimabericht aufzuzeigen, wie bis 2035 das Solarstrompotenzial im Kanton Luzern zu 50 % ausgeschöpft werden kann. Dies entspricht einem Zwischenziel von 1'630 GWh bis zum Jahr 2035, sieben Mal mehr als die aktuelle Produktion. Dieses Zwischenziel wurde in den Ausbaupfad aufgenommen.

¹⁸ Nach Studie Anderegg u. a. (2022) bis zu 54 TWh

¹⁹ Bezieht sich auf Böschungen, Lärmschutzwände, Brücken, Stützmauern, Tunnel und Galerien. Werden Kantonsstrassen und Velowege miteinbezogen, beträgt das Potenzial 180 GWh. Die Überdachung von Kantonsstrassen und Velowegen wird aktuell jedoch als nicht realistisch erachtet.

²⁰ Würde auf den Dächern PV und Solarthermie (für Warmwasser) kombiniert, reduziert sich die verfügbare Fläche für PV dementsprechend. Das realistische Potenzial für PV verringert sich dadurch auf 2'590 GWh (Bundesamt für Energie, 2019). Jedoch auch dann ist das Ausbauziel von 2'490 GWh noch möglich, würde jedoch das so definierte realistische Potenzial fast vollständig ausschöpfen.

5.2 Windenergie

5.2.1 Definition

Windenergie bezeichnet die Stromerzeugung aus Wind mithilfe von Windenergieanlagen. Der Fokus liegt auf grossen Windanlagen mit einer Gesamthöhe von über 30 Metern und Jahreserträgen von mehreren GWh pro Anlage. Die Windenergie produziert zwei Drittel ihres Stroms im Winter. Sie leistet somit einen wichtigen Beitrag zu Winterstromproduktion und ergänzt die Stromerzeugung durch Photovoltaik und Wasserkraft ideal.

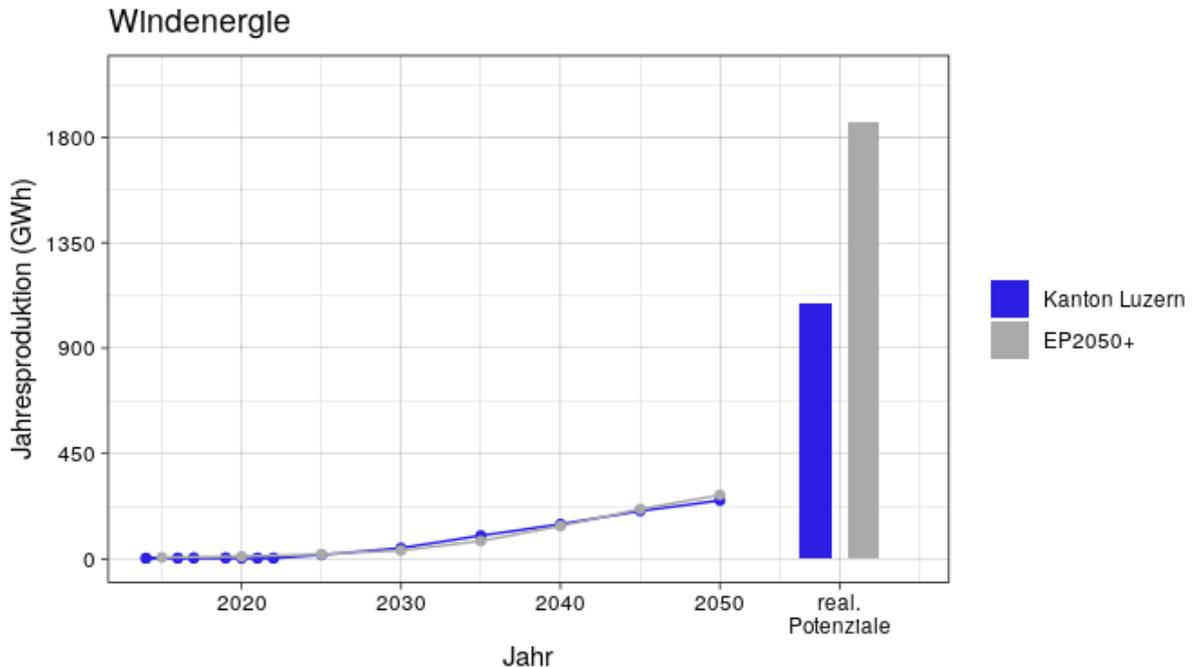


Abb. 9: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus Windenergie und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.2.2 Aktuelle Produktion (4 GWh)

Die aktuelle Produktion durch Windenergie beträgt 4 GWh, zum Grossteil erzeugt durch drei Windanlagen im Entlebuch.

5.2.3 Theoretisches Potenzial (-)

Ähnlich wie bei der Photovoltaik macht die Ausweisung eines theoretischen Potenzials basierend auf der gesamten Kantonsfläche und den Windgeschwindigkeiten keinen Sinn. Zu betrachten ist das realistische Potenzial für Gebiete in denen tatsächlich Windanlagen gebaut werden können.

5.2.4 Realistisches Potenzial (1'090 GWh)

Das realistische Potenzial von Windenergie in der Schweiz wird aktuell auf 29'460 GWh geschätzt (Bundesamt für Energie, 2022c). Dabei wurden ausreichend windreiche Gebiete mit diversen Ausschlusskriterien (Schutzgebiete wie Moore und Reservate, Flughäfen und angrenzende Sektoren, etc.) überlagert und basierend auf den verbleibenden Gebieten das

Windenergiepotenzial basierend auf Anlagen des aktuellen Standes berechnet. Für den Kanton Luzern beträgt das Potenzial 1'090 GWh²¹.

5.2.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (250 GWh)

Grundlage für das kantonale Ausbauziel ist das Konzept Windenergie des Bundes (Bundesamt für Raumentwicklung, 2020). Darin wird der Beitrag des Kantons Luzern zum Bundesziel (4'320 GWh) zwischen 130 GWh und 400 GWh beziffert. Im Konzept Windenergie des Kantons Luzern (Kanton Luzern, 2020) wurde daraufhin ein Ziel von 250 GWh bis 2050 festgelegt mit einem Zwischenziel von 100 GWh bis 2035. Diese Ziele wurden im teilrevidierten Richtplan Windenergie²² (Kanton Luzern, 2022b) übernommen. Das Ausbauziel der Windenergie entspricht einer Potenzialausschöpfung von 23 %. Dies ist die geringste Potenzialausschöpfung aller 12 untersuchten Energieträger. Das Ausbauziel ist daher konservativ und als Minimalziel aufzufassen.

²¹ Unter Berücksichtigung der örtlichen Begebenheiten des Kantons Luzerns (Bundesamt für Energie, 2022c).

²² Der Regierungsrat hat am 6. Juni 2023 die Richtplanteilrevision beschlossen. Der Kantonsrat hat die Botschaft [B 160](#) Teilrevision des kantonalen Richtplans betreffend Windenergie (Regierungsrat Kanton Luzern, 2023) in der Oktober-Session 2023 zustimmend verabschiedet. Die Genehmigung des Bundesrates ist aktuell noch ausstehend.

5.3 Wasserkraft

5.3.1 Definition

Wasserkraft bezieht sich auf die Energie, die mithilfe von Wasserkraftwerken aus der potenziellen Energie (Höhendifferenz) von Wasser gewonnen wird. Es werden dabei verschiedene Leistungsklassen unterschieden. Kleinstwasserkraftwerke haben Leistungen bis zu 300 kW, Kleinwasserkraftwerke haben Leistungen zwischen 300 kW und 10 MW, bei Wasserkraftwerken mit mehr als 10 MW Leistung handelt es sich um Grosswasserkraft. Im Kanton Luzern haben die grössten Anlagen eine Leistung von ca. 2 MW (Perlen, Rathausen). Somit sind alle Anlagen im Kanton Luzern entweder Klein- oder Kleinstwasserkraftwerke. Die grössten Wasserkraftwerke in der Schweiz (z.B. Grimsel, Linth-Limmern) haben installierte Leistungen von über 1000 MW, mehr als 500-mal so viel wie die grössten Anlagen im Kanton Luzern. Das theoretische und realistische Potenzial bezieht sich auf den Planungsbericht über die Wasserkraftnutzung im Kanton Luzern [B 180](#) (Kanton Luzern, 2010). Dabei werden lediglich Kleinwasserkraftwerke betrachtet. Beim genutzten Potenzial werden sowohl Kleinst- als auch Kleinwasserkraftwerke berücksichtigt. Im Kanton Luzern gibt es kein Potenzial für Grosswasserkraftwerke.

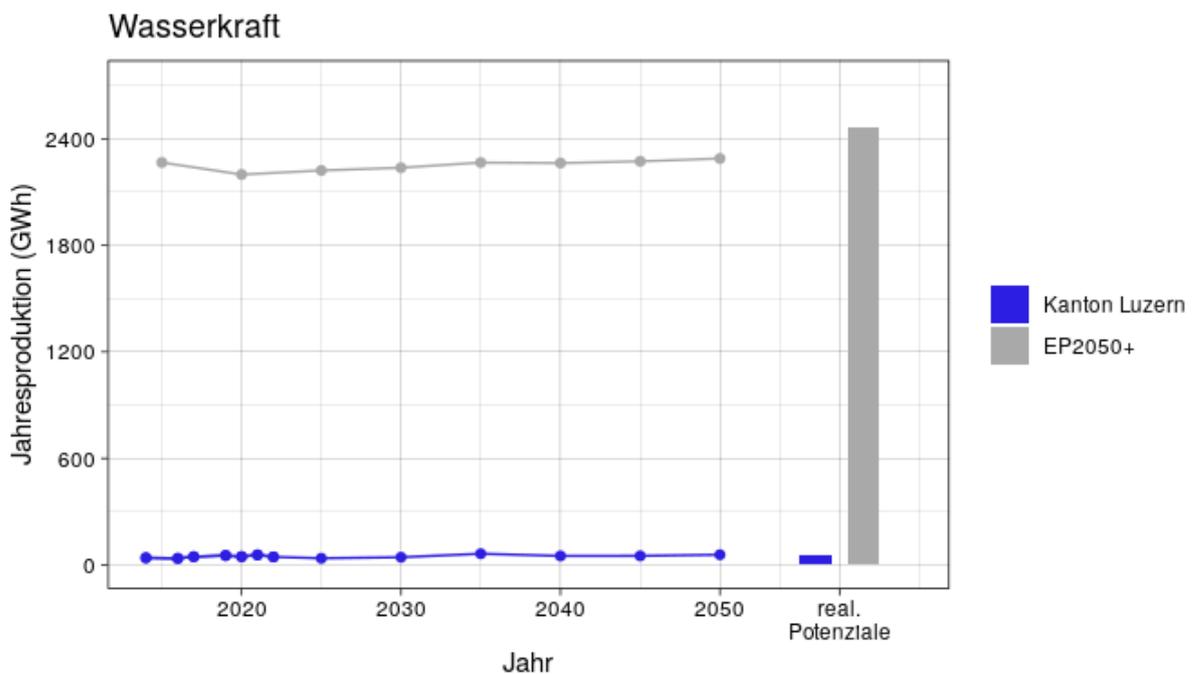


Abb. 10: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus Wasserkraft und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.3.2 Aktuelle Produktion (45 GWh)

Der Kanton Luzern ist kein Wasserkraftkanton. Die Stromproduktion durch Wasserkraft im Kanton Luzern zwischen 2019 und 2022 schwankt zwischen 45 GWh und 56 GWh bzw. im Mittel etwa 50 GWh. Dies sind nur etwa 2 % der aktuellen skalierten Bundeswerte ([Abbildung 10](#)). Die Produktion im Jahr 2022 lag bei 45 GWh. Ein Grossteil der Energie wird durch die Kraftwerke Rathausen und Perlen (je etwa 15 GWh) produziert. Die Kraftwerke Emmenweid, Ettisbühl und Thorenberg produzieren je etwa 5 GWh, Mühlenplatz und das

Trinkwasserkraftwerk Stollen je etwa 2 GWh. Zusätzlich existieren noch einige kleinere Anlagen.

5.3.3 Theoretisches Potenzial (106 GWh)

Gemäss Planungsbericht über die Wasserkraftnutzung im Kanton Luzern [B 180](#) (Kanton Luzern, 2010) beträgt das theoretische Potenzial für Wasserkraft im Kanton Luzern 106 GWh.

5.3.4 Realistisches Potenzial (57 GWh)

Im Planungsbericht über die Wasserkraftnutzung im Kanton Luzern [B 180](#) (Kanton Luzern, 2010) wird ein realistisches Ausbaupotenzial von 30 bis 40 GWh angegeben. Wird dieses Ausbaupotenzial zu den damals genutzten 48 GWh hinzugezählt, ergibt sich ein realistisches Potenzial von 78 bis 88 GWh. Gleichzeitig wird aber berichtet, dass sich ein Grossteil dieses Potenzials in Ausschluss- und Vorbehaltsgebieten befindet, was im Widerspruch zu einem ökologisch nutzbaren Potenzial steht und daher eher dem theoretischen Potenzial zuzuordnen wäre. Der Kanton verfolgt den Grundsatz, wenige Gewässer mit einem vergleichsweise hohen Potenzial zu nutzen und dafür andere Gewässer ungenutzt zu lassen. In diesem Rahmen wurde das Wasserkraftwerk an der Waldemme mit einer Jahresproduktion von etwa 6.5 GWh bewilligt, welches im Jahr 2023 die Produktion aufnahm. Weiteres Ausbaupotenzial ergibt sich dadurch, bestehende Anlagen zu optimieren. Stillgelegte Anlagen können reaktiviert werden, wenn die gesetzlichen Rahmenbedingungen eingehalten werden und der Nutzen die ökologischen Nachteile überwiegt²³. Bewilligungen sollen zudem nur ausgesprochen werden, wenn die Wirtschaftlichkeit und Wirksamkeit nachgewiesen sind. Es wird davon ausgegangen, dass mit dem neuen Wasserkraftwerk Waldemme das realistische Potenzial nahezu ausgeschöpft ist. Als realistisches Potenzial werden 57 GWh angenommen²⁴.

5.3.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (57 GWh)

Das Wasserkraftpotenzial im Kanton Luzern ist weitgehend ausgeschöpft und das Ausbauziel für 2050 entspricht dem realistischen Potenzial von 57 GWh.

²³ Zum Potenzial von Trinkwasserkraftwerken im Kanton Luzern (wie z.B. das Kraftwerk Stollen) existieren keine Studien. InfraWatt initiiert aktuell das Projekt "Studien zum Potenzial von Mikroturbinen im Trinkwasserbereich für Wasserversorger in der Schweiz". In dieser Studie wird voraussichtlich auch das Potenzial für den Kanton Luzern bestimmt.

²⁴ Auf der Webseite <https://map.geo.admin.ch> kann das theoretische hydroelektrische Potential für Kleinwasserkraft in der Layer "Kleinwasserkraftpotentiale" abgerufen werden.

5.4 Geothermie untief

5.4.1 Definition

Die untiefe (oder oberflächennahe) Geothermie bezieht sich auf Erdwärme aus einer Tiefe von bis zu 400 Metern. In dieser Schicht hat das Erdreich Temperaturen von rund 10 bis 22 °C. Die Wärmenutzung erfolgt daher gewöhnlich indirekt, d.h., das Temperaturniveau wird mithilfe einer Wärmepumpe auf das erforderliche Temperaturniveau angehoben. Erdsonden können im Sommer zusätzlich zum Kühlen eingesetzt werden. Die beim Kühlen entstehende Wärme kann ins Erdreich zurückgeleitet werden, um einer langfristigen Abkühlung des Untergrunds entgegenzuwirken (Regeneration). Technologien für untiefe Geothermie umfassen Erdwärmesonden, Erdregister, Erdwärmekörbe und Erd- bzw. Energiepfähle (Geostrukturen). Grundwasser gehört auch zur untiefen Geothermie, wird hier jedoch als separater Energieträger aufgeführt. Die Analyse des genutzten Potenzials bezieht sich ausschliesslich auf Erdwärmesonden, da diese den Grossteil der Nutzung ausmachen und nur für diese ein Datensatz verfügbar ist.

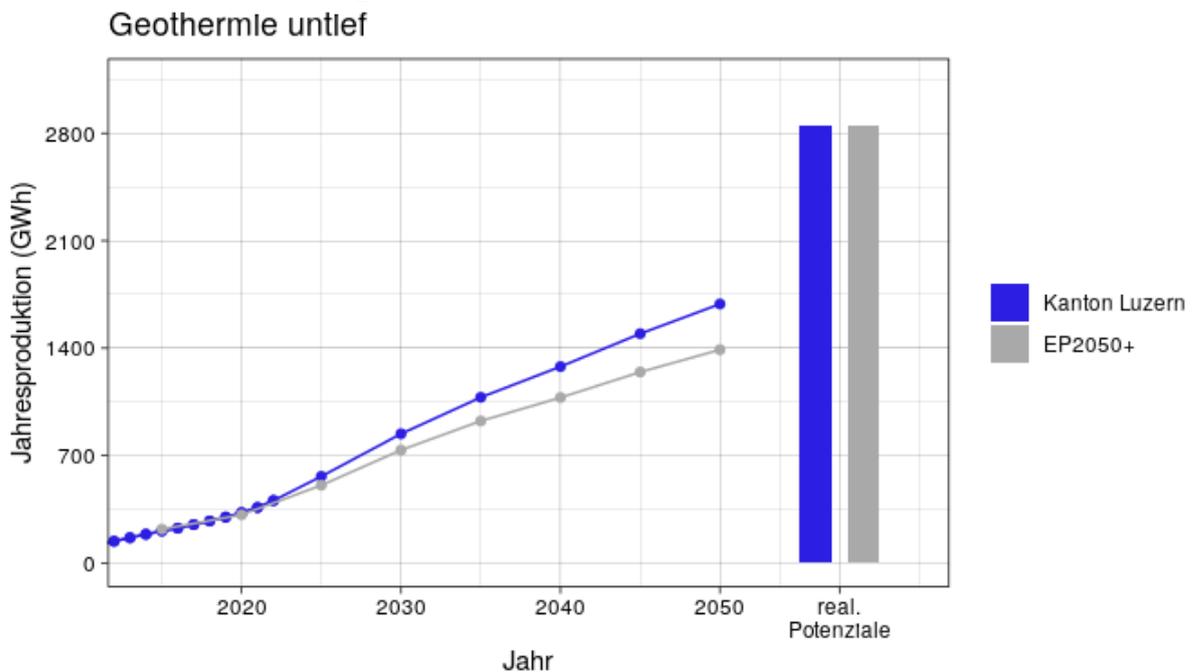


Abb. 11: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus untiefer Geothermie und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.4.2 Aktuelle Produktion (410 GWh)

Vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2022 wurden im Kanton Luzern 12'080 Erdsondenanlagen mit 26'420 Erdsonden und einer Gesamtlänge von fast 4'900 Kilometern bewilligt. Bei einer Wärmeentzugsleistung von 30 W pro Sondenmeter entspricht dies einer totalen Entzugsleistung von 147 MW und unter der Annahme von 2'000 Volllaststunden einer jährlichen Entzugsenergie von 294 GWh. Bei einer mittleren Jahresarbeitszahl von 3.6 ergibt sich so eine Heizwärme von etwa 410 GWh.

5.4.3 Theoretisches Potenzial (4'200 GWh)

Die Bauzonenflächen im Kanton Luzern machen mit 10'500 Hektaren etwa 7 % der Gesamtfläche des Kantons Luzern aus. Innerhalb der Bauzonen sind auf 2'900 Hektaren Erdsonden aufgrund von nutzbarem Grundwasservorkommen verboten. Das ergibt eine nutzbare Fläche von 7'600 Hektaren. Gemäss SIA-Norm (SIA384/6, 2021) sind Entzugsdichten bis zu 8 kWh/m² ohne Regeneration möglich. Wird regeneriert sind sogar Entzugsdichten bis 40 kWh/m² möglich. Für das theoretische Potenzial wird eine Entzugsdichte von 40 kWh/m² und die für Erdsonden erlaubte Bauzonenfläche angenommen. Zum Heizen werden dabei dem Untergrund 3'100 GWh entzogen und es resultieren 4'200 GWh Heizwärme (Jahresarbeitszahl von 3.6).

5.4.4 Realistisches Potenzial (2'800 GWh)

Das nachhaltig nutzbare, also das realistische Heizwärmepotenzial von Erdwärmesonden, liegt in der Schweiz ohne Regeneration bei etwa 8'000 GWh (EP2050+, 2021b, Tab. 14) und mit Regeneration bei etwa 45'000 GWh, wobei Zonen mit nutzbarem Grundwasservorkommen bereits ausgeschlossen wurden. Skaliert auf den Kanton Luzern ergibt dies 500 GWh respektive 2'800 GWh. Beide Schätzungen sind konservativ, da von Entzugsdichten von lediglich 3 kWh/m² ausgegangen wird, jedoch 8 kWh/m² sogar ohne Regeneration möglich sind. Als Arbeitswert wird trotzdem ein realistisches Potenzial von 2'800 GWh angenommen und Regeneration in dicht bebauten Gebieten vorausgesetzt. Für eine konkretere Abschätzung des realistischen Potenzials ist eine Analyse des Luzerner Gebäudeparks inklusive existierenden Heizungsträgern, lokalen Wärmeentzugsdichten und verfügbaren Flächen nötig.

5.4.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (1'700 GWh)

Entwickeln sich die realisierten Erdsondenmeter bis 2050 ähnlich wie von 2021 auf 2022, dann werden im Jahr 2050 1'700 GWh Heizwärme aus Erdsonden gewonnen. Bei diesem Ausbauziel ist das Miteinbeziehen der Regeneration von Erdsonden essenziell²⁵. Etwa 20 % der Entzugswärme könnten im Sommer durch das Kühlen von Gebäuden dem Untergrund zugeführt werden. Für grössere Regenerationsgrade ist jedoch zusätzliche Wärme, z.B. aus solarthermischen Anlagen oder durch reversible Wärmepumpen betrieben mit PV-Strom (Ruesch u. a., 2022), nötig.

²⁵ Die Kosten für die Regeneration verringern die Wirtschaftlichkeit von Erdsonden (Persdorf u. a., 2015). Solarthermieanlagen konkurrieren mit den PV Anlagen um ähnliche Flächen. Diese Aspekte sind beim Thema Regeneration zu berücksichtigen.

5.5 Luft

5.5.1 Definition

Bei der thermischen Nutzung von Luft wird die Aussenluft zum Heizen oder Kühlen von Gebäuden oder Prozessen verwendet. Die Luft wird dabei je nach Bedarf als Wärmequelle oder Wärmesenke genutzt. In diesem Kapitel wird nur der Heizenergiebedarf betrachtet mit Luft als Wärmequelle. Das zum Heizen nötige Temperaturniveau wird durch den Einsatz einer Wärmepumpe erreicht.

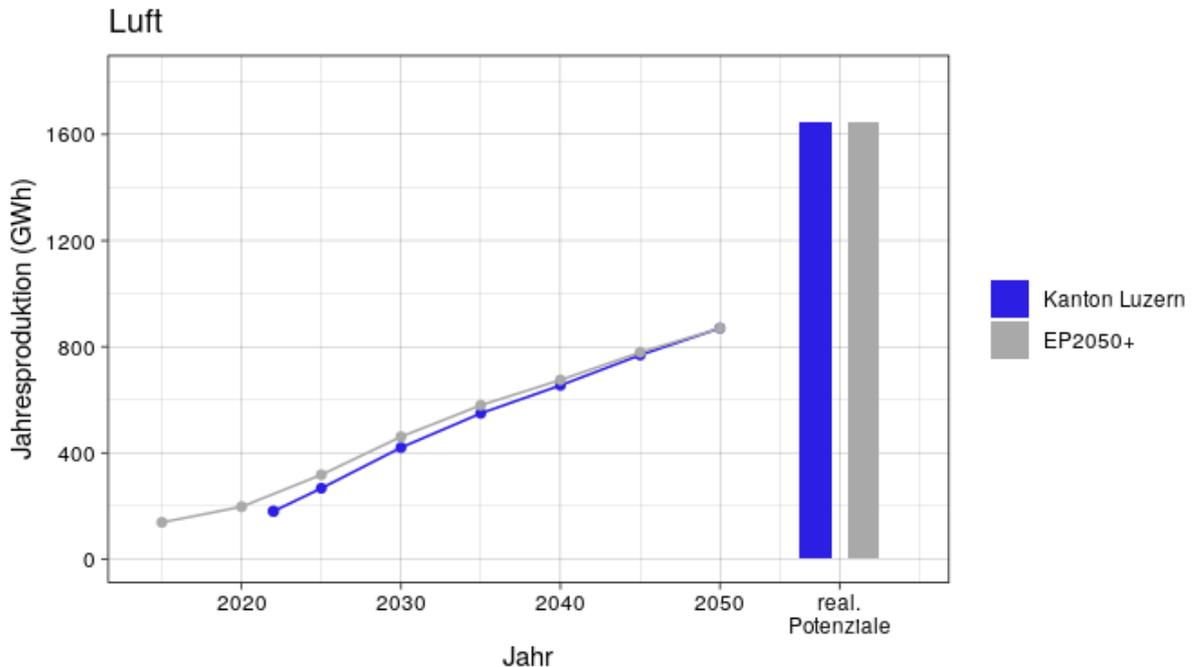


Abb. 12: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion durch der Umweltwärmequelle Luft in Kombination mit einer Wärmepumpe und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.5.2 Aktuelle Produktion (180 GWh)

Im Jahr 2020 betrug die totale Heizleistung von Luft-Wasser-Wärmepumpen etwa 90 MW. Mit 2'000 Vollaststunden ergibt dies eine Heizwärme von 180 GWh. Die totale Heizleistung wurde aus den jährlichen Energiemeldungen unter Annahme eines exponentiellen Wachstums in der Vergangenheit bestimmt und über das Gebäude- und Wohnungsregister plausibilisiert.

5.5.3 Theoretisches Potenzial (-)

Das theoretische Potenzial der Umweltwärme Luft ist nicht standortabhängig und kann somit nahezu als unendlich angenommen werden.

5.5.4 Realistisches Potenzial (1'640 GWh)

Das realistische Potenzial orientiert sich am realistischen Potenzial der EP2050+. Darin werden Schallgrenzwerte und die begrenzte Leistung von Luft-Wasser-Wärmepumpen berücksichtigt. Skaliert auf den Kanton Luzern ergibt dies 1'640 GWh. Diese Skalierung gibt hier lediglich einen groben Anhaltspunkt. Die Schallproblematik hängt von der

Bebauungsdichte ab. Die Bebauungsdichte des Kantons Luzern im Vergleich zum Bundesdurchschnitt wurde nicht weiter untersucht.

5.5.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (870 GWh)

Gleich wie beim realistische Potenzial wird das Ausbauziel von den EP2050+ abgeleitet. Das Ausbauziel beträgt somit 870 GWh.

5.6 Oberflächengewässer

5.6.1 Definition

Die thermische Nutzung von Oberflächengewässern (Seen und Flüsse) bezieht sich auf die Verwendung dieser Gewässer zum Heizen oder Kühlen von Gebäuden oder Prozessen. Dabei wird je nach Bedarf das Gewässer als Wärmequelle oder Wärmesenke genutzt. In diesem Kapitel wird nur der Heizfall betrachtet. Das Temperaturniveau wird dabei mittels einer Wärmepumpe auf das benötigte Niveau angehoben.

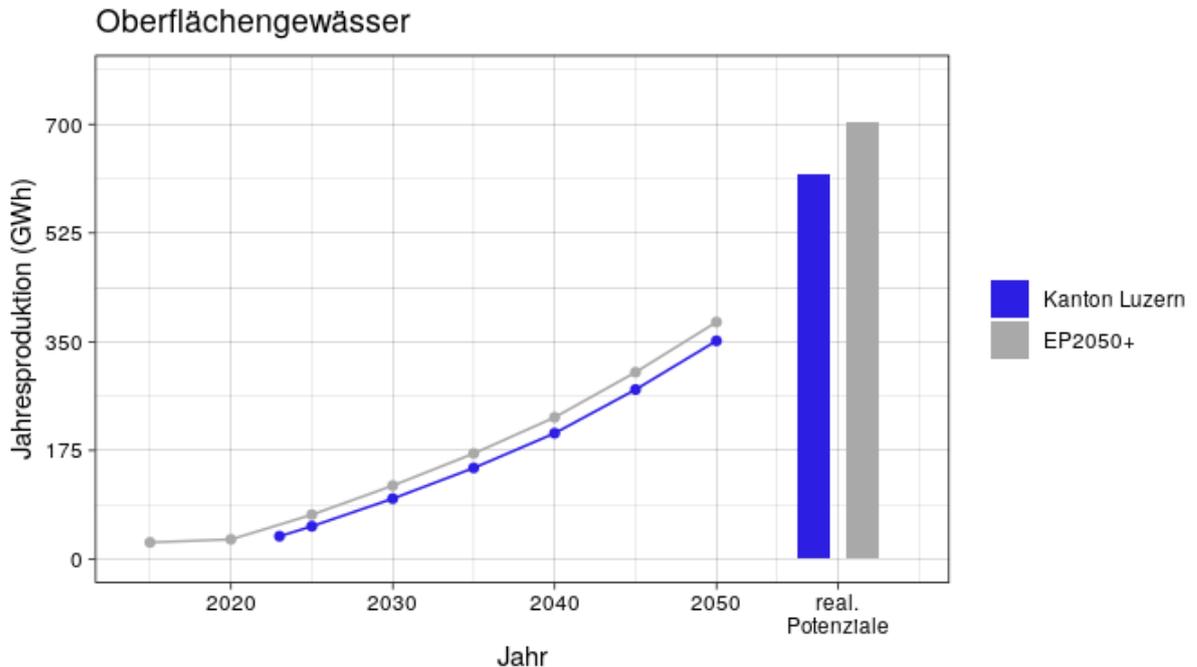


Abb. 13: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus Oberflächengewässern in Kombination mit einer Wärmepumpe und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.6.2 Aktuelle Produktion (40 GWh)

Im Kanton Luzern existieren aktuell 47 bewilligte Konzessionen für die Nutzung von Oberflächengewässern mit einer maximalen jährlichen Fördermenge von 33 Mio. m³. Von den 47 Konzessionen beziehen sich 4 auf reine Kühlnutzung, 25 auf reine Heiznutzung und 18 auf kombinierte Nutzung. Die daraus abgeleitete Heizenergie beträgt 37 GWh. Dafür wurden folgende Annahmen getroffen: Die Jahresarbeitszahl beträgt 3.8 und die Temperaturdifferenz zwischen Entnahme- und Rückgabewasser ist gemäss Konzession. Zusätzlich wurde angenommen, dass aktuell 14 % der maximalen Heizenergie genutzt werden²⁶. Die geringe Ausnutzung resultiert daher, dass die ausgestellten Konzessionen durch Seewasserfassungen der ewl bestimmt sind, die Netze dazu jedoch aktuell noch im Ausbau sind.

5.6.3 Theoretisches Potenzial (4'600 GWh)

Das theoretische Potenzial der Oberflächengewässer im Kanton Luzern ist weitgehend bestimmt durch das Wasservolumen des Vierwaldstättersees, des Baldeggersees und des

²⁶ Annahmen: Bei gleichzeitiger Heiz- und Kühlnutzung einer Konzession werden 75 % der Fördermenge dem Heizen zugeordnet, Wärmeabsatz ewl 2022: 11 GWh (5 % der durch die max. Fördermenge definierte Heizenergie), bei den restlichen Konzessionen wird eine Ausnutzung von zwei Drittel angenommen.

Sempachersees (Gaudard u. a., 2017). Die theoretische Entzugswärme ist 3'400 GWh. Mit einer Jahresarbeitszahl von 3.8 resultiert eine Heizenergie von 4'600 GWh.

5.6.4 Realistisches Potenzial (620 GWh)

Die Energienutzung von Oberflächengewässern erfolgt leitungsgebunden und ist somit massgeblich durch wirtschaftliche Aspekte limitiert. Die grossflächige Nutzung von Energie aus Oberflächengewässern ist vor allem in Gebieten mit hoher Wärmedichte sowie ausreichender Gewässernähe möglich. Zur Abschätzung des realistischen Potenzials wird davon ausgegangen, dass die bereits zur Konzessionierung bewilligten Anlagen die entsprechende Marktanalyse vorgenommen haben und die See- bzw. Flusswasserfassungen auf das künftige Marktpotenzial ausgelegt wurden. Das realistische Potenzial berechnet sich damit wie das genutzte Potenzial aus der maximalen jährlichen Fördermenge, jedoch mit 100-prozentiger Ausnutzung. Dies ergibt 270 GWh. Aktuell sind Anfragen für Seewassernutzungen in der Grössenordnung von 350 GWh Heizenergie (bei vollständiger Ausnutzung der Konzession) in der Vorabklärung. Dies entspricht mehr als einer Verdoppelung der aktuellen Konzessionen auf 620 GWh. Dieser Wert dient als Arbeitswert für das realistische Potenzial.

5.6.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (350 GWh)

Die thermische Nutzung der Oberflächengewässer ist dominiert durch die Stadt Luzern. In der Energieplanung der Stadt Luzern wurden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Energieträgern untersucht. Im Szenario mit dem grössten Seewasseranteil beträgt der Wärmeabsatz 2050 etwa 300 GWh. Werden zusätzlich 17 %²⁷ (50 GWh) für die restliche Seewassernutzungen dazugezählt, ergibt sich ein Ausbauziel von 350 GWh²⁸.

²⁷ Entspricht dem aktuellen Verhältnis Heizwärme aus nicht-ewl-Nutzungen zu Heizwärme aus ewl-Nutzungen. Diese Rechnung setzt voraus, dass sich die nicht-ewl-Nutzungen in Zukunft ähnlich entwickeln wie ewl-Nutzungen

²⁸ Gemäss Einschätzung ewl bei der Konsultation zu diesem Bericht ist dieses Ausbauziel konservativ.

5.7 Grundwasser

5.7.1 Definition

Die thermische Nutzung von Grundwasser bezieht sich auf die Verwendung von Grundwasser zum Heizen oder Kühlen von Gebäuden oder Prozessen. Dabei wird das Grundwasser je nach Bedarf als Wärmequelle oder Wärmesenke genutzt. In diesem Kapitel wird nur der Heizfall betrachtet. Das zum Heizen nötige Temperaturniveau wird durch den Einsatz von Wärmepumpen erreicht.

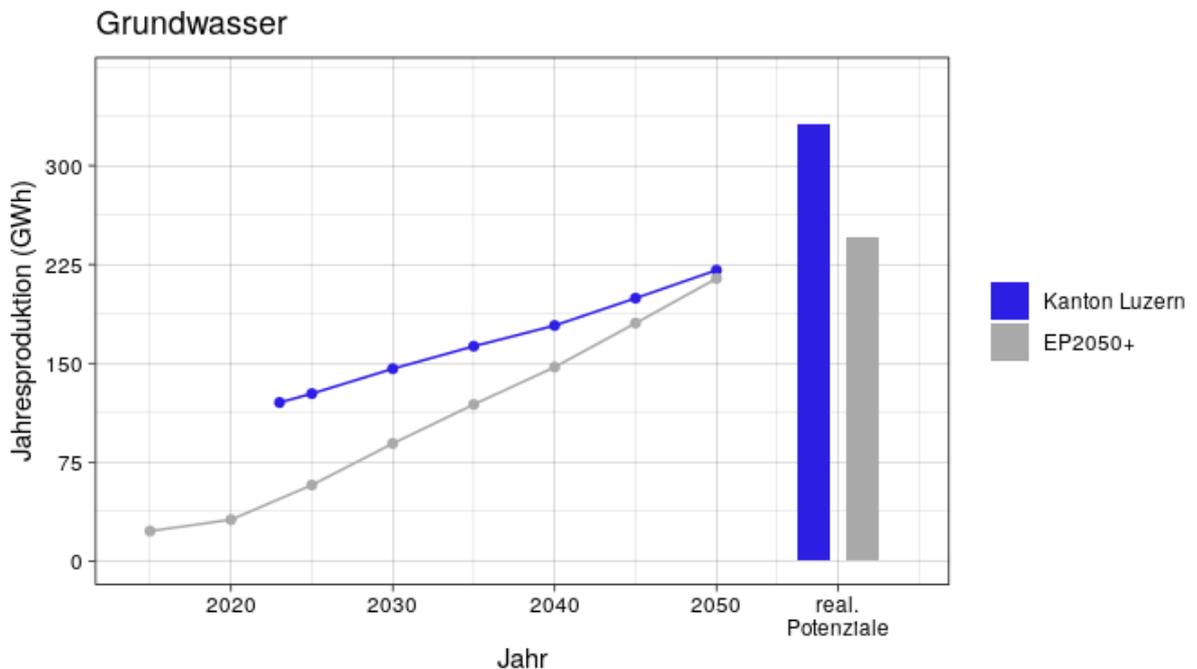


Abb. 14: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus Grundwasser in Kombination mit einer Wärmepumpe und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.7.2 Aktuelle Produktion (120 GWh)

Im Kanton Luzern existieren aktuell 311 bewilligte und sich in Betrieb befindende Konzessionen für thermische Grundwassernutzung mit einer maximalen jährlichen Fördermenge von 32 Mio. m³. Mit einer Temperaturdifferenz von 3 °C, einer Jahresarbeitszahl von 4 und unter der Annahme, dass 80 % der maximalen Fördermenge ausgenutzt werden ergibt dies eine Heizenergie von 120 GWh.

5.7.3 Theoretisches Potenzial (-)

Die Ausweisung eines theoretischen Potenzials macht im Bereich Grundwasser keinen Sinn, da gesetzliche Vorgaben (Grundwasserschutz zonen, max. Abkühlung bzw. Erwärmung) immer zu berücksichtigen sind.

5.7.4 Realistisches Potenzial (330 GWh)

Es existieren aktuell fünf Studien zu thermischer Grundwassernutzung im Kanton Luzern. In diesen Studien wird für intensiv genutzte Gebiete eine Bilanzierung durchgeführt und die zur Verfügung stehende Grundwassermenge (Grundwasserdargebot, gemessen in Liter pro Minute) abgeschätzt. Bei thermischen Grundwassernutzungen spielt das Dargebot nur bei

der technischen/hydrogeologischen Machbarkeit eine Rolle, weil das geförderte Grundwasser aus dem Entnahmebrunnen über einen Rückgabebrunnen dem Vorkommen zurückgegeben wird. Das Dargebot bleibt somit erhalten. Limitierend sind die Beschränkungen der Temperaturveränderungen im Grundwasser (Gewässerschutzgesetz)²⁹. Einfachheitshalber wird das nutzbare Dargebot (nach Abzug der jährlichen Fördermengen für Trink- und Brauchwasserzwecke) für eine erste Grobschätzung auf das maximale jährliche Fördervolumen hochgerechnet. Diese Fördervolumen beträgt 71 Mio. m³, etwas mehr als zwei Mal das aktuell konzessionierte Fördervolumen für thermische Nutzung (32 Mio. m³). Mit einer Temperaturdifferenz von 3 K entsprechen 71 Mio. m³ etwa 250 GWh dem Grundwasser entzogener Wärme und einer Heizwärme von 330 GWh. Weitere Studien für eine verbesserte Abschätzung (z.B. im Wiggertal, aber auch für die gesamte Schweiz) sind aktuell in Arbeit.

5.7.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (220 GWh)

Bei der Festlegung eines Ausbauziels ist zu beachten, dass es im Kanton Luzern bereits heute Siedlungsgebiete gibt, in denen weitere Nutzungen kaum mehr möglich sind (z.B. Emmen, Perlen) oder nur noch örtlich eingeschränkt, da das Potenzial mit den bestehenden Nutzungen bereits zur Hälfte ausgeschöpft wird (z.B. Malters, Sursee). Überdies können sehr kleine Grundwassernutzungen, z.B. für Einfamilienhäuser, nicht bewilligt werden, da jeder Eingriff (d.h. jede Bohrung) ins Grundwasser ein potenzielles Risiko für Grundwasserverunreinigungen darstellt. Mit einer Vielzahl kleiner Nutzungen würden ausserdem zukünftige grössere Grundwassernutzungen verhindert. Zusätzlich würde das Risiko für die Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser übermässig erhöht. Soll das realistische Potenzial zu zwei Dritteln ausgeschöpft werden, ergibt dies einen Zielwert von 220 GWh.

²⁹ Voraussetzung für die Nutzung des Potenzials ist der lokale Wärmebedarf. Dieser Aspekt reduziert das realistische Potenzial zusätzlich. Die dafür nötige räumliche Analyse des Wärmebedarfs übersteigt den Rahmen dieses Berichts.

5.8 Solarenergie Thermisch

5.8.1 Definition

Thermische Solarenergie (oder Solarwärme) ist die Umwandlung von Sonnenlicht in Wärme mithilfe von Solarkollektoren. Im Gegensatz zu Photovoltaik wird kein Strom erzeugt. Solarthermische Anlagen erzeugen in der Regel Brauchwarmwasser und können die Raumheizung unterstützen. In den Bereichen Prozesswärme, Wärmenetze und Erdsondenregeneration³⁰ existieren erst wenige Anlagen. Diese Anwendungen werden in der zukünftigen Nutzung der Solarthermie wichtig werden.

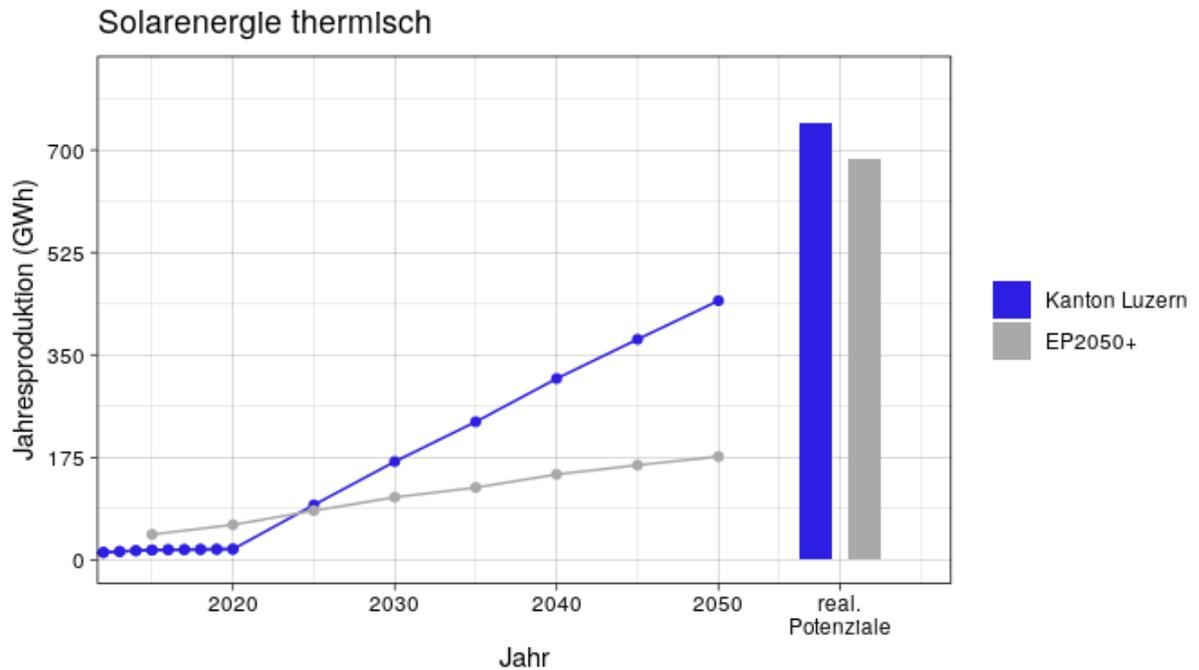


Abb. 15: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus Solarthermie und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.8.2 Aktuelle Produktion (18 GWh)

Im Jahr 2020 wurden etwa 18 GWh Wärme über Solarkollektoren produziert. Dieser Wert bezieht sich auf die seit 2007 durch das kantonale Förderprogramm Energie unterstützten Solarthermieanlagen³¹ (Iustat, 2022). Dabei wurde angenommen, dass lediglich 80 % der realisierten Anlagen vom Förderprogramm erfasst wurden. Solarthermische Anlagen auf Neubauten bekommen z.B. keine Förderung.

5.8.3 Theoretisches Potenzial (-)

Für das theoretische Potenzial bei der thermischen Solarenergie gelten die gleichen Überlegungen wie bei der Photovoltaik. Auf eine Bestimmung des theoretischen Potenzials wird daher verzichtet.

³⁰ Bei Erdsondenregeneration wird ein Teil der dem Erdreich im Winter entzogenen Wärme im Sommer wieder zugeführt, um eine Abkühlung des Untergrunds zu vermeiden.

³¹ Bis zum Jahr 2016 wurde der jährliche Wärmegewinn der geförderten Anlagen direkt in Iustat (2022) publiziert. Ab dem Jahr 2017 wird nur noch die Nennleistung aller Anlagen publiziert. Um weiterhin auf die produzierte Wärme rückschliessen zu können werden 870 Vollaststunden angenommen. Dies ist gleichbedeutend mit den Annahmen, dass die Nennleistung pro Fläche 500 W/m² beträgt und damit ein Wärmeertrag von 435 kWh/m² (Swissolar, 2023) pro Jahr gewonnen werden kann.

5.8.4 Realistisches Potenzial (750 GWh)

Das Potenzial für Solarwärme auf Dächern in der Schweiz beträgt 7 TWh und im Kanton Luzern 750 GWh³² (Bundesamt für Energie, 2022b).

5.8.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (440 GWh)

In Swissolar (2023) ist ein Produktionsziel von 7 TWh Solarwärme für 2050 vorgegeben, davon 2 TWh auf Wohnhäusern, 3 TWh für Wärmeverbünde (zur Einsparung von Holz im Sommerbetrieb) und 2 TWh für industrielle Prozesswärme. Dieses Ausbauziel entspricht etwa 10 % des Wärmebedarfs im Jahr 2050. Der Anwendungsfall liegt bei grossen Flächen (Industriedächern, Spitäler, Freiflächen [falls die Raumplanung dies zulässt]) und weniger auf kleinen Dachflächen von Wohngebäuden. Skaliert auf den Kanton Luzern resultiert ein Ausbauziel von 440 GWh.

³² Würde dieses Potenzial ausgenutzt, wäre auf den Dächern weniger Fläche für Photovoltaik verfügbar und das realistische Potenzial von Photovoltaik würde sich dementsprechend reduzieren (Bundesamt für Energie, 2019).

5.9 Geothermie tief

5.9.1 Definition

Der Begriff Geothermie tief schliesst in diesem Bericht auch die mitteltiefe Geothermie ein. Tiefe und mitteltiefe Geothermie erschliessen den Bereich ab 400 Meter unter der Erdoberfläche und erreichen hohe Temperaturen. Das Temperaturniveau in diesen Tiefen eignet sich oft zur Direktnutzung ohne Wärmepumpen, beispielsweise zum direkten Heizen (i.d.R. mitteltiefe Geothermie). Bei Temperaturen über 150 °C (i.d.R. Tiefengeothermie) kann Strom produziert werden.

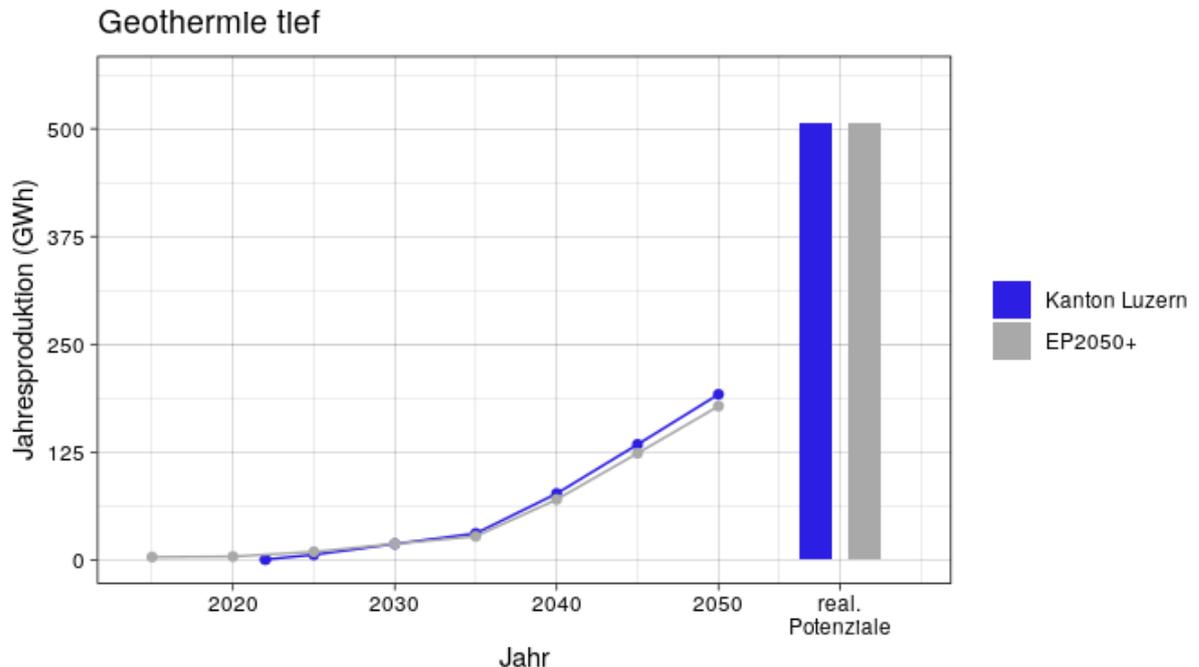


Abb. 16: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus tiefer Geothermie und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.9.2 Aktuelle Produktion (0.5 GWh)

Im Kanton Luzern gibt es aktuell nur eine Anlage für tiefe Geothermie. Die jährliche Heizenergie beträgt 0.5 GWh auf einem Temperaturniveau von ca. 70 °C³³.

5.9.3 Theoretisches Potenzial (6'300 GWh)

Sowohl für das theoretische als auch für das realistische Potenzial fehlen Grundlagenstudien, welche die Geologie, mögliche Standorte und den lokalen Wärmebedarf miteinbeziehen. Aufgrund mangelnder Daten werden hier die skalierten Bundeswerte übernommen. Das theoretische Potenzial der tiefen Geothermie in der Schweiz beträgt etwa 100'000 GWh pro Jahr. Als grobe Schätzung beträgt das daraus abgeleitete skalierte Potenzial für den Kanton Luzern 6'300 GWh (Geothermie Schweiz, 2020).

³³ Weggis, Temperaturniveau 70°C, installierte Leistung 0.1 MW, Tiefe 2300 m

5.9.3.1 Realistisches Potenzial (500 GWh)

Das realistische Potenzial wird für die Schweiz auf 8'000 GWh pro Jahr geschätzt. Skaliert auf den Kanton Luzern ergeben sich 500 GWh (Geothermie Schweiz, 2020).

5.9.4 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (190 GWh)

Schweizweit ist ein Ausbau der Stromversorgung über tiefe Geothermie auf 2'000 GWh bis 2050 vorgesehen. Das maximale damit verbundene Wärmepotenzial beträgt 13'300 GWh³⁴ (Bundesamt für Energie, 2020a). Skaliert auf den Kanton Luzern ergibt dies 130 GWh Strom und 840 GWh Wärme. Für das von CKW geplante Geothermiekraftwerk in Inwil wird aktuell von 18 GWh Strom und 78 GWh Wärme ausgegangen (CKW, 2023). Um das Ziel für die Stromproduktion zu erreichen, müssten also etwa sieben von solchen Kraftwerken gebaut werden. Da es in der Schweiz noch kaum Erfahrungen mit Tiefengeothermie gibt, wird hier von zwei Anlagen ausgegangen, d.h. einer Strom- und Wärmeproduktion von 36 GWh und 156 GWh. Daraus resultiert ein Ausbauziel von etwa 190 GWh.

³⁴ Annahme Organic Ranking Cycle (ORC) mit Wirkungsgrad von 0.15

5.10 Abwärme

5.10.1 Definition

Als Abwärme zählen Wärmeüberschüsse aus Kehrrechtverwertungsanlagen (KVA), Abwasserreinigungsanlagen (ARA), Kernkraftwerken (KKW), industriellen Prozessen (z.B. Stahlindustrie) und aus Kühlprozessen (z.B. Rechenzentren). Abwärme aus industriellen Hochtemperatur-Prozessen (KVA) kann über eine Dampfturbine zur Stromerzeugung genutzt werden und/oder direkt in ein thermisches Netz eingespeist werden. Bei Abwärmequellen mit geringeren Temperaturen, wie aus einer ARA oder aus Kühlprozessen, muss das Temperaturniveau meist durch eine Wärmepumpe angehoben werden.

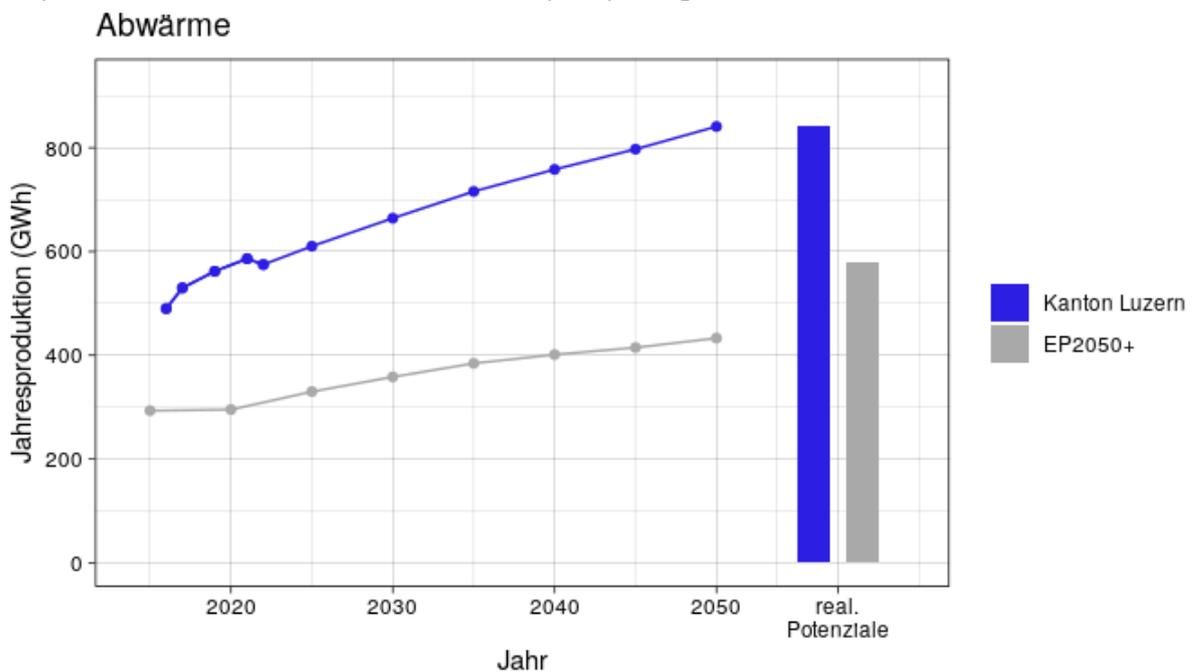


Abb. 17: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus Abwärme und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.10.2 Aktuelle Produktion (570 GWh)

Der Grossteil der genutzten Abwärme stammt aus der Kehrrechtverwertungsanlage Renergia in Perlen. Dort wurden im Jahr 2022 274'600 Tonnen Abfall verbrannt. Der Energieinhalt dieser Abfallmenge beträgt 982 GWh³⁵. Von dieser Abfallmenge wurden 176 GWh (18 %) als Strom ins Netz eingespeist und 384 GWh (39 %) als Wärme genutzt (84 GWh Fernwärme und 300 GWh Prozessdampf an die Perlen Papier AG (Renergia, 2022)). Der Eigenverbrauch (Strom und Wärme) der Anlage betrug 27 GWh (3 %) und Verluste beliefen sich auf 79 GWh (8 %). Ungenutzt als Wärme an die Umgebung abgegeben wurden 317 GWh (32 %). Das genutzte Potenzial der Renergia beträgt damit 560 GWh (57 %). Etwa 3 GWh Abwärme wurden zusätzlich aus Abwässern gewonnen³⁶. 12 GWh Wärme wurden aus der Abwärme von der Steeltec AG in Emmenbrücke bezogen. Das gesamte genutzte Potenzial beträgt damit 575 GWh, gerundet 570 GWh.

³⁵ Heizwert 3.6 MWh/t (Bundesamt für Energie, 2022a)

³⁶ Hirschengraben (400 kW Wärme), Concordia Hirschmattstrasse (150 kW Wärme, 180 kW Kälte), Löwengraben (1000 kW Wärme, 1500 kW Kälte), gesamt 1550 kW Wärme. Mit 2000 Vollbetriebsstunden ergibt dies 3.1 GWh Wärme

5.10.3 Theoretisches Potenzial (1'460 GWh)

Im PB K&E wird eine Reduktion der Abfallmenge von 25 % bis 2050 angenommen³⁷. Dies reduziert die zu erwartende Abfallmenge auf 206'000 Tonnen mit einem Energieinhalt von 740 GWh. Für Abwasserreinigungsanlagen (ARA) ist das auf den Kanton Luzern skalierte theoretische Potenzial etwa 500 GWh (Bundesrat, 2019, Tab. 14; EP2050+, 2021b). Für die Industrie beträgt es etwa 230 GWh (Bundesrat, 2019, Tab. 14). Insgesamt ergibt dies 1'460 GWh.

5.10.4 Realistisches Potenzial (840 GWh)

Beim realistischen Potenzial der KVA Renergia wird wie beim theoretischen Potenzial von der in 2050 zu erwartenden Abfallmenge von 206'000 Tonnen ausgegangen mit einem Energieinhalt von 740 GWh. Die Renergia plant bis 2030 eine Verdoppelung des Fernwärmeabsatzes von 80 GWh auf etwa 170 GWh³⁸. Unter der Annahme, dass die Perlen Papier AG auch in Zukunft 300 GWh an Prozessdampf abnimmt, resultiert eine Gesamtwärmeabgabe von 470 GWh. Wird die Stromabgabe von 180 GWh dazu addiert, ergibt sich eine Gesamtenergieabgabe von etwa 640 GWh. Das realistische Potenzial der ARAs im Kanton Luzern schwankt je nach Studie zwischen 10 GWh (Holinger AG, 2016) und 170 GWh (Ryser Ingenieure AG, 2013). Hier wird ein Arbeitswert von 120 GWh basierend auf skalierten Bundeszahlen (Bundesrat, 2019) angenommen. Für die Industrie finden sich keine geografisch zugeordneten Werte auf Bundesebene. Das grösste hochwertige Abwärmepotenzial besteht bei der Steeltec AG mit 53 GWh³⁹, niederwertiges Abwärmepotenzial mit etwa 24 GWh besteht bei den Rechenzentren der lokalen Energieversorger CKW und ewl. Das gesamte realistische Potenzial beläuft sich daher auf etwa 840 GWh. Bei diesem Potenzial ist jedoch davon auszugehen, dass viele potenziell nutzbare Abwärmequellen aktuell nicht erfasst sind.

5.10.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (840 GWh)

Das Ausbauziel für 2050 wird gleich dem realistischen Potenzial gesetzt. Um bei der KVA Renergia trotz sinkender Abfallmengen den Wärmeabsatz von 380 GWh auf 470 GWh zu steigern, ist voraussichtlich eine saisonale Speicherung der im Sommer nicht genutzten Wärme für den Winter nötig.

³⁷ Durch Recycling, Kreislaufwirtschaft und Reduktion von Food Waste, siehe auch PROGNOSE (2018), Abb. 43.

³⁸ persönliche Kommunikation mit Hans Musch, Geschäftsleiter Renergia

³⁹ Nach Einschätzung der ewl eher optimistisch.

5.11 Biomasse verholzt

5.11.1 Definition

Verholzte Biomasse umfasst Waldholz, Landschaftsholz (z.B. entlang von Strassen), Restholz aus holzverarbeitenden Betrieben (inklusive Pellets) und Altholz aus der Entsorgung und dem Rückbau von Gebäuden. Holz kann energetisch in Form von Wärme und Strom genutzt werden. Die Potenzialabschätzungen beruhen auf einem Bericht von Holzenergie Schweiz (2023). Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Energieholz werden nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die vermehrte Trockenheit zu Wachstumseinbussen und dadurch zu einer Reduktion des Energieholzes aus dem Wald führt. Dieser Effekt wird jedoch durch einen klimabedingten Wechsel zu anderen Baumarten mit grösserem Energieholzanteil teilweise kompensiert.

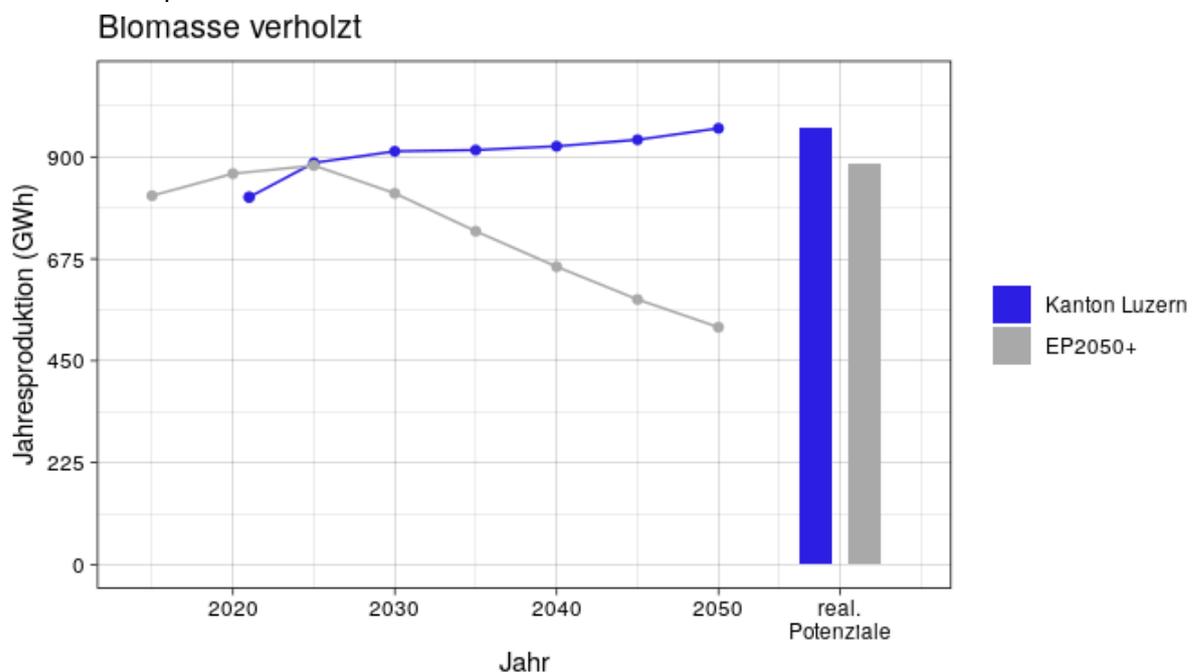


Abb. 18: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus verholzter Biomasse und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.11.2 Aktuelle Produktion (810 GWh)

Im Kanton Luzern wurden im Jahr 2021 301'000 m³ (Festmeter) energetisch verwertet (Holzenergie Schweiz, 2023). Dies entspricht einer Energiemenge von rund 810 GWh⁴⁰. Davon stammen 114'000 m³ aus Waldholz, 10'000 m³ aus Landschaftsholz, 93'000 m³ aus Restholz und 84'000 m³ aus Altholz. Der verstromte Anteil davon beträgt etwa 11 GWh⁴¹. Da die Forststatistik des Kantons Luzern für den gleichen Zeitraum lediglich 65'000 m³ Waldholz ausweist, ist davon auszugehen, dass ein erheblicher Anteil Waldholz aus anderen Regionen für die ansässige Holzindustrie importiert wird.

⁴⁰ Annahme: 1 m³ Holz produziert 2.7 MWh Endenergie, basierend auf einem berechneten Mittelwert aus (Holzenergie Schweiz, 2023)

⁴¹ Pronovo

5.11.2.1 Theoretisches Potenzial (1'140 GWh)

Das theoretische Potenzial wird nur für Wald- und Landschaftsholz abgeschätzt. Die gesamte Waldfläche des Kantons Luzern umfasst 40'000 Hektaren. Der Zuwachs beträgt ca. 10 m³ pro Hektare und Jahr. Damit ergeben sich 400'000 m³ nachwachsendes Waldholz, zusammen mit etwa 22'000 m³ nachwachsendem Landschaftsholz ergibt das 422'000 m³ Holz, welches einem Energieinhalt von 1'140 GWh entspricht.

5.11.3 Realistisches Potenzial (960 GWh)

Basierend auf Thees u. a. (2017) hat Holzenergie Schweiz (2023) ein realistisches Potenzial von 357'000 m³ oder 960 GWh berechnet. Dieses setzt sich zusammen aus 159'000 m³ Waldholz, 22'000 m³ Landschaftsholz, 39'000 m³ Restholz und 137'000 m³ Altholz. Die Zahlen lassen sich aufgrund der Unsicherheiten im Bereich Waldholz und unterschiedlicher Abgrenzungen beim Restholz nur schwer mit der aktuellen Nutzung vergleichen. Dennoch kann hier die Differenz zwischen der aktuellen Nutzung gemäss Holzenergie Schweiz (2023) und dem Potenzial gemäss Thees u. a. (2017) als Grössenordnung für das verbleibende Potenzial angenommen werden. Dieses beträgt 56'000 m³ oder 150 GWh. Im Kanton Luzern sind bereits heute Projekte in der Grössenordnung von 120 GWh in der Umsetzung bzw. teilweise schon umgesetzt. Damit ist das Potenzial faktisch ausgeschöpft. Zusätzlich existieren Projektideen für 250 GWh, welche das realistische Potenzial deutlich übersteigen.

5.11.4 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (960 GWh)

Das realistische Potenzial soll ausgenutzt werden. Damit ergibt sich ein Ausbauziel von 960 GWh, welches in den nächsten Jahren ausgeschöpft sein wird. Bei der Nutzung von Holz sind folgende Grundsätze zu beachten: Die stoffliche Nutzung, idealerweise Mehrfachnutzung, steht im Vordergrund. Der Einsatz von Energieholz im Hochtemperaturbereich oder zur Spitzenlastdeckung ist gegenüber reinem Einsatz im Niedertemperaturbereich (z.B. Raumwärme, Warmwasser) zu bevorzugen (Kanton Luzern, 2024; Nussbaumer, 2023). Um den Energiegehalt des Holzes möglichst vollständig zu nutzen, ist beim Einsatz von Holz im Hochtemperaturbereich zusätzlich die anfallende Niedertemperaturwärme zu nutzen. Dies gilt insbesondere, wenn mit Holz Strom- oder Pflanzenkohle produziert wird. Um Holz für Anwendungen im Hochtemperaturbereich bei limitiertem Potenzial verfügbar zu machen, ist eine Umnutzung aus dem Niedertemperaturbereich erforderlich. Im Niedertemperaturbereich können dann Technologien wie Solarthermie oder Wärmepumpen die entstandene Lücke schliessen. Auffallend an [Abbildung 18](#) ist der Rückgang der skalierten Bundesziele über die Zeit (graue Linie). Dieser Rückgang beruht hauptsächlich auf Rückgängen in den Sektoren Haushalte und Dienstleistungen (EP2050+, 2021a). Als Begründung werden steigende Energieeffizienz und kostengünstige Alternativen für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser mit Wärmepumpen und Wärmenetzen genannt (EP2050+, 2021b). Im Jahr 2050 wird ebenfalls ein sehr geringer Teil fester Biomasse als Massnahme zur Erzeugung von Negativemissionen eingesetzt, indem sie in Form von Pflanzenkohle in landwirtschaftliche Böden eingearbeitet wird (EP2050+, 2021a).

5.12 Biomasse nicht verholzt

5.12.1 Definition

Zur nicht verholzten Biomasse zählen Hofdünger (Gülle und Mist), landwirtschaftliche Nebenprodukte (z.B. Reststroh aus der Getreideproduktion), organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe, organische Abfälle im Haushaltskehricht, Grüngut aus Haushalt und Landschaft sowie Klärschlamm. Die Rohstoffkategorien ohne Hofdünger werden auch als Co-Substrate bezeichnet und sind energetisch ergiebiger als Hofdünger. Nicht verholzte Biomassen werden durch Vergärung Biogas umgewandelt. Biogas ist ein Gemisch, das zu rund zwei Dritteln aus Methan und zu einem Drittel aus Kohlendioxid besteht. Biogas kann gereinigt und aufbereitet in das Erdgasnetz eingespeist werden oder in Blockheizkraftwerken zur Strom- und Wärmegegewinnung genutzt werden.

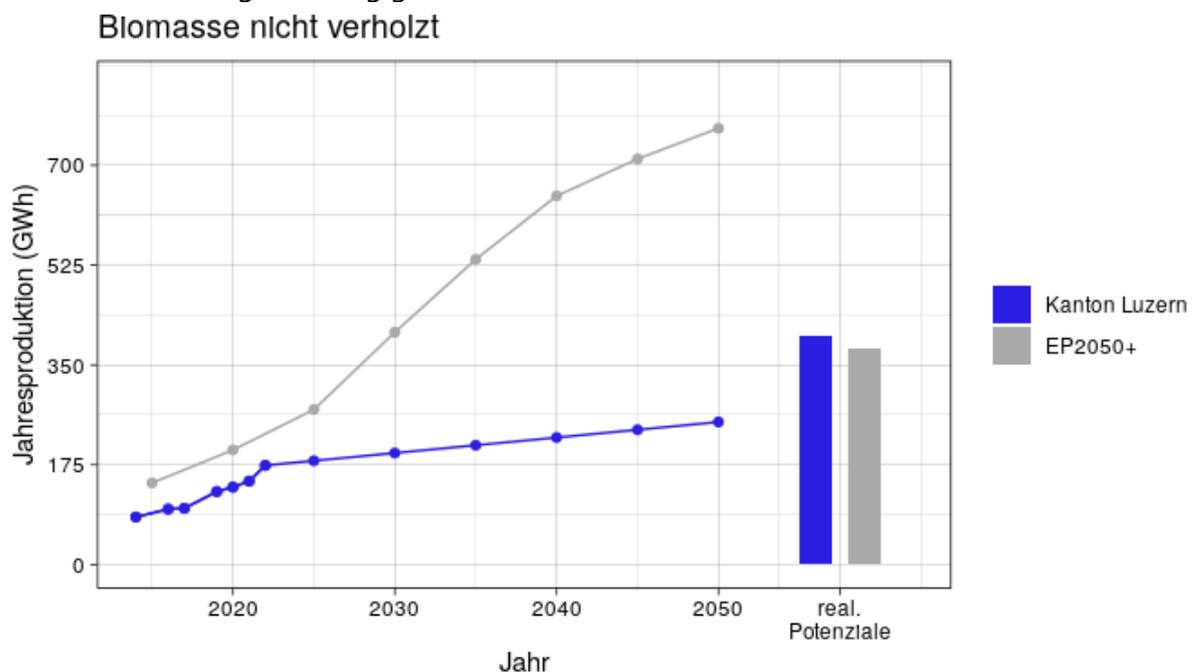


Abb. 19: Entwicklung der kantonalen Energieproduktion aus nicht-verholzter Biomasse und das entsprechende realistische Potenzial (blau). Zum Vergleich sind die skalierten Werte aus den Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) in grau gezeigt.

5.12.2 Aktuelle Produktion (174 GWh)

Im Kanton Luzern gibt es insgesamt 31 Biogas produzierende Anlagen: 15 Abwasserreinigungsanlagen (Holinger AG, 2022), drei industrielle Anlagen⁴² und 13 landwirtschaftliche Co-Vergärungsanlagen. Alle Anlagen produzieren mittels Blockheizkraftwerk Strom und Wärme, nur zwei speisen Biogas zusätzlich in das Gasnetz ein⁴³. Die Stromproduktion aller Biogasanlagen im Jahr 2022 betrug 58 GWh⁴⁴. Die aus dieser Stromproduktion abgeschätzte genutzte Wärme beträgt 81 GWh⁴⁵. Insgesamt resultieren

⁴² Emmi Schweiz AG Dagmersellen, Kompogasanlage Wauwil, SwissFarmerPower Inwil

⁴³ ARA Buholz und SwissFamerPowerInwil

⁴⁴ Pronovo Daten, d.h. ohne Eigenbedarf

⁴⁵ Annahmen: Strom und Wärmeproduktion stehen im Verhältnis 35:65 und 75 % der produzierten Wärme werden genutzt

139 GWh Strom und Wärme. Die direkt ins Gasnetz eingespeiste Energiemenge beträgt 35 GWh⁴⁶. In der Summe ist die aktuelle Nutzung somit 174 GWh⁴⁷.

5.12.3 Theoretisches Potenzial (840 GWh)

In Kanton Luzern (2013) wird das theoretische Potenzial von Biogas mit 854 GWh angegeben. In Thees u. a. (2017) wird das theoretische Potenzial mit 817 GWh beziffert. Es wird der Mittelwert von 840 GWh übernommen.

5.12.4 Realistisches Potenzial (400 GWh)

In Kanton Luzern (2013) wird das realistische Potenzial mit 310 GWh angegeben. Aus Thees u. a. (2017) ergibt sich ein realistisches Potenzial von 490 GWh. Als Arbeitswert wird hier ein Mittelwert von 400 GWh angenommen. Inwieweit dieser Arbeitswert wirklich nutzbar ist, hängt stark von der Nutzbarmachung des Hofdüngers ab, welcher energetisch etwa 75 % des realistischen Potenzials ausmacht⁴⁸. Auf die Menge bezogen macht der Hofdünger sogar 96 % der verwendeten Biomasse aus.

5.12.5 Aus fachlicher Sicht empfohlenes Ausbauziel für 2050 (250 GWh)

Das Ausbauziel hängt stark von der Nutzbarmachung des Hofdüngers ab. Hofdünger hat gegenüber Co-Substraten (z.B. organische Abfälle, Glycerin) eine geringere Energiedichte (Energie pro kg). Wo das Ausbauziel zwischen dem genutzten Potenzial von 170 GWh und dem realistischen Potenzial von 400 GWh zu positionieren ist, bedarf einer Interessenabwägung. Für ein hohes Ausbauziel sprechen die gesteigerte Nachfrage nach erneuerbarem und speicherbarem Gas für Hochtemperaturprozesse⁴⁹, eine weniger starke Abhängigkeit von Importgasen (Wasserstoff, Biogas), die Entlastung des Rohstoffes Holz sowie die Reduktion von Treibhausgasemissionen⁵⁰. Tendenziell fördert vergorene Gülle (im Vergleich zum Ausbringen unvergorener Gülle), trotz dem geringeren Kohlenstoffgehalt⁵¹, zusätzlich die Humusbildung. Für ein konservatives Ausbauziel sprechen die geringe Wirtschaftlichkeit der Energieproduktion aus Hofdünger alleine (und damit die Abhängigkeit von hohen Fördergeldern) und die langen Transportwege der Co-Substrate (zum Teil aus dem Ausland) und des rückgeführten Düngers nach der Vergärung. Vergorene Gülle hat (im Vergleich zu unvergorener Gülle) ausserdem in der Regel einen erhöhten Ammoniumgehalt. Das damit verbundene erhöhte Auswaschrisko von Stickstoff kann zu einer Verschmutzung des Grundwassers führen. Gemäss PB K&E die landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen bis 2050 halbiert werden. Dafür ist eine Reduktion des Tierbestands und eine klimaschonende Ernährung nötig (Massnahme KS-L2.2 des PB K&E). Dies reduziert die Menge an verfügbarem Hofdünger und somit das realistische Potenzial. Als Arbeitswert wird ein Ausbauziel von 250 GWh gewählt. Dabei wird davon ausgegangen, dass kleine landwirtschaftliche Anlagen mithilfe von Förderung und technischen Fortschritten in Zukunft zumindest teilweise wirtschaftlich betrieben werden können. Das skalierte Bundesziel ist um ein Dreifaches höher und sogar höher als das realistische Potenzial. Dies ist auf importiertes Biogas

⁴⁶ ARA Buholz 6.8 GWh/Jahr (Tab. 21 in Holinger AG, 2022) und SFPI 28 GWh/Jahr (Tab. 21 in Holinger AG, 2022)

⁴⁷ Die Studie Holinger AG (2022) analysiert Einzelanlagen und die aufsummierte Gesamtenergie ergibt 151 GWh. Der Unterschied zum angegebenen Wert von 174 GWh zeigt die Unsicherheit der Abschätzungen aufgrund unterschiedlicher Methodiken.

⁴⁸ Kanton Luzern (2013): Hofdüngeranteil 80 %; Thees u. a. (2017): Hofdüngeranteil 71 %

⁴⁹ Eine entsprechende Aufbereitung des Biogases wird vorausgesetzt.

⁵⁰ Treibhausgasemissionen können mit Hilfe von Biogasanlagen über folgende Wirkungspfade eingespart werden: (i) Umwandlung vom stark klimaschädlichen Methan, welches bei der Hofdüngerlagerung freigesetzt würde, zum weniger klimaschädlichen CO₂ bei der Verbrennung, siehe hierzu auch das Kompensationsprogramm des Bundes [Methanvermeidung aus biogenen Abfällen](#) (ii) Substitution fossiler Brenn- und Treibstoffe durch Biogas, (iii) die Substitution von Mineräldüngern aus fossiler Energiequelle durch organische Dünger.

⁵¹ Bei der Vergärung von Hofdüngern entsteht Methan. Der darin enthaltene Kohlenstoff gelangt als CO₂ in die Atmosphäre und wird nicht mehr dem Boden zugeführt.

zurückzuführen, welches in den Daten des Bundesamts für Energie (2020a) nicht von der Inlandproduktion zu trennen ist.

6 Übersicht aller Ausbauziele

Die im Bericht vorgeschlagenen Ausbauziele ergeben addiert eine Strom- und Wärmeproduktion von insgesamt 7'710 GWh im Jahr 2050 ([Abbildung 20](#)). Der Produktionsbedarf (schwarze Linie) geht zurück ([Kapitel 3.5](#)). Das Produktionsziel für Strom und Wärme im Jahr 2050 mit 7'710 GWh übertrifft den nötigen Produktionsbedarf von 7'240 GWh ([Kapitel 3.6](#)) um etwa 6 % ([Abbildung 20](#)). Insgesamt ist eine über dreifache Steigerung der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion von 2'400 GWh im Jahr 2021 auf 7'710 GWh nötig ([Abbildung 21](#)). Photovoltaik hat im Jahr 2050 einen Anteil von 32 % bezüglich aller untersuchten Energieträgern. Die untiefe Geothermie folgt mit 16 %. Verholzte Biomasse und Abwärme spielen im Jahr 2050 mit 12 % und 11 % weiterhin eine tragende Rolle. Die restlichen Technologien tragen weniger als 10 % bei. Die grösste Steigerung zwischen dem aktuellen Stand und dem Jahr 2050 hat mit einem Faktor von 360 die tiefe Geothermie, welche heute fast inexistent ist, gefolgt von der Windenergie (Faktor 63), der thermischen Solarenergie (Faktor 24) und der Photovoltaik (Faktor 10).

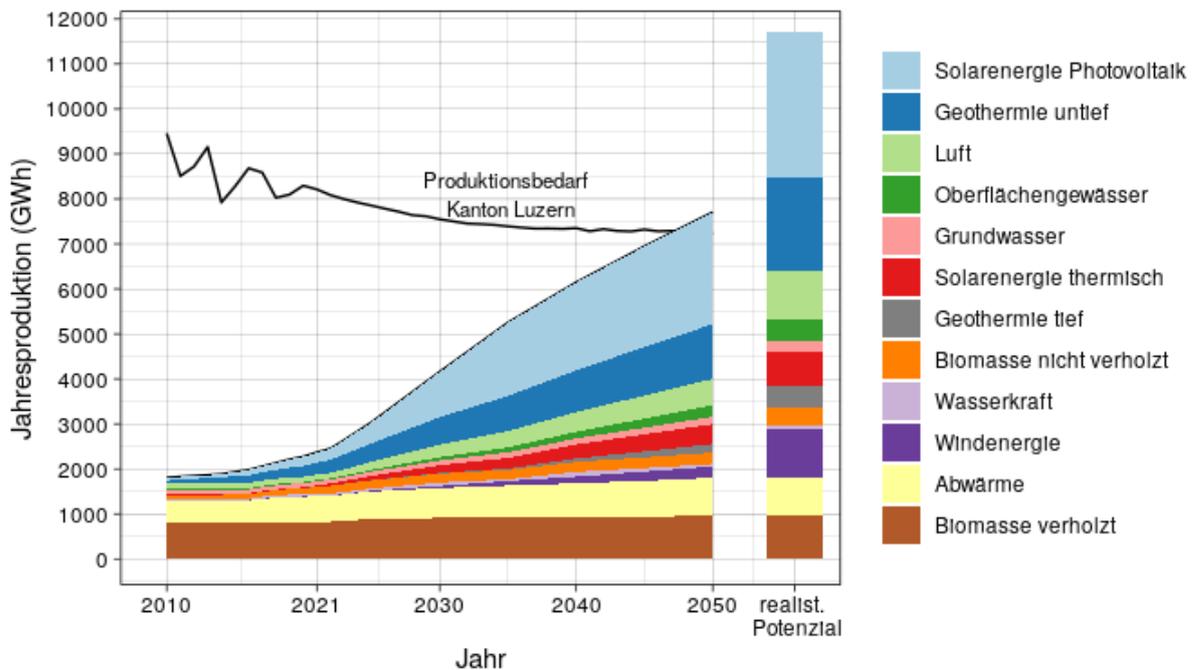


Abb. 20: Entwicklung der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion im Kanton Luzern. Die schwarze durchgezogene Linie zeigt den Produktionsbedarf.

Energieträger	Produktion 2021 (GWh)	Produktion 2050 (GWh)	Erforderlicher Ausbaufaktor (-)	Produktionsanteil 2021 (%)	Produktionsanteil 2050 (%)
Solarenergie Photovoltaik	241	2'490	10	10	32
Geothermie untief	294	1'220	4	12	16
Biomasse verholzt	811	960	1	34	12
Abwärme	575	840	1	24	11
Luft	120	580	5	5	8
Solarenergie thermisch	18	440	24	1	6
Oberflächengewässer	27	260	10	1	3
Windenergie	4	250	63	0	3
Biomasse nicht verholzt	174	250	1	7	3
Geothermie tief	1	190	356	0	2
Grundwasser	90	170	2	4	2
Wasserkraft	45	60	1	2	1

Abb. 21: Übersicht der erneuerbaren Strom- und Wärmeproduktion im Kanton Luzern, sortiert nach ihrem Produktionsanteil im Jahr 2050⁵².

6.1 Strom

Die im Bericht vorgeschlagenen Ausbauziele resultieren in einer Stromproduktion von insgesamt etwa 3'100 GWh im Jahr 2050. Der Strombedarf (schwarze Linie) steigt aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung in den Sektoren Verkehr (Elektrofahrzeuge) und Wärme (Wärmepumpen) an ([Kapitel 3.5](#)). Das Ziel für die erneuerbare Stromproduktion von 3'100 GWh im Jahr 2050 übertrifft den nötigen Produktionsbedarf von 2'970 GWh um etwa 4 % ([Abbildung 22](#)). Insgesamt ist eine fast sechsfache Steigerung von 540 GWh im Jahr 2021 auf 3'100 GWh nötig ([Abbildung 23](#)). Die Stromproduktion durch Photovoltaik hat in den letzten Jahren die Stromproduktion aus Abwärme (hauptsächlich KVA Renergia) überholt und wird weiter ausgebaut. Im Jahr 2050 werden 80 % des Stroms durch Photovoltaik erzeugt. Alle anderen Technologien tragen einzeln weniger als 10 % bei.

⁵² Für Energieträger, welche auf Wärmepumpen basieren (untiefe Geothermie, Luft, Oberflächengewässer, Grundwasser) stimmen die Werte in der Tabelle nicht mit den Werten in den Einzelkapiteln überein, da der Strom für Wärmepumpen hier nicht berücksichtigt ist um Doppelzählungen beim Strom zu vermeiden. In [Abbildung 24](#) ist der Strom für Wärmepumpen beinhaltet und die Werte sind identisch mit jenen in den Einzelkapiteln.

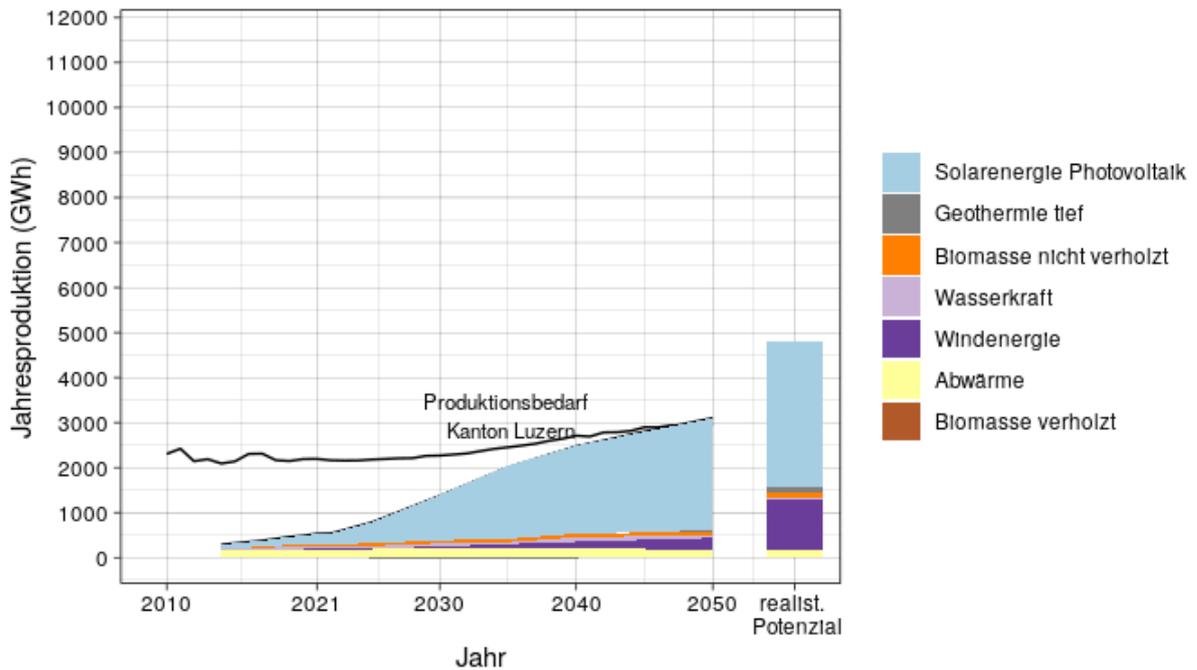


Abb. 22: Entwicklung der erneuerbaren Stromproduktion im Kanton Luzern. Die schwarze durchgezogene Linie zeigt den Produktionsbedarf für Strom.

Energieträger	Produktion 2021 (GWh)	Produktion 2050 (GWh)	Erforderlicher Ausbaufaktor (-)	Produktionsanteil 2021 (%)	Produktionsanteil 2050 (%)
Solarenergie Photovoltaik	241	2'490	10	45	80
Windenergie	4	250	63	1	8
Abwärme	176	180	1	33	6
Biomasse nicht verholzt	58	80	1	11	3
Wasserkraft	45	60	1	8	2
Geothermie tief	0	40	Inf	0	1
Biomasse verholzt	11	10	1	2	0

Abb. 23: Übersicht der erneuerbaren Stromproduktion im Kanton Luzern, sortiert nach ihrem Produktionsanteil im Jahr 2050⁵³

6.2 Wärme

Die im Bericht vorgeschlagenen Ausbauziele resultieren in einer Wärmeproduktion von 5'510 GWh im Jahr 2050. Der Wärmebedarf geht aufgrund von Effizienzmassnahmen (z.B. Dämmung der Gebäudehülle) und dem Wechsel von der Verbrennung fossiler Energieträger (Öl und Erdgas) hin zu Elektrizität (Wärmepumpen) zurück. Das Produktionsziel für die erneuerbare Wärmeproduktion von 5'510 GWh deckt den nötigen Produktionsbedarf von

⁵³ Für Energieträger, welche Strom und Wärme produzieren (tiefe Geothermie, Abwärme, verholzte und nicht-verholzte Biomasse) ist hier nur der Stromanteil aufgeführt, der Wärmeanteil findet sich in [Abbildung 24](#).

5'350 GWh. (Abbildung 24). Insgesamt ist eine Steigerung von 2'080 GWh im Jahr 2021 auf 5'510 GWh um einen Faktor 2.7 nötig (Abbildung 25).

Aktuell hat die verholzte Biomasse mit 38 % den grössten Anteil an der erneuerbaren Wärmeproduktion, gefolgt von der untiefen Geothermie (20 %) und Abwärme (19 %). Im Jahr 2050 verdrängt die untiefe Geothermie mit 31 % die verholzte Biomasse (17 %), welche bereits im Jahr 2021 weitgehend ausgeschöpft ist. Abgesehen von der tiefen Geothermie hat die thermische Solarenergie mit 24 den grössten Ausbaufaktor. Die Solarthermie wird längerfristig eine Schlüsselrolle bei der Unterstützung von Holzwärmeverbänden und der Regeneration von Erdsonden spielen. Oberflächengewässer (Faktor 10) spielen beim Ausbau der thermischen Netze eine entscheidende Rolle.

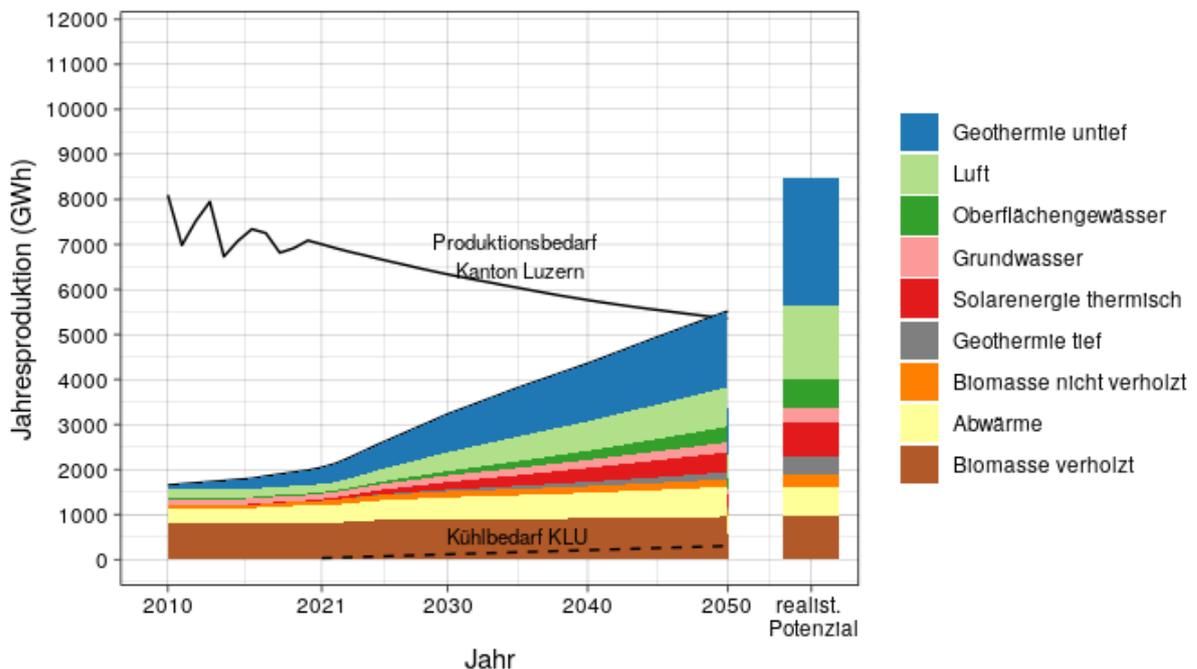


Abb. 24: Entwicklung der erneuerbaren Wärmeproduktion im Kanton Luzern. Die schwarze durchgezogene Linie zeigt den Produktionsbedarf für Wärme. Die gestrichelte Linie stellt eine Schätzung des Kühlbedarfs dar.

Energieträger	Produktion 2021 (GWh)	Produktion 2050 (GWh)	Erforderlicher Ausbaufaktor (-)	Produktionsanteil 2021 (%)	Produktionsanteil 2050 (%)
Geothermie untief	408	1'690	4	20	31
Biomasse verholzt	800	950	1	38	17
Luft	180	870	5	9	16
Abwärme	399	670	2	19	12
Solarenergie thermisch	18	440	24	1	8
Oberflächengewässer	37	350	10	2	6
Grundwasser	120	220	2	6	4
Biomasse nicht verholzt	116	170	1	6	3
Geothermie tief	1	160	289	0	3

Abb. 25: Übersicht der erneuerbaren Wärmeproduktion im Kanton Luzern⁵⁴.

⁵⁴ Für Energieträger, welche Strom und Wärme produzieren (tiefe Geothermie, Abwärme, verholzte und nichtverholzte Biomasse) ist hier nur der Wärmeanteil aufgeführt, der Stromanteil findet sich in [Abbildung 22](#).

6.3 Kühlen

Mit steigenden Temperaturen infolge der Klimaerwärmung wird der Bedarf an Kühlung, vor allem in Wohn- und Bürogebäuden, aber auch beispielsweise in Alters- und Pflegezentren oder Schulbauten steigen. Durch Extrapolation von Einzelgebäuden auf den gesamten Gebäudepark wird der Anstieg des Kühlbedarfs im Kanton Luzern von aktuell 10 GWh auf 110 GWh im Jahr 2050 abgeschätzt (Settembrini u. a., 2017). Mutschler u. a. (2021) prognostizieren einen Kühlbedarf (wieder skaliert auf den Kanton Luzern) von Gebäuden, inklusive Dienstleistungs- und Bürogebäuden, zwischen 190 und 320 GWh, für das extremste Szenario sogar von bis zu 1'110 GWh. Zu beachten ist, dass der Kühlbedarf nur während wenigen Monaten im Jahr anfällt, dann aber hohe Kühlleistungen nötig sind, was in der Planung berücksichtigt werden muss (Kühlung mit Seewasser, Regeneration von Erdsonden, Kühlen mit Grundwasser).

Neben Gebäuden haben Rechenzentren einen relevanten Kühlbedarf. Werden Bundeszahlen auf den Kanton Luzern skaliert, wäre der Strombedarf der Rechenzentren im Kanton Luzern im Jahr 2019 etwa 130 GWh und im Jahr 2026 zwischen 170 GWh und 220 GWh (eicher+pauli, 2023; TEP Energy GmbH und Hochschule Luzern, 2021). Dieser Strom wird vollständig in Wärme umgewandelt und muss zum Grossteil durch einen Kühlprozess abgeleitet werden. Die abgeleitete Wärme ist Abwärme und zum Heizen verfügbar. Das Abwärmepotenzial der Rechenzentren von ewl und CKW im Kanton Luzern beträgt 24 GWh. Im Kanton Luzern sind also Rechenzentren unterdurchschnittlich vertreten. Als Arbeitswerte zur Abschätzung des Kühlbedarfs (Gebäude und Rechenzentren) im Kanton Luzern werden 30 GWh für heute und 300 GWh für 2050 angenommen. Dies entspricht einem Anstieg um ein Zehnfaches.

In [Abbildung 24](#) ist die Entwicklung des Kühlbedarfs mit der prognostizierten Wärmeproduktion im Kanton Luzern überlagert (grau gestrichelte Linie). Der Anteil des Kühlbedarfs im Jahr 2050 am Produktionsziel für Wärme beträgt 5 %. Der Vergleich der Jahresenergien für Heizen und Kühlen wie in [Abbildung 24](#) soll als erster Grössenvergleich aufgefasst werden. Da der Kühlbedarf und daher auch die Abwärme jedoch hauptsächlich im Sommer anfallen, wenn der Heizbedarf gering ist, kann die Abwärme oft nicht direkt zum Heizen genutzt werden. Zudem stellen tagestemperaturabhängige Leistungsschwankungen beim Kühlbedarf eine Herausforderung dar. Zeitliche Diskrepanzen zwischen Kühl- und Heizbedarf können durch Speicher überbrückt werden. Speicher sind ein Schwerpunkt der Massnahme "KS-E2.3: Förderung Winterstromproduktion und Technologien für Strom und Wärme zum saisonalen Ausgleich" des PB K&E.

7 Anhang

7.1 Anhang A1: Involvierte Organisationen

An den Workshops im Herbst 2023 und in der Konsultation der Fachberichte zu den Potenzialen, Ausbauzielen und Stossrichtungen erneuerbarer Energieproduktion im Kanton Luzern haben folgende Organisationen mitgewirkt (alphabetisch geordnet).

BE Netz AG
CKW
ewl energie wasser luzern
Geothermie Schweiz
Holzenergie Luzern
Holzenergie Schweiz
HSLU Hochschule Luzern
NELU Neue Energie Luzern
Renergia
SFPI SwissFarmerPower Inwil AG
Suisse Eole
suissetec Zentralschweiz
Swissolar
TNS Thermische Netze Schweiz
Verein Luzerner Gemeinden vlg
WWF Zentralschweiz
Ökostrom Schweiz

7.2 Anhang A2: Ausbauziele basierend auf den EP2050+

Die in diesem Bericht vorgeschlagenen Ausbauziele basieren auf den skalierten Ausbauzielen der EP2050+ des Bundes. In den EP2050+ werden die Ausbauziele pro Energieträger entweder direkt vorgeschlagen oder können aus den Grössen "Umweltwärme" und "Fernwärme" abgeleitet werden.

7.2.1 Datengrundlagen

In [Abbildung 26](#) ist tabellarisch aufgeführt, welche Daten aus den EP2050+ verwendet wurden. Sind mehrere Datenquellen vermerkt (z.B. für Abwärme) wird aufsummiert.

Kapitel	Tabelle EP2050+	Annahmen / Bemerkung
Photovoltaik	Tab. 19-02, «Photovoltaik»	-
Solarenergie thermisch	Tab. 07-01, «Solarwärme»	-
Windenergie	Tab. 19-02, «Wind»	-
Wasserkraft	Tab. 19-02, «Wasserkraft»	-
Biomasse verholzt	Tab. 04-01, «Holz»	-
Biomasse verholzt	Tab. 04-01, «Fernwärme»	siehe Aufschlüsselung Fernwärme
Biomasse nicht verholzt	Tab. 04-01, «Biogas»	-
Geothermie tief	Tab. 04-01, «Fernwärme»	siehe Aufschlüsselung Fernwärme
Geothermie tief	Tab. 19-02, «Geothermieanlagen»	für Stromproduktion
Geothermie untief	Tab. 07-01, «Umweltwärme»	siehe Aufschlüsselung Umweltwärme
Grundwasser	Tab. 07-01, «Umweltwärme»	siehe Aufschlüsselung Umweltwärme
Grundwasser	Tab. 04-01, «Fernwärme»	siehe Aufschlüsselung Fernwärme
Oberflächengewässer	Tab. 04-01, «Fernwärme»	siehe Aufschlüsselung Fernwärme
Luft	Tab. 07-01, «Umweltwärme»	siehe Aufschlüsselung Umweltwärme
Abwärme	Tab. 04-01, «Fernwärme»	siehe Aufschlüsselung Fernwärme
Abwärme	Tab. 19-02, «KVA»	Summe aus KVA, Industrie, Abwasser für Stromproduktion
Abwärme	Tab. 19-02, «Fernheizkraftwerke»	für Stromproduktion

Abb. 26: Verwendete Daten aus den EP2050+

7.2.2 Aufschlüsselung der Umweltwärme

In den EP2050+ ist lediglich das Ausbauziel für "Umweltwärme" aufgeführt, jedoch nicht deren Aufteilung in die Energieträger Luft, Geothermie untief und Grundwasser. Um die Werte (GWh) für diese Energieträger abzuleiten, wurde die Zusammensetzung gemäss den Anteilen in [Abbildung 27](#) verwendet. Die Anteile sind aus dem realistischen Potenzial abgeleitet, welches in den EP2050+ dokumentiert ist (EP2050+, 2021b, Tab. 14). Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass sich diese Anteile mit der Zeit nicht verändern.

Energieträger	Realist. Potenzial (GWh)	Anteil (%)
Geothermie untief	2'850	60
Luft	1'640	35
Grundwasser	250	5

Abb. 27: Aufteilung der Umweltwärme auf konkrete Energieträger basierend auf den realistischen Potenzialen aus den EP2050+ (hier bereits auf den Kanton Luzern skaliert).

7.2.3 Aufschlüsselung der Fernwärme

In den EP2050+ ist lediglich das Ausbauziel für thermische Netze (dort "Fernwärme" genannt) aufgeführt. Es ist nicht aufgeschlüsselt, welche Energieträger den thermischen Netzen zugrunde liegen und wie sich der Energieträgermix thermischer Netze mit der Zeit entwickelt. Der Verband Thermische Netze Schweiz (früher "Verband Fernwärme Schweiz") publiziert

jährlich den aktuellen Produktionsmix der thermischen Netze in der Schweiz (Verband Fernwärme Schweiz, 2022). Eine Potenzialstudie des Bundes (Bundesrat, 2019) prognostiziert die zeitliche Entwicklung des Energiemixes in thermischen Netzen. [Abbildung 28](#) zeigt die aus beiden Studien abgeleitete Entwicklung des Energiemixes thermischer Netze. Dabei wurde angenommen, dass sich die Anteile der Energieträger zwischen 2020 und 2050 linear entwickeln. Es ist zu beachten, dass es sich in [Abbildung 28](#) um die Entwicklung der Anteile in Prozent handelt. Durch den generellen Ausbau thermischer Netze ist trotz gleichbleibendem Anteil (z.B. Industrie und Abwärme, 5%) ein Zuwachs (GWh) zu erwarten.

Energieträger	Realist. Potenzial (GWh)	Anteil (%)
Geothermie untief	2'850	60
Luft	1'640	35
Grundwasser	250	5

Abb. 28: Zeitliche Entwicklung des Energiemixes thermischer Netze

8 Literatur

- Anderegg, D., Strebel, S., & Rohrer, J. (2022). Photovoltaik Potenzial auf Dachflächen in der Schweiz. ZHAW. <https://doi.org/10.21256/zhaw-2425>
- Bundesamt für Energie. (2019). *Sonnendach.ch und Sonnenfassade.ch: Berechnung von Potenzialen in Gemeinden*. Abgerufen von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/geoinformation/geodaten/solar/solarenergie-eignung-hausdach.html>
- Bundesamt für Energie. (2020a). *Energieperspektiven K2050+: Kurzbericht* (S. 1–112). Abgerufen von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>
- Bundesamt für Energie. (2020b). *Energieperspektiven K2050+: Technischer Bericht*. Abgerufen von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>
- Bundesamt für Energie. (2020c). EP2050+ Szenarienergebnisse ZERO-Basis. Abgerufen 9. Januar 2024, von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>
- Bundesamt für Energie. (2022a). *Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung der Schweizer KVA nach europäischem Standardverfahren*.
- Bundesamt für Energie. (2022b). *Sonnendach.ch*. Abgerufen 16. Januar 2024, von <https://www.uvek-gis.admin.ch/BFE/sonnendach/?lang=de>
- Bundesamt für Energie. (2022c). *Windpotenzial Schweiz 2022*. Abgerufen von <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/72771.pdf>
- Bundesamt für Energie. (2023). *Statistik Solarenergie 2022*.
- Bundesamt für Raumentwicklung. (2020). *Konzept Windenergie*. Abgerufen von www.are.admin.ch/windenergie
- Bundesrat. (2019). *Potenzial von Fernwärme- und Fernkälteanlagen (Postulat 19.4051)*.
- CKW. (2023). *Infoveranstaltung Geothermieprojekt Inwil*. Abgerufen 19. Januar 2024, von <https://www.ckw.ch/ueber-ckw/unternehmen/unsere-kraftwerke/geothermie>
- eicher+pauli. (2023). *Abwärmenutzung von Rechenzentren*. EnergieSchweiz.
- EP2050+. (2021a). *Energieperspektiven 2050+ Exkurs Biomasse*.

- EP2050+. (2021b). *Energieperspektiven 2050+ Technischer Bericht*.
- Gaudard, A., Schmid, M., & Wüest, A. (2017). Thermische Nutzung von Oberflächengewässern. *Aqua and Gas*, 5, 40–45.
- Geothermie Schweiz. (2020). *Positionspapier Wärmepotenzial Geothermie*.
- Hangartner, D., Ködel, J., Mennel, S., & Sulzer, M. (2018). Grundlagen und Erläuterungen zu Thermischen Netzen, 1–37. Abgerufen von <https://www.energieschweiz.ch/home.aspx?p=22949,22963,22985>
- Holinger AG. (2016). *Potential Abwasserwärmenutzung*.
- Holinger AG. (2022). *Biogas im Kanton Luzern*.
- Holzenergie Schweiz. (2023). *Grundlagenarbeit zu einem Monitoring Holzenergie in der Schweiz*.
- Kanton Luzern. (2010). *Planungsbericht B 180 über die Wasserkraftnutzung im Kanton Luzern*.
- Kanton Luzern. (2013). *Strategie Biogasanlagen im Kanton Luzern*.
- Kanton Luzern. (2019). *Kantonales Energiegesetz*.
- Kanton Luzern. (2020). *Konzept Windenergie Kanton Luzern*.
- Kanton Luzern. (2021). *Planungsbericht B 87 Klima- und Energiepolitik 2021 des Kantons Luzern*.
- Kanton Luzern. (2022a). *Offensive Holz*. Dienststelle Landwirtschaft und Wald. Abgerufen von www.lawa.lu.ch
- Kanton Luzern. (2022b). *Teilrevision Windenergie 2022*.
- Kanton Luzern. (2023). *Massnahmen- und Umsetzungsplanung Klima und Energie 2022-2026*.
- Kanton Luzern. (2024). *Kantonaler Richtplan, in Vernehmlassung*.
- Kanton Luzern, unveröffentlicht. (2024). *Photovoltaikpotenzial auf Strasseninfrastrukturen des Kantons Luzern*.
- Kanton Zürich. (2022). *Energiestrategie und Energieplanung Kanton Zürich 2022*.
- Iustat. (2022). *Jahrbuch Kanton Luzern 2022*.
- Mutschler, R., Rüdisüli, M., Heer, P., & Eggimann, S. (2021). Benchmarking cooling and heating energy demands considering climate change, population growth and cooling device uptake. *Applied Energy*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116636>
- Nussbaumer, T. (2023). *Verwertungspfade Holzenergie*. Abgerufen von www.verenum.ch
- Persdorf, P., Rüschi, F., & Haller, M. (2015). *RegenOpt*. Stadt Zürich.
- PROGNOS. (2018). *Siedlungsabfallaufkommen Schweiz 2050*.
- Regierungsrat Kanton Luzern. (2023). *B 160: Teilrevision des kantonalen Richtplans betreffend Windenergie*.
- Renergia. (2022). *Jahresbericht 2022*.
- Ruesch, F., Füglistner, L., Haller, M., Sommer, T., & Zakovorotnyi, A. (2022). *Cool2Regen*. Bundesamt für Energie.
- Ryser Ingenieure AG. (2013). *Abwasserwärmenutzung im Kanton Luzern*.
- Settembrini, G., Domingo, S., Heim, T., Jurt, D., Zakovorotnyi, A., Seerig, A., u. a. (2017). *KlimaBau – Planen angesichts des Klimawandels* (S. 172). Bundesamt für Energie.
- SIA384/6. (2021). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- Swissolar. (2023). *Roadmap Solarwärme Schweiz 2050*.
- TEP Energy GmbH und Hochschule Luzern. (2021). *Rechenzentren in der Schweiz*.
- EnergieSchweiz. Abgerufen von www.tep-energy.ch+41435007171office@tep-energy.chwww.hslu.ch/technik-architektur
- Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., & Lemm, R. (2017). *Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Heft* (Bd. 57).

Verband Fernwärme Schweiz. (2022). *Jahresbericht 2021*. Abgerufen von www.fernwaerme-schweiz.ch