

28. OKTOBER 2024



Die wirtschaftliche Betrachtung des gemischten Einsatzes von regenerativen und konventionellen Energieträgern zur Bereitstellung von elektrischer Energie in der Schweiz, insbesondere im Kanton Bern und die Frage "Geht es auch ohne konventionelle Kraftwerke?"

DIPLOMARBEIT VON MATTHIAS MEISTER

STUDIENGANG DIPL. ENERGIE- UND UMWELTTECHNIKER HF

TEKO-BERN IM JAHR 2024

BETREUENDER DOZENT: ANDREAS KISTLER

[FIRMENNAME]

Inhalt

1 Management Summary	3
2 Beruflicher Lebenslauf.....	4
3 Einleitung	6
3.1 Ausgangslage	7
3.2 Zielsetzung	7
3.3 Vorgehen	8
4 Zeitplan der Diplomarbeit	9
5 Facetten der Energie.....	10
5.1 Energie – Geschichte, Erläuterungen und Definitionen ¹	10
5.2 Die Quelle jeglicher verfügbaren Energie auf der Erde ⁶	12
5.3 Die Energieumwandlungskette und ihre Komponenten ¹⁰	15
5.4 Technische Betrachtungsweise der Energieumwandlung	17
6 Die Schweizer Energiewirtschaft ¹²	19
6.1 Rückblick und heutiger Stand in der Schweiz.....	19
6.1.1 Frühe Industrialisierung und Nutzung von Wasserkraft (1800-1900)	19
6.1.2. Elektrifizierung und Ausbau der Wasserkraft (1900-1950)	20
6.1.3 Aufstieg der Kernenergie und des elektrischen Netzes (1950-2000)	20
6.1.4 Wachsendes Umweltbewusstsein und Fokus auf erneuerbare Energien (2000-heute)	20
6.2 Die Schweizer Energiebilanz ¹³	21
6.2.1 Veränderungen in der Energiequellenmix	21
6.2.2 Energieeffizienz und Nachhaltigkeit	21
6.2.3 Einführung neuer Technologien und Innovationen	21
6.2.4 Internationaler Austausch und Zusammenarbeit.....	22
Energiemix der Schweiz 2023.....	23
7. Energiebereitstellung im Kanton Bern	24
7.1 Das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) ¹⁴	24
7.1.1 Aufbau und Wirkungsweise Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor.....	26
7.2 Wasserkraft im Kanton Bern: Eine mächtige Energiequelle.....	29
7.2.1 Wasserkraftwerk Mühleberg ¹⁶	31
7.2.2 Aufbau und Funktion des Wasserkraftwerkes Mühleberg	33
7.2.3 Wasserkraftwerk Kandergrund ¹⁸	36
7.2.2 Aufbau und Funktion des Wasserkraftwerkes Kandergrund.....	37

7.3 Solarpark Mont Soleil.....	39
7.3.1 Aufbau und Funktion eines Solarpanels	41
7.4 Windpark Mont Crosi/Mont Soleil.....	43
7.4.1 Aufbau und Funktion einer Windkraftanlage ²⁵	45
8. Gegenüberstellung der Produktionsanlagen ²⁶	48
9. Ausblick in die Energieproduktion im Kanton Bern und die Frage» geht es auch ohne konventionelle Kraftwerke?«	55
10 Fazit und Schlussreflektion	57
11 Quellenverzeichnis	59
12 Eigenständigkeitserklärung	62

1 Management Summary

Diese Arbeit untersucht die Energieversorgung im Kanton Bern und analysiert die verschiedenen Produktionsanlagen, darunter Wasserkraftwerke, Atomkraftwerke, Windkraftanlagen und Solarkraftwerke. Ziel ist es, die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Energiequellen aus sozialer, ökologischer und wirtschaftlicher Perspektive zu bewerten und einen Ausblick auf die zukünftige Energieproduktion zu geben. Wasserkraft ist die wichtigste Energiequelle im Kanton Bern. Aufgrund der geografischen Gegebenheiten, insbesondere der Flüsse und Stauseen, spielt sie eine zentrale Rolle in der Stromerzeugung. Wasserkraftwerke bieten eine zuverlässige und emissionsarme Energiequelle. Dennoch sind die Umweltauswirkungen durch Dämme und die Beeinträchtigung von Ökosystemen nicht zu vernachlässigen. Moderne Technologien, wie Fischpässe, tragen zur Minimierung dieser Auswirkungen bei. Das Kernkraftwerk Mühleberg war historisch eine bedeutende Energiequelle in der Region. Mit dem beschlossenen Atomausstieg ist die Schweiz jedoch auf der Suche nach alternativen, nachhaltigen Energiequellen. Die Herausforderungen der Endlagerung radioaktiver Abfälle und das Risiko schwerer Unfälle belasten die gesellschaftliche Akzeptanz von Atomkraft erheblich. Der Windpark Mont Crosin ist ein bedeutendes Beispiel für die Nutzung von Windenergie im Kanton Bern. Windkraftanlagen bieten eine emissionsfreie Energiequelle, deren Nutzung jedoch stark von den Windverhältnissen abhängt. Herausforderungen wie Lärm und visuelle Beeinträchtigungen erfordern eine sorgfältige Planung und Kommunikation mit der Bevölkerung. Der Solarpark Mont Soleil und zahlreiche dezentrale Solaranlagen zeigen, dass Solarenergie zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die sinkenden Kosten und technologischen Fortschritte machen Solarenergie zu einer kostengünstigen und umweltfreundlichen Ergänzung des Energiemixes. Dennoch bleibt die Abhängigkeit von Sonneneinstrahlung eine Herausforderung, die durch innovative Speicherlösungen ausgeglichen werden muss. Die Arbeit betont die Notwendigkeit eines diversifizierten Energiemixes, der die spezifischen Vorteile der verschiedenen Energiequellen optimal nutzt. Eine Kombination aus Wasserkraft, Solar- und Windenergie sowie modernen Speichermöglichkeiten kann eine zuverlässige und nachhaltige Energieversorgung gewährleisten. Der Ausbau erneuerbarer Energien muss durch den Einsatz intelligenter Netzmanagementsysteme und Speicherkapazitäten ergänzt werden, um die Volatilität der Erzeugung auszugleichen.

Ein integrativer Ansatz, der technische Innovationen, politische Maßnahmen und die aktive Beteiligung der Bevölkerung kombiniert, ist entscheidend für den erfolgreichen Übergang zu einem nachhaltigen und sicheren Energiesystem im Kanton Bern. Dieser Ansatz wird nicht nur die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen reduzieren, sondern auch zur Erreichung der nationalen Klimaziele und zur Bekämpfung des Klimawandels beitragen.

2 Beruflicher Lebenslauf

Anschrift Matthias Meister
Neuhaus 79 K
3076 Worb

Geburtstag 24.10.1978

Telefon 079 716 49 79

E-Mail meister.matthias@gmx.ch

Beruflicher Werdegang: 06/2021- heute Betriebsingenieur ZLS Mühleberg
BKW Energie AG

11/2014- 06/2021 Netzelektriker, BKW Energie AG

01/2009-11/2014 Kundendienstmonteur,
KID-Haustechnik, Rotenburg an der Fulda

02/2008-12/2008 Elektroinstallateur, Schneider-Elektro,
Ringgau-Lüderbach

09/2000-01/2008- Elektroinstallateur,
Elektroanlagen Kynast, Dermbach

02/1999-08/2000 Elektroinstallateur, Elektro Happ,
Wiesenthal

Weiterbildungen:

10/2021-heute Dipl. Energie- und Umwelttechniker HF

Ausbildung

06/2018- 03/2021 Netzfachmann mir eidg. FA

09/1995-01/1999 Energieelektroniker-Anlagentechnik
Überlandwerk Rhön GmbH

3 Einleitung

Energie bildet seit Urzeiten das Fundament allen Lebens auf unserem Planeten, in zahlreichen Formen manifestiert sie sich und ist essenziell für das Fortbestehen unserer Welt. Die Menschheit hat im Laufe der Zeit gelernt, die verfügbaren Ressourcen zu nutzen und somit den technischen und wirtschaftlichen Fortschritt entscheidend geprägt. Elektrizität, als eine der hochwertigsten Energieformen, ist heute ein unverzichtbares Grundbedürfnis, das sämtliche Bereiche unseres täglichen Lebens durchdringt. Die wachsende Nachfrage nach elektrischer Energie spiegelt diese Entwicklung wider und erfordert eine kontinuierliche Anpassung und Erweiterung der Stromversorgung.

In den letzten Jahrzehnten hat sich ein deutlicher Wandel im Energiesektor vollzogen, bedingt durch die Nachteile konventioneller Kraftwerke, die auf der Verbrennung fossiler Brennstoffe basieren. Diese Nachteile, nämlich die CO₂-Emissionen und die Endlichkeit der fossilen Ressourcen, gewinnen zunehmend an Bedeutung. Daher wird verstärkt auf den Ausbau regenerativer Energiesysteme gesetzt, um die Abhängigkeit von konventionellen Energiequellen zu verringern.

Die Schweiz hat bereits eine deutliche Ausrichtung seiner Energieversorgung auf erneuerbare Varianten, insbesondere die Wasserkraft, vollzogen. Neben Wasserkraft spielen auch andere erneuerbare und konventionelle Energieträger eine Rolle im Schweizer Energiebereitstellungssystem. Diese Arbeit hat zum Ziel, den elektrischen Energiemix der Schweiz zu analysieren. Hierfür betrachten wir insbesondere das Kanton Bern. Wir werden die Energieversorgung des Kanton Bern von der Vergangenheit bis hin zum jetzigen Zeitpunkt betrachten. Weiterhin wagen wir den Ausblick in die Zukunft.

Nach einer Einführung in den Begriff der Energie und dessen Bedeutung folgt eine detaillierte Untersuchung der Stromversorgung des Kanton Bern. Dabei werden Aspekte wie die Entwicklung des Versorgungssystems, installierte Leistung und Bedarfsverhalten betrachtet. Anschließend werden die technischen Verfahren der relevanten Kraftwerke behandelt. Es wird ein Vergleich der Verschiedenen Energieträger unter sozialer, ökologischer und wirtschaftlicher Perspektive vorgenommen.

3.1 Ausgangslage

Energiestrategie 2050, Solarexpress und Strommangellage, dies sind die Schlagwörter der heutigen Zeit. Doch sind mit den Forderungen des Bundes auch neue Schwierigkeiten entstanden. Oftmals ist es so, dass die geplanten alpinen Solaranlagen weit entfernt von den Versorgungsleitungen sind. Dies bedeutet, ein Netzausbau, um die Solaranlagen an das Stromnetz zu bringen. Dieser Ausbau, welcher sich durch das Bewilligungsverfahren über mehrere Jahre, wenn nicht sogar Jahrzehnte hinziehen kann, bremst den Solarexpress aus. Aus diesem Grund möchte ich mit dieser Arbeit den gemischten Einsatz von regenerativen und konventionellen Energieträgern für die Bereitstellung von elektrischer Energie in der Schweiz, insbesondere im Kanton Bern, näher betrachten. Es wird neben der technischen Erläuterung der unterschiedlichen eingesetzten fossilen und erneuerbaren Versorgungssysteme auf die Energiewirtschaft im Kanton Bern eingegangen (in der Vergangenheit, aktuell und auch in der Zukunft). Anhand von ausgewählten Referenzkraftwerken (KKW Mühleberg, WKW Kandergrund, WKW Mühleberg, Windpark Mont-Soleil sowie den Solarpark Mont-Soleil) werden die einzelnen Energieträger unter sozialer, ökologischer und wirtschaftlicher Perspektive Gegenübergestellt.

3.2 Zielsetzung

Aufgrund von Geheimhaltungsvereinbarungen und laufenden Gerichtsverfahren ist es mir leider nicht möglich, detaillierte Daten zur Berechnung der Stromgestehungskosten zu verwenden. Daher musste ich den Fokus dieser Arbeit anpassen.

Ziel dieser Studie ist es, ein umfassendes und verständliches Bild von den verschiedenen elektrischen Produktionsanlagen der BKW Energie AG im Kanton Bern zu vermitteln. Mit dieser Studie wird dem Leser erfolgreich der Aufbau und die Funktionsweise der verschiedenen Versorgungssysteme aufgezeigt und ihm eine Gegenüberstellung dieser Versorgungssysteme dargeboten. All dies soll sowohl Fachleute als auch interessierte Laien in die Lage versetzen, den Aufbau und die Funktionsweise dieser Anlagen nachvollziehen zu können. Mit der Abgabe dieser Arbeit am 28.10.2024 biete ich dem Leser einen nachvollziehbaren und verständlichen Einblick in die Energieproduktion der BKW Energie AG im Kanton Bern. Die Gegenüberstellung der einzelnen Produktionsanlagen zeigt hierbei dem Leser die Vor- und Nachteile dieser unterschiedlichen Anlagen detailliert auf.

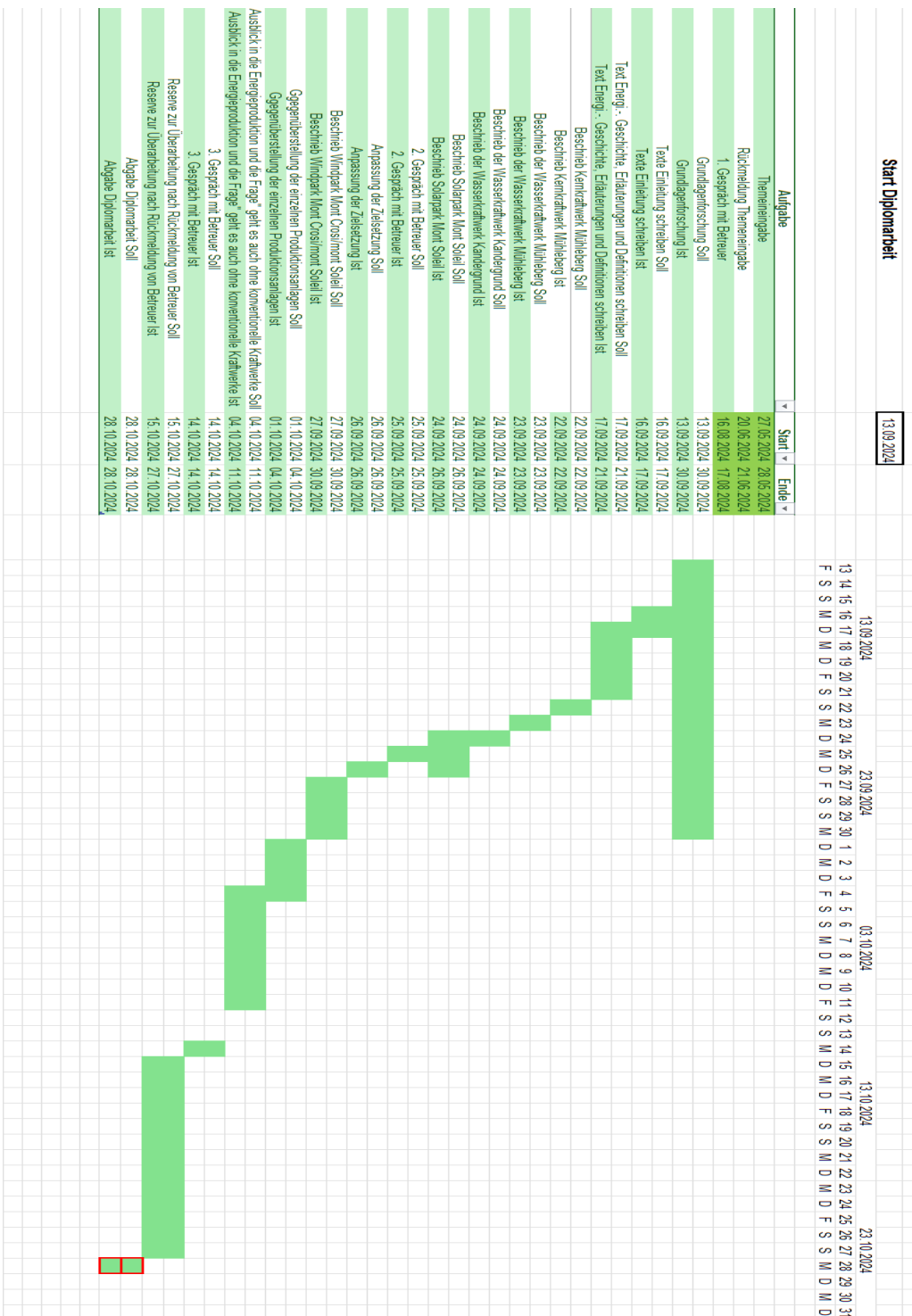
3.3 Vorgehen

Damit der Leser meinen Gedanken zu dieser Studie versteht, beginne ich mit den Grundlagen der Energie. Hier zeige ich die Geschichte der Energie auf und gehe auf Erläuterungen und Definitionen der Energie ein. Es werden die Herleitung der Begriffe erneuerbare bzw. regenerative und nicht erneuerbare, fossile bzw. konventionellen Energieträgern erklärt. Auch werden hier die verschiedenen Energieformen betrachtet, sowie deren Umwandlung und die damit verbundenen Verluste.

Die Geschichte der Energie in der Schweiz wird uns wertvolle Informationen von 1900 bis heute geben. Die Energiebilanz der Schweiz gibt uns sodann Auskunft über den Energiebedarf des Landes und bestätigt somit die Geschichte der Energie in der Schweiz. Dabei wird uns besonders das Kanton Bern interessieren. Wir werden die uns die Energiegewinnung im Kanton Bern genauer anschauen. Hierfür machen wir eine Reise von der Vergangenheit über die Gegenwart und wagen einen Ausblick in die Zukunft. Es werden die verschiedenen Kraftwerkstypen erklärt, die maßgeblich zur Erzeugung elektrischer Energie im Kanton Bern beigetragen haben, aktuell beigetragen und in Zukunft beigetragen werden. Anhand von ausgesuchten Referenzkraftwerken werden der Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Kraftwerkstypen erklärt. Die Kraftwerke werden anschliessend miteinander verglichen. Mit diesem Vergleich und den gesetzlichen Vorgaben wagen wir einen Ausblick der Stromproduktion der Zukunft. Abschliessend möchte ich noch die Frage, ob es ohne konventionelle Kraftwerke geht, beantworten.

4 Zeitplan der Diplomarbeit

Hier findet man den von mir erstellten Zeitplan der Diplomarbeit. Ich konnte die von mir definierten Zeitziele vollständig einhalten.



5 Facetten der Energie

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur umgewandelt werden. Basierend auf dieser Tatsache, wird in den nachfolgenden Kapiteln der Begriff Energie und seine Facetten näher erläutert.

5.1 Energie – Geschichte, Erläuterungen und Definitionen¹

Energie lässt sich aus verschiedenen Blickwinkeln definieren, wobei die physikalische Interpretation als eine der grundlegendsten und aussagekräftigsten gilt. Sie umschreibt Energie als die Fähigkeit eines Materials oder Systems, Arbeit zu leisten oder Wärme zu übertragen. Dies findet seine Wurzeln im griechischen Wort *Energieia*, was übersetzt „aktive Kraft“ oder „Wirksamkeit“ bedeutet. Die Messung von Energie erfolgt in der Einheit Joule [J], benannt nach dem englischen Physiker James Prescott Joule. Joule trug wesentlich zur Erforschung der Energieumwandlung bei und demonstrierte um 1843 durch Experimente, dass die Umwandlung von mechanischer oder elektrischer Energie in Wärme immer konsistente Werte ergibt. Er entdeckte, dass die Umwandlung von Arbeit in Wärme ein konstantes Verhältnis aufweist – bekannt als das Wärmeäquivalent.^{2,3}

Diese Entdeckung bildete die Grundlage für das heutige Verständnis der Umwandlung von Arbeit in Wärme und verifizierte die Annahme, dass Wärme eine Energieform ist, anstatt eines speziellen Materiezustandes. Aufbauend auf dieser Einsicht, formulierte Herman von Helmholtz im Jahr 1847 das Prinzip der Energieerhaltung, das heute als erster Hauptsatz der Thermodynamik bekannt ist. Dieser besagt, dass in einem isolierten System die Gesamtenergie konstant bleibt und lediglich zwischen verschiedenen Energieformen umgewandelt werden kann.⁴ Diese Überlegungen führten zur Idee, dass thermische Energie auch in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt werden kann, was die Basis für den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik darstellte.

¹ Vgl. Kaltschmitt; Streicher (2009)

² Vgl. Doering; Dehli; Schedwill (2012)

³ Vgl. Bergmann; Schaefer (1998)

⁴ Vgl. Doering; Dehli; Schedwill (2012)

Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Formulierungen zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik dargelegt, wobei die älteste von Rudolf Julius Emanuel Clausius stammt. Clausius formulierte 1850 die These: „Wärme kann nie von selbst von einem System niedrigerer Temperatur auf ein System höherer Temperatur übergehen.“ Eine weitere Formulierung von Max Planck besagt: „Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu bauen, die weiter nichts bewirkt als das Heben einer Last und die Abkühlung eines Wärmereservoirs“, was die begrenzte Umwandelbarkeit von Wärme in Arbeit beschreibt. Hans Dieter Baehr interpretierte den zweiten Hauptsatz mit: „Alle natürlichen und technischen Prozesse sind irreversibel“, was auf die Unumkehrbarkeit von Energieumwandlungen und die Energieentwertung durch Reibung abzielt.⁵

Die Kernbotschaft jeder dieser Formulierungen ist, dass alle Prozesse der Energieumwandlung in der Natur und Technik, insbesondere die Übertragung von Wärme in Arbeit, mit Verlusten durch Reibung oder Ausgleich behaftet sind. Ein Wirkungsgrad von größer oder gleich 1 ist daher bei solchen Umwandlungen nicht möglich. Insbesondere die Aussage der Irreversibilität von Baehr trägt zum Verständnis der Hauptsätze der Thermodynamik bei. Betrachtet man beispielsweise eine Kugel aus Knetmasse, die in einem abgeschlossenen System von einer Höhe auf eine ebene Fläche fällt, wird die potenzielle Lageenergie der Kugel in kinetische Energie umgewandelt. Bei dem Aufprall auf die Fläche erhöht sich die Temperatur der Knetmasse aufgrund von Reibungswärme, die dann an die Umgebung abgegeben wird, bis sich ein konstantes, höheres Temperaturniveau eingestellt hat. Die Lageenergie der Kugel wurde somit in Wärme umgewandelt. Gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik bleibt die Gesamtenergie innerhalb des Systems unverändert, sie liegt lediglich in einer anderen Form vor. Wenn Energieumwandlungsprozesse reversibel wären, würde sich die verformte Knetmasse unter Abzug der Umgebungswärme wieder zu einer Kugel formen und ihren Ursprungszustand einnehmen. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist dies jedoch nicht möglich, da eine sogenannte Energieentwertung, nämlich eine Erhöhung der Entropie, stattgefunden hat. Der Begriff Entropie, der heute in vielen Anwendungsgebieten verwendet wird, stammt ursprünglich aus der Wärmelehre und wurde von Rudolf Clausius bei der Definition des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik erstmals herangezogen. Dieser Hauptsatz wird daher auch als Entropiesatz bezeichnet. Die Idee hinter der Entropie besteht darin, dass in einem abgeschlossenen System die Energiebilanz zwar konstant bleibt, aber die vorhandenen Energieformen sich nicht beliebig in andere umwandeln lassen. Es existiert eine Wertigkeit von Energie, die mit ihrer Fähigkeit zur Umwandlung in andere Formen zusammenhängt, die durch die Entropie beschrieben wird. Entropie entsteht bei jeder Umwandlung und kann zwar erzeugt, aber nicht vernichtet werden. Daher können Energiesysteme mit niedriger Entropie (z. B. kinetische oder elektrische Energie) effizienter in andere Energieträger umgewandelt werden als Systeme mit höherer Entropie (z. B. Wärme).

⁵ Vgl. Cerbe; Wilhelms (2013)

Es ist wichtig zu beachten, dass in der Praxis sowie auch innerhalb dieser Arbeit oft von der Erzeugung und dem Verbrauch von Energie oder von Verlusten infolge von Umwandlungs- oder Verteilungsprozessen die Rede ist. Es sollte jedoch betont werden, dass gemäß den Hauptsätzen der Thermodynamik unter diesen Begriffen nicht die Schaffung oder Vernichtung von Energie zu verstehen ist, sondern vielmehr das Erhalten von Energie in einer Form, die für den eigentlichen Gebrauch entweder nutzbar oder nicht mehr nutzbar ist.

5.2 Die Quelle jeglicher verfügbaren Energie auf der Erde⁶

Die verfügbare Energie auf der Erde lässt sich darauf zurückführen, dass gemäß den Hauptsätzen der Thermodynamik Energie nicht erzeugt oder vernichtet wird, sondern nur umgewandelt werden kann. Diese Energie existiert bereits in verschiedenen Formen auf der Erde, die im Wesentlichen auf drei Urformen zurückzuführen sind: die Bewegung und Gravitation zwischen Erde, Sonne und Mond, die Kernenergie durch Spaltung und Fusion sowie die Einstrahlung der Sonne.⁷ Der größte Anteil aller irdischen Primärenergie, nämlich 99,9%, stammt von der Sonne. Diese Erklärung bezieht sich nicht nur auf die momentan technisch nutzbare Sonneneinstrahlung, sondern auf die Gesamtheit der solaren Energieversorgung. Seit etwa 4,6 Milliarden Jahren⁸ wirkt die Sonne mit einer mittleren Strahlungsleistung von rund 1.362 W/m^2 auf die Erde ein, bekannt als Solarkonstante. Diese Strahlung ist maßgeblich für die Existenz von organischen Materialien wie Kohlenwasserstoffen, aus denen unter anderem fossile Brennstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle entstanden sind. Um den Zusammenhang zwischen Sonnenenergie und fossilen Brennstoffen zu verstehen, muss man die Entstehung dieser Rohstoffe betrachten. Kohle beispielsweise basiert auf abgestorbenem pflanzlichem Material, das durch mikrobiologische und chemische Prozesse zu Torf umgewandelt wurde. Dieser Torf wurde im Laufe von Millionen Jahren unter Luftabschluss, hohen Temperaturen und Druck in die Erdkruste eingebettet, wodurch er schließlich zu Braunkohle und später zu Steinkohle wurde. Ähnliche Prozesse führten zur Bildung von Erdöl und Erdgas, wobei das Ausgangsmaterial aus abgestorbenem Meereskleinstlebewesen, wie Mikroplankton, stammt. Wenn man die Ursprungsformen der Primärenergieträger betrachtet, wird deutlich, dass ihre Entstehung und Vermehrung ausschließlich auf den bereits auf der Erde vorhandenen Elementen wie Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff sowie auf der solaren Energieversorgung in Form von Licht und Wärme zurückzuführen sind.⁹ Neben den als endlich betrachteten fossilen Energieträgern ist die Sonne auch der Ursprung vieler weiterer erneuerbarer Energieressourcen.

⁶ Vgl. Kaltschmitt; Streicher (2009)

⁷ Vgl. Crastan (2009)

⁸ Vgl. Willmann; Egil-Broz (2010)

⁹ Vgl. Gerthsen (2008)

Die kinetische Energie des Windes und der Wasserkreislauf, der sich durch die solare Strahlung erwärmt und Verdunstung sowie Niederschlag verursacht, sind auf die solare Energieversorgung zurückzuführen. Auch die verfügbare Biomasse, eine Vorstufe von Kohle, basiert auf der Energieversorgung durch die Sonne. Ein weiterer Anteil der verfügbaren irdischen Energiequellen stammt vom Zerfall radioaktiven Materials. Radioaktive Stoffe wie Uran oder Thorium geben bei ihrem natürlichen Zerfall ihre gespeicherte Energie durch Strahlung und Wärme ab. Diese atomare Spaltung äußert sich größtenteils durch die Wärme aus dem Erdinneren. Die Kernenergie kann sowohl als erneuerbarer als auch als konventioneller Energieträger betrachtet werden, je nachdem, ob sie durch natürlichen Zerfall oder kontrollierte Kernspaltung gewonnen wird. Zusätzlich zur Solarenergie und Kernenergie spielt auch die Energie aus der Planetenbewegung und -gravitation eine Rolle, die sich in Form von Gezeiten manifestiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen können die verfügbaren Energien in erneuerbare bzw. regenerative und nicht erneuerbare, fossile Formen eingeteilt werden. Regenerative Energieressourcen gelten als unerschöpflich, da sie direkt oder indirekt von der Sonne gespeist werden, während fossile Energieträger als endlich betrachtet werden, da ihre Regeneration einen sehr langen Zeitraum erfordert. Die verfügbaren Primärenergiequellen werden in Abbildung 1 ihren jeweiligen Erscheinungsformen gegenübergestellt.

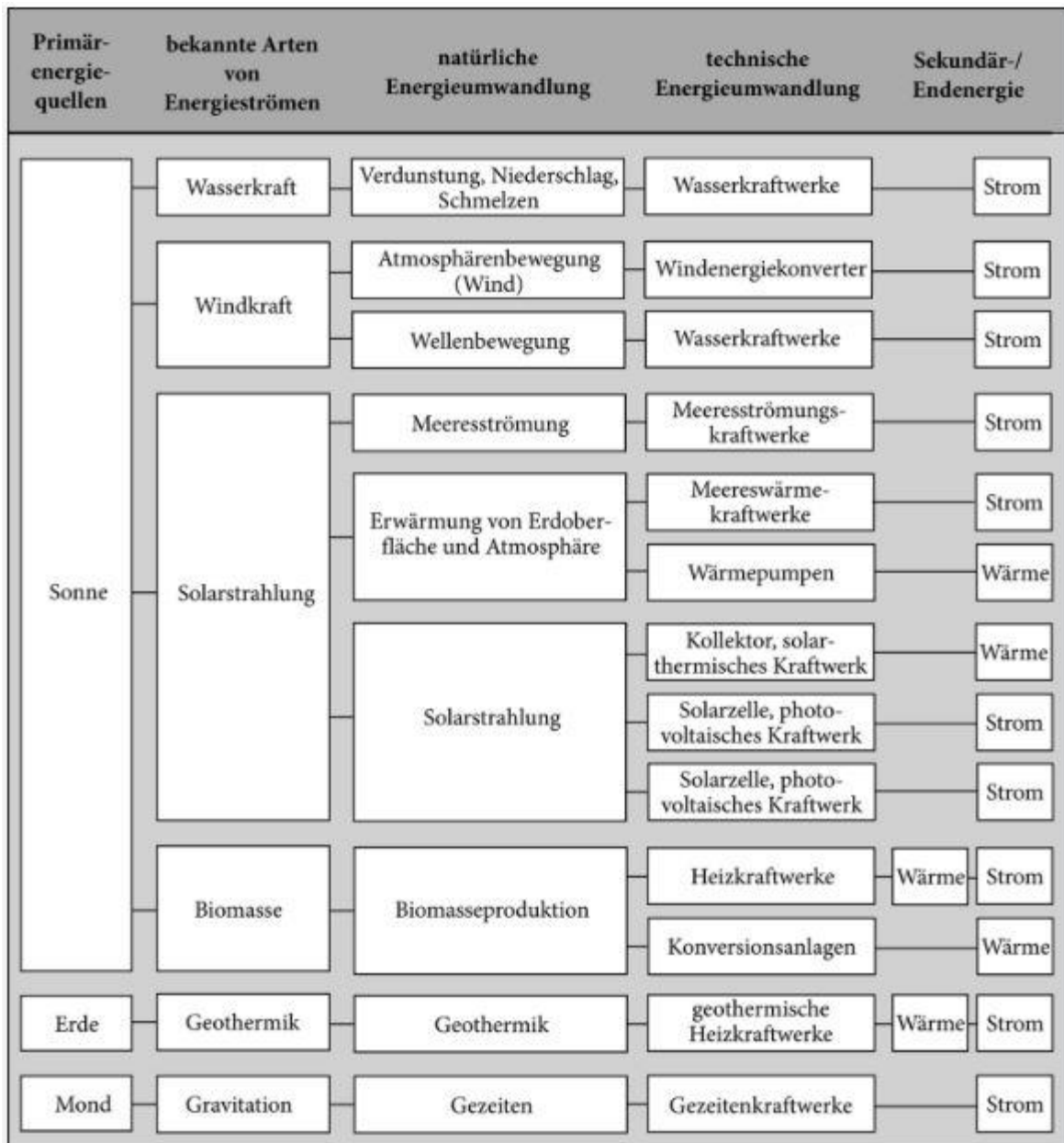


Abbildung 1 Primärenergiequellen und ihre Erscheinungsformen; Quelle: Buch Elektrische Energietechnik – Richard Marenbach, Johann Jäger, Dieter Nelles

5.3 Die Energieumwandlungskette und ihre Komponenten¹⁰

Die vorhandenen Primärenergien sind jedoch in ihrer natürlichen Form für den Endverbraucher kaum direkt nutzbar. Um sie effektiv zu nutzen, müssen sie durch verschiedene Umwandlungsverfahren in andere Energieformen überführt werden, die den jeweiligen Endenergiebedarf abdecken können. Um den Verlauf dieser Energieströme und die Umwandlung der verfügbaren Ressourcen in nutzbare Endenergie zu beschreiben, wird das Modell der Energieumwandlungskette verwendet. Die folgende Abbildung verdeutlicht die Umwandlungskette

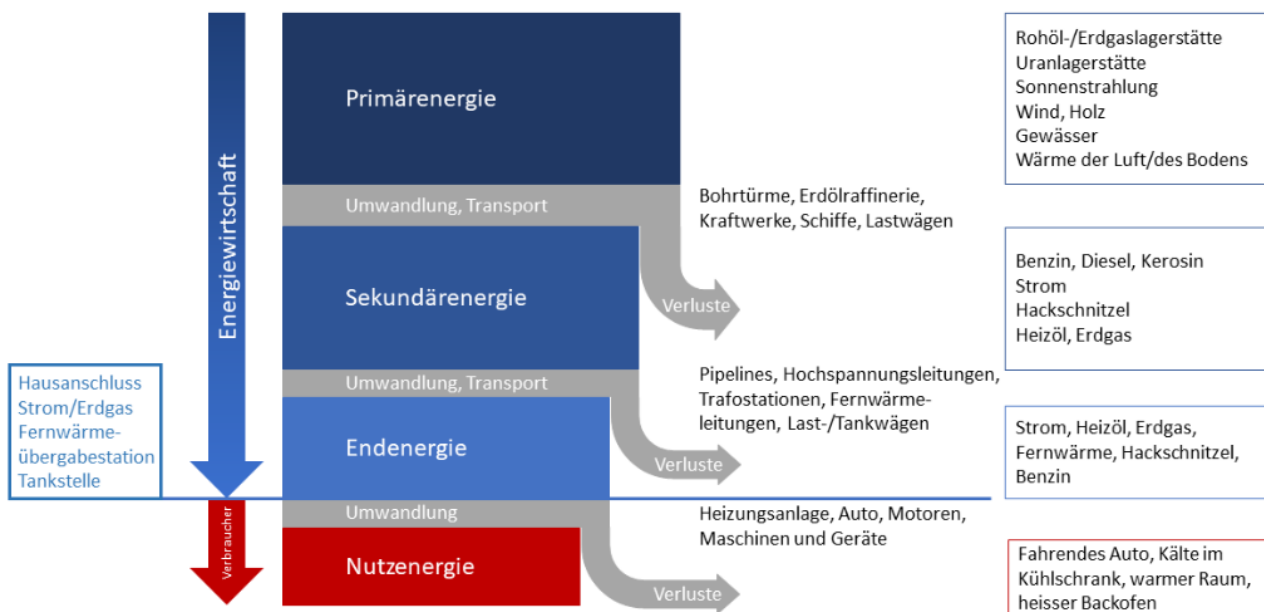


Abbildung 2 Umwandlungskette der Energieformen; Quelle: <https://www.energiepfad.ch/wiki/nutzenergie> abgerufen 16.09.2024

Gemäß diesem Konzept erfolgt eine Unterteilung in Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie und Nutzenergie. Dabei repräsentiert jeder dieser Begriffe den Energiegehalt von Stoffen oder Systemen in Form von Energieträgern, die für den menschlichen Gebrauch verfügbar sind. Es wird deutlich gemacht, dass praktisch jede Umwandlung in weitere Energieformen mit Verlusten einhergeht, die den nutzbaren Energiegehalt reduzieren.

¹⁰ Vgl. Kaltschmitt; Streichr (2009)

Darüber hinaus berücksichtigt dieses Modell auch Verteilungs- und Transportverluste, den Eigenverbrauch der Umwandlungsanlagen und den nicht-energetischen Verbrauch. Unter nicht-energetischem Verbrauch versteht man den Einsatz von Primärenergieträgern zur Herstellung von Gütern, die nicht als Energie klassifiziert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Produktion von Kunststoff, für die unter anderem Erdöl benötigt wird, oder Kohle für die Stahlindustrie. Die relevanten Energieformen für den Endverbraucher sind die Endenergie und daraus resultierend die Nutzenergie. Zur Veranschaulichung dieses Konzepts dient die folgende Abbildung 3, die die verschiedenen Energieträger und ihre Umwandlungsstufen in der Praxis darstellt.

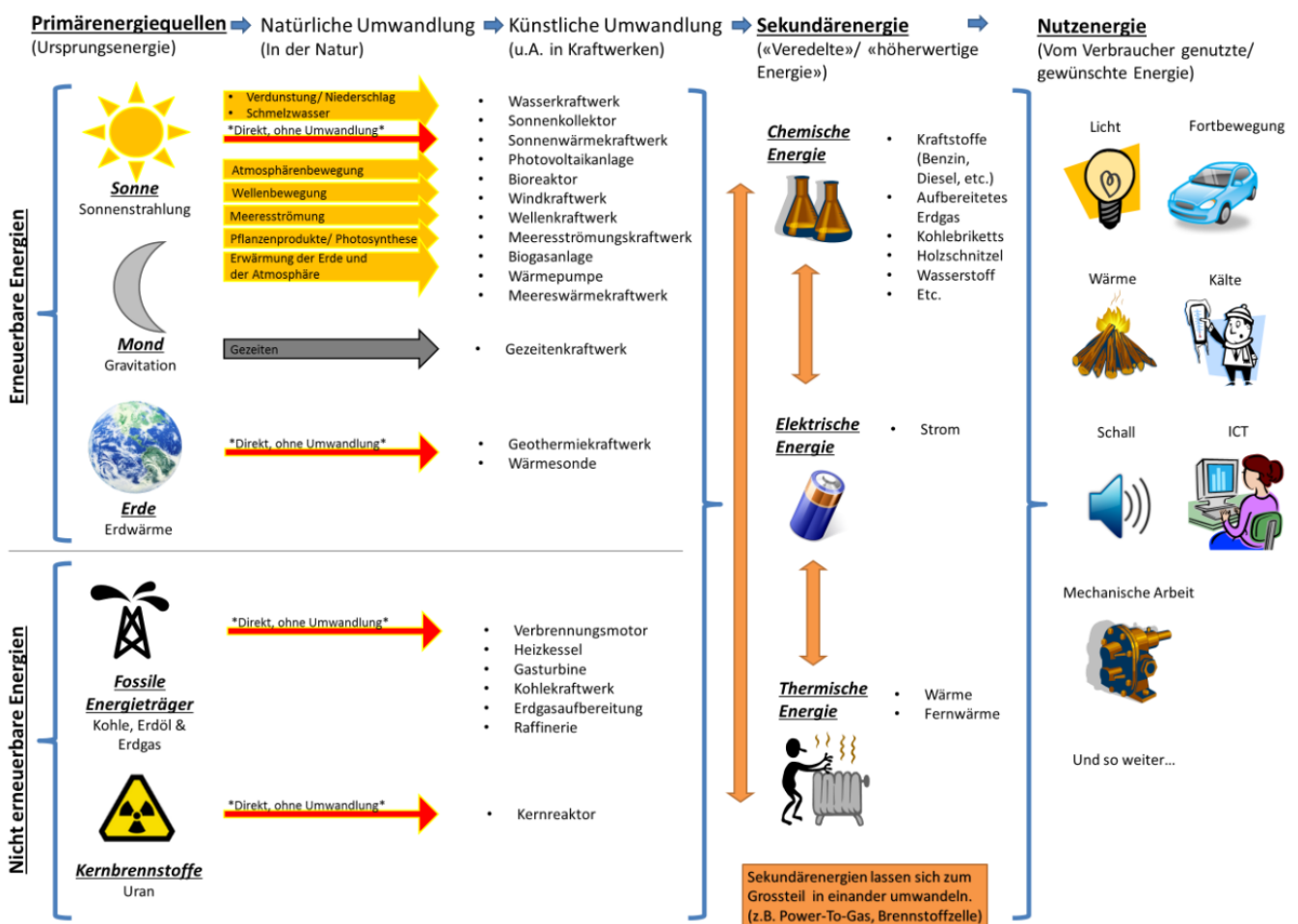


Abbildung 3 Energieformen nach Umwandlungsstufen und Anwendungen; Quelle: https://energieinfos.files.wordpress.com/2014/09/energie-umwandlungen_e-wandler.png abgerufen 16.09.2024

5.4 Technische Betrachtungsweise der Energieumwandlung

Die technische Betrachtungsweise der Energie besteht darin, dass in der Natur vorhandene Energiepotenzial zu erschließen, gegebenenfalls zu manipulieren und schließlich zur Durchführung nützlicher Arbeiten zu verwenden.¹¹ Es ist daher erst durch den Einsatz technischer Mittel möglich, die verfügbare Primärenergie bedarfsorientiert in Form von Endenergie dem Verbraucher zur Verfügung zu stellen. Dieser Prozess beginnt mit der Erschließung von Energiequellen, setzt sich bei den entsprechenden Umwandlungs- und Verteilungsprozessen fort und endet mit der Umwandlung in Nutzenergie zur Deckung des tatsächlichen Bedarfs des Endverbrauchers.

In der Technik werden grundsätzlich vier verschiedene Energieformen unterschieden, die in mechanische, elektrische, chemische und thermische Energie unterteilt werden können. Die Abbildung 4 lässt den Zusammenhang der Energien erkennen.

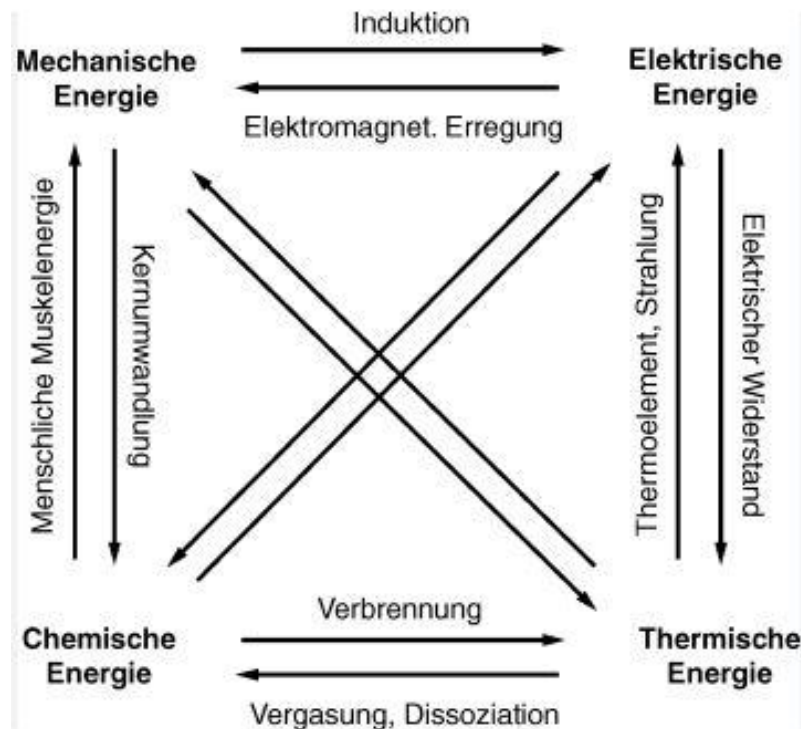


Abbildung 4 Zusammenhang der Energien; Quelle: Buch Energietechnik - Richard Zahoramsky

¹¹ Vgl. Erdmann; Zweifel (2010)

Die Umwandlung von Energie in verschiedene Formen kann sowohl direkt als auch indirekt erfolgen. Die Auswahl der technischen Verfahren hängt dabei von der Art der vorliegenden Energie und dem gewünschten Endprodukt ab.

Im Rahmen dieser Studie soll ein tiefergehendes Verständnis der Produktionsmethoden in den Anlagen der BKW Energie AG im Kanton Bern erlangt werden.

Um eine möglichst effiziente Energieumwandlung zu erreichen, ist es wichtig, den Umwandlungswirkungsgrad zu maximieren. Dieser variiert je nach Anwendung stark, und es wird kontinuierlich daran gearbeitet, durch technologische Verbesserungen eine höhere Effizienz zu erzielen.

6 Die Schweizer Energiewirtschaft ¹²

Die Schweizer Energiewirtschaft ist geprägt von einer vielfältigen Energiemischung und einem Fokus auf Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit. Zu den wichtigsten Energiequellen gehören Wasserkraft, Kernenergie, Erdgas und erneuerbare Energien wie Wind- und Solarenergie. Die Schweiz setzt verstärkt auf Energieeffizienz und den Ausbau erneuerbarer Energien, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und die Klimaziele zu erreichen.

Die Energiepolitik der Schweiz wird durch verschiedene gesetzliche Regelungen und Initiativen vorangetrieben, darunter das Energiegesetz und die Energiestrategie 2050. Diese zielen darauf ab, den Ausstieg aus der Kernenergie zu vollziehen, die erneuerbaren Energien auszubauen und die Energieeffizienz zu steigern.

Die Schweiz betreibt ein gut ausgebautes Stromnetz und ist bestrebt, die grenzüberschreitende Zusammenarbeit im Energiebereich zu fördern. Zudem engagiert sich das Land in internationalen Energieinitiativen und strebt eine nachhaltige Energieversorgung an, die sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte berücksichtigt.

6.1 Rückblick und heutiger Stand in der Schweiz

Die Entwicklung der Schweizer Energiewirtschaft seit 1800 ist eine faszinierende Reise durch verschiedene Zeitalter und technologische Fortschritte, die den Wandel in der Energieerzeugung und -nutzung widerspiegeln. Hier ist eine umfangreichere Zusammenfassung:

6.1.1 Frühe Industrialisierung und Nutzung von Wasserkraft (1800-1900)

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts war die Schweiz eine Agrargesellschaft. Mit dem Einsetzen der Industrialisierung im 19. Jahrhundert begann die verstärkte Nutzung von Wasserkraft als Hauptenergiequelle. Kleinere Wasserkraftanlagen entlang von Flüssen wurden gebaut, um mechanische Energie für Mühlen, Fabriken und andere Betriebe zu erzeugen. Dieser Zeitraum war geprägt von einem langsamen, aber stetigen Wachstum der industriellen Nutzung von Energie.

¹² Vgl. Energieregime in der Schweiz seit 1800; Bundesamt für Energie BFE

6.1.2. Elektrifizierung und Ausbau der Wasserkraft (1900-1950)

Im frühen 20. Jahrhundert begann die Elektrifizierung in den Städten und größeren Industrieanlagen. Die Wasserkraft spielte weiterhin eine entscheidende Rolle, wobei größere Wasserkraftwerke gebaut wurden, um auch elektrische Energie zu erzeugen. Die Elektrifizierung der Schweiz war ein wichtiger Schritt in Richtung Modernisierung und technologischem Fortschritt.

6.1.3 Aufstieg der Kernenergie und des elektrischen Netzes (1950-2000)

In den 1950er Jahren begann die Schweiz mit dem Bau von Kernkraftwerken, um die steigende Nachfrage nach elektrischer Energie zu decken. Die Kernenergie wurde zu einer bedeutenden Säule der Stromerzeugung in der Schweiz. Gleichzeitig wurde das elektrische Netz ausgebaut, um eine zuverlässige und stabile Stromversorgung im ganzen Land zu gewährleisten. In dieser Zeit wurde auch verstärkt in die Forschung und Entwicklung im Energiesektor investiert.

6.1.4 Wachsendes Umweltbewusstsein und Fokus auf erneuerbare Energien (2000-heute)

Ab den 2000er Jahren begann die Schweiz, verstärkt auf eine nachhaltige Energieversorgung zu setzen. Das Bewusstsein für Umweltfragen und der Klimawandel führten zu einem Umdenken in der Energiepolitik. Die Diskussion über den Ausstieg aus der Kernenergie wurde angestoßen, und erneuerbare Energien erlangten an Bedeutung. Es wurden verstärkt Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umgesetzt, und die Nutzung erneuerbarer Energien wie Wind- und Solarenergie wurde ausgebaut. Mit dem Volksentscheid von 2017, hat die Schweizer Bevölkerung klar gegen den Bau neuer Kernkraftwerke gestimmt. Die Energiestrategie 2050 wurde eingeführt, um den Ausbau erneuerbarer Energien voranzutreiben und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern sowie den schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie einzuläuten. Die bestehenden Kernkraftwerke dürfen so lange betrieben werden, wie sie sicher sind, aber nicht ersetzt werden. Die Schweizer Energiewirtschaft hat sich im Laufe der Zeit von einer stark wasser- und nuklearbasierten zu einer diversifizierteren und nachhaltigeren Energieversorgung entwickelt. Heutzutage liegt ein besonderer Fokus auf erneuerbaren Energien, Energieeffizienz und der Reduzierung der Umweltauswirkungen.

6.2 Die Schweizer Energiebilanz¹³

Eine detaillierte Analyse der Schweizer Energiebilanz seit 1960 bis heute zeigt einen bemerkenswerten Wandel in der Energielandschaft des Landes. Hier sind einige wichtige Punkte zu berücksichtigen:

6.2.1 Veränderungen in der Energiequellenmix

In den 1960er Jahren dominierten Wasserkraft und Kernenergie die Energieerzeugung in der Schweiz. Wasserkraft war bereits eine etablierte Energiequelle, während die Kernenergie erst in den 1970er Jahren an Bedeutung gewann.

Mit der zunehmenden Sorge um Umwelt- und Sicherheitsfragen in den späten 20. Jahrhundert begann die Schweiz, ihren Energiemix zu diversifizieren und verstärkt erneuerbare Energien wie Wind- und Solarenergie zu erforschen und zu fördern.

Der Ausstieg aus der Kernenergie wurde beschlossen, und bis heute wird die Schweiz schrittweise ihre Kernkraftwerke abschalten.

6.2.2 Energieeffizienz und Nachhaltigkeit

Ein wesentlicher Schwerpunkt seit den 1990er Jahren liegt auf der Verbesserung der Energieeffizienz in allen Sektoren, einschließlich Industrie, Gebäude und Verkehr.

Programme zur Förderung der Energieeffizienz und zur Reduzierung des Energieverbrauchs wurden eingeführt und weiterentwickelt, um die Abhängigkeit von externen Energiequellen zu verringern und die Umweltauswirkungen zu minimieren.

6.2.3 Einführung neuer Technologien und Innovationen

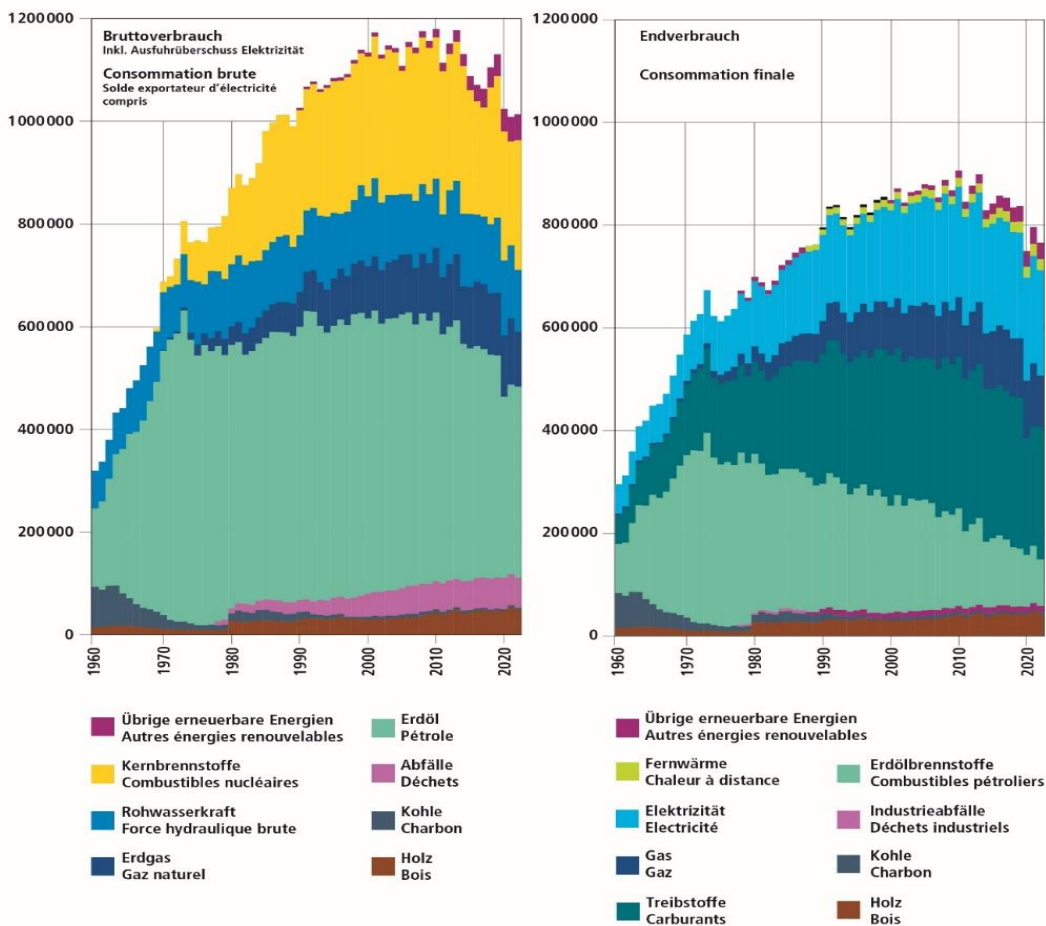
Die Schweiz hat in den letzten Jahrzehnten verstärkt in Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien und saubere Technologien investiert. Neue Technologien, wie verbesserte Solarenergieanlagen, effizientere Windturbinen und innovative Speichermethoden wurden entwickelt und implementiert, um die Energieproduktion zu optimieren und die Zuverlässigkeit des Energiesystems zu erhöhen.

¹³ Vgl. Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2022 Bundesamt für Energie BFE

6.2.4 Internationaler Austausch und Zusammenarbeit

Die Schweiz hat sich aktiv an internationalen Bemühungen zur Bekämpfung des Klimawandels und zur Förderung einer nachhaltigen Energieentwicklung beteiligt. Durch den Austausch von Best Practices und die Zusammenarbeit mit anderen Ländern hat die Schweiz ihre eigenen Strategien zur Energieversorgung verbessert und weiterentwickelt. Insgesamt zeigt die Analyse der Schweizer Energiebilanz seit 1960 bis heute einen deutlichen Wandel hin zu einer diversifizierten, nachhaltigen und effizienten Energieversorgung, der durch eine Kombination aus politischen Entscheidungen, technologischen Innovationen und internationaler Zusammenarbeit vorangetrieben wurde. Ein Blick auf den Energieverbrauch der Schweiz und dessen Zusammensetzung zeigt den Wandel und die Veränderung im Energiequellenmix.

Fig. 4 Energieverbrauch 1960–2022 in TJ
Consommation d'énergie 1960–2022 en TJ



BFE, Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2022 (Fig. 4)
OFEN, Statistique globale suisse de l'énergie 2022 (fig. 4)

Abbildung 5 Energieverbrauch der Schweiz 1960 bis 2022; Quelle: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2022 Bundesamt für Energie

Energiemix der Schweiz 2023

Die Wasserkraft bildet das Rückgrat der Schweizer Stromversorgung. Gemeinsam mit der Kernenergie und weiteren erneuerbaren Energiequellen sorgt sie aktuell für eine sehr CO₂-arme Stromproduktion, die maßgeblich zum Erreichen der Klimaziele beiträgt. Mit der schrittweisen Abschaltung der Kernkraftwerke werden künftig neben der Wasserkraft vor allem Solar- und Windenergie sowie thermische Energie eine zentrale Rolle in der Stromproduktion übernehmen.

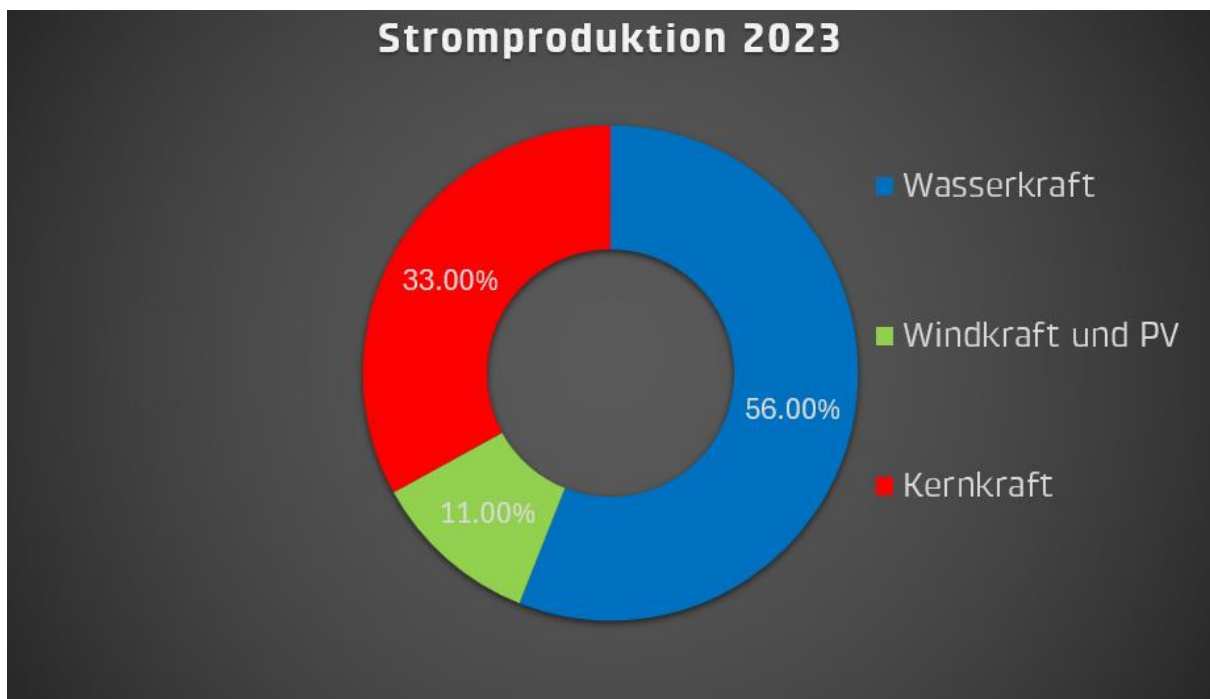


Abbildung 6 Strommix Schweiz 2023; Quelle: eigene Grafik (Daten von: <https://www.strom.ch/de/wissen/stromproduktion-stromkennzeichnung> abgerufen 16.10.2024)

7. Energiebereitstellung im Kanton Bern

Der Kanton Bern ist ein wichtiger Akteur im Bereich der elektrischen Energie in der Schweiz. In Bezug auf die Stromversorgung setzt er stark auf erneuerbare Energiequellen, wobei die Wasserkraft eine zentrale Rolle spielt. Heute wird im Kanton Bern Strom nicht nur aus Wasserkraft, sondern auch aus anderen erneuerbaren Energiequellen wie Solarenergie und Windenergie erzeugt. Dies war nicht immer so. Das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM) war ein bedeutsamer Meilenstein in der Schweizer Energiegeschichte. Es versorgte über Jahrzehnte einen Teil der Schweiz mit Strom, bevor es im Dezember 2019 endgültig abgeschaltet wurde. Das KKM wurde mit seiner Inbetriebnahme 1972 ein wichtiger Player in puncto Stromgewinnung. Das KKM hat die Schweizer Stromversorgung über Jahrzehnte mitgeprägt. Es bot eine sichere und zuverlässige Energiequelle, trug zur Versorgungssicherheit bei und ermöglichte eine hohe Lebensqualität. Mit der Stilllegung des Kernkraftwerk Mühleberg ist ein Kapitel der Schweizer Energiegeschichte abgeschlossen.

Der Kanton Bern spielt auf nationaler Ebene eine wichtige Rolle in der Elektrizitätsversorgung. Mit seiner starken Wasserkraftnutzung trägt er zur Produktion erneuerbarer Energien in der Schweiz bei und ist ein wesentlich wichtiger Lieferant für den schweizweiten Strommarkt.

7.1 Das Kernkraftwerk Mühleberg (KKM)¹⁴

Das KKM liegt am Ufer der Aare, rund 14 km westlich von Bern. Es wurde 1972 in Betrieb genommen und war bis 2019 am Netz. Im Jahr 1964 beauftragte die Bernische Kraftwerke AG das US-amerikanische Ingenieurbüro Bechtel mit der Planung eines neuen Kernkraftwerks. Ziel war es, ein bewährtes Reaktormodell aus den USA zu übernehmen, um technische Risiken zu minimieren und die Inbetriebnahme zu beschleunigen.

Die Entscheidung für einen amerikanischen Reaktor fiel, da die Entwicklung des Schweizer Reaktormodells, das im Kernkraftwerk Lucens zum Einsatz kam, zu diesem Zeitpunkt noch nicht für einen kommerziellen Betrieb reif erschien. Die Bernische Kraftwerke AG legte dabei fest, dass entweder ein Druckwasserreaktor von Westinghouse oder ein Siedewasserreaktor von General Electric installiert werden sollte. Beide Reaktortypen sollten in der Lage sein, einen einzelnen Turbogenerator mit einer Leistung von 250 Megawatt anzutreiben.

¹⁴ Vgl. [https://de.nucleopedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Mühleberg#Fernwärme_Mühleberg_-_Bern_\(FEMBE\)](https://de.nucleopedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Mühleberg#Fernwärme_Mühleberg_-_Bern_(FEMBE)) abgerufen 17.09.2024

Die Wahl fiel auf den Siedewasserreaktor von General Electric. Der Siedewasserreaktor des KKM hatte eine Leistung von gesamt 373 Megawatt (MW) bestehend aus 2 Turbogeneratoren. Das Kernkraftwerk Mühleberg war ursprünglich als Ergänzung zur bestehenden Wasserkraft konzipiert.

Die Wahl von zwei Turbinen sollte eine flexible Anpassung an den saisonalen Strombedarf ermöglichen.

Im energieintensiven Winter sollte das Kernkraftwerk die Grundlast decken, während im wasserreichen Sommer die Wasserkraftwerke einen Großteil der Stromerzeugung übernehmen sollten.

Trotz dieser Planung ergaben die Kalkulationen, dass die Stromerzeugungskosten des Kernkraftwerks so niedrig waren, dass es sich wirtschaftlicher als Grundlastzeuger eignete. Die Wasserkraft, die von Naturkräften abhängig ist, wurde als weniger zuverlässig und kostengünstiger eingestuft.

Am 8. März 1971 erreichte der Reaktor erstmals einen kritischen Zustand. Nach erfolgreichen Probetriebsphasen, die auch für den Hersteller General Electric von großem Interesse waren, erhielt das Kernkraftwerk am 13. Mai 1971 die Genehmigung zum Netzanschluss.

Das Kernkraftwerk Mühleberg war für General Electric ein besonderes Projekt, da es sowohl eine höhere Leistungsdichte als auch eine zweifache Turbinenanordnung aufwies. Diese Konfiguration sollte eine größere Flexibilität im Betrieb ermöglichen und schnelle Anpassungen an eine schwankende Stromnachfragen erlauben. Allerdings war diese Kombination von Faktoren weltweit einzigartig und erforderte umfangreiche Tests und Überprüfungen.



Abbildung 7 Kernkraftwerk Mühleberg; Quelle BKW Energie AG

7.1.1 Aufbau und Wirkungsweise Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor

Die Funktionsweise eines Siedewasserreaktors (SWR) beruht auf dem Prinzip der Kernspaltung und der anschließenden Umwandlung der dabei freiwerdenden Wärmeenergie in elektrische Energie. Im Kern eines SWRs findet eine Kettenreaktion statt, bei der Atomkerne gespalten werden. Die dabei freigesetzte Energie erhitzt das Wasser im Reaktorkern so stark, dass es verdampft. Der entstehende Dampf treibt eine Turbine an, die wiederum einen Generator antreibt, welcher die mechanische Energie in elektrische Energie umwandelt.

Aufbau eines Siedewasserreaktors (SWR)

Ein SWR besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

Reaktorkern:

Hier befinden sich die Brennstäbe, die das spaltbare Material enthalten. Das Wasser im Reaktorkern dient sowohl als Kühlmittel als auch als Moderator.

Reaktordruckbehälter:

Dieser Behälter umschließt den Reaktorkern und hält den hohen Druck aufrecht, der für den Siedevorgang des Wassers notwendig ist.

Dampfturbine:

Die Turbine wird vom Dampf aus dem Reaktorkern angetrieben und setzt sich in Rotation.

Generator:

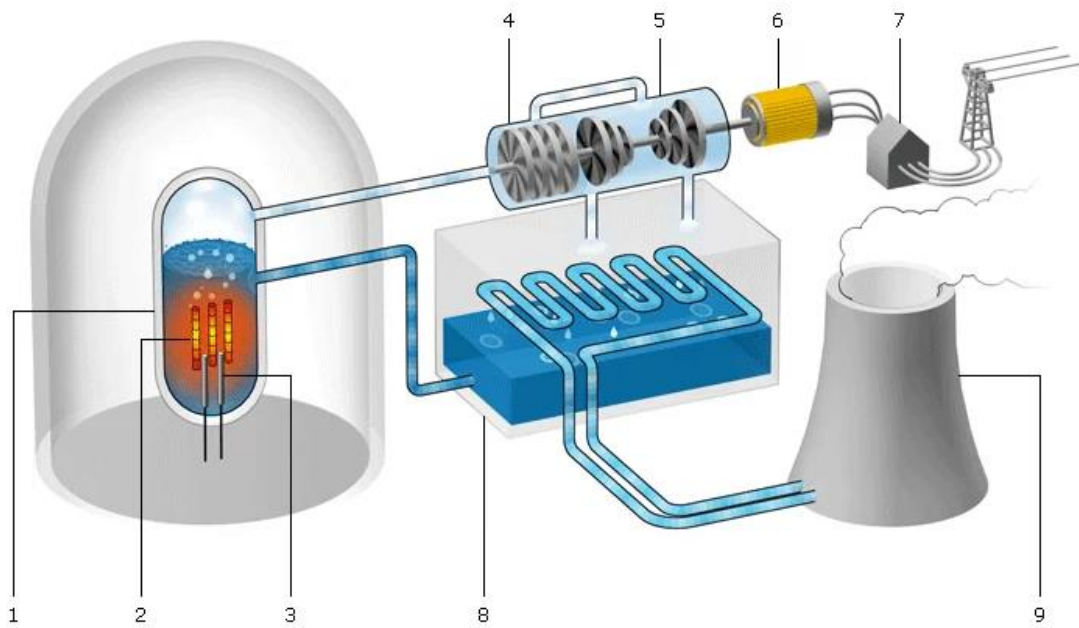
Der an die Turbine gekoppelte Generator wandelt die mechanische Energie in elektrische Energie um.

Kondensator:

Hier wird der aus der Turbine austretende Dampf abgekühlt und kondensiert wieder zu Wasser.

Speisewasserpumpe:

Die Kondensatpumpe fördert das Wasser zurück in den Reaktorkern.



1. Reaktordruckbehälter
2. Brennelemente
3. Steuerstäbe
4. Hochdruckturbine
5. Niederdruckturbine
6. Generator
7. Transformator
8. Kondensator
9. Kühlvorrichtung (Kühlturm oder Flusswasser)

Abbildung 8 Aufbau Siedewasserreaktor, Quelle: <https://www.ensi.ch/de/druckwasserreaktor-und-siedewasserreaktor-stark-vereinfacht/> abgerufen 17.09.2024

Im Siedewasserreaktor dient das Wasser sowohl als Kühlmittel als auch als Arbeitsmedium. Es wird im Reaktorkern erhitzt, verdampft und treibt direkt die Turbine an. Dieser direkte Dampfkreislauf führt dazu, dass auch Komponenten außerhalb des Reaktors einer geringen radioaktiven Belastung ausgesetzt sind. In der Schweiz wurden die Kernkraftwerke Mühleberg und Leibstadt mit dieser Technologie betrieben.¹⁵

¹⁵ Vgl. <https://www.ensi.ch/de/druckwasserreaktor-und-siedewasserreaktor-stark-vereinfacht/> abgerufen 17.09.2024

7.2 Wasserkraft im Kanton Bern: Eine mächtige Energiequelle

Der Kanton Bern, mit seinen zahlreichen Flüssen und Seen, bietet ein enormes Potenzial für die Erzeugung von Wasserkraft. Diese erneuerbare Energiequelle hat die Region seit Jahrhunderten geprägt und spielt auch heute noch eine wichtige Rolle in der Energieversorgung. Die Wasserkraft wurde im Kanton Bern schon früh genutzt, vor allem für die Betreibung von Mühlen und Sägen. Mit der Industrialisierung gewann sie an Bedeutung und trieb immer mehr Maschinen an. Die ersten größeren Wasserkraftwerke entstanden im 19. Jahrhundert und lieferten Strom für die wachsende Bevölkerung und Industrie. Die Alpen mit ihren hohen Berge sind die Quelle zahlreicher Flüsse, die mit großer Kraft ins Tal stürzen. Diese Kraft wird mit Hilfe von Wasserkraftwerken in elektrische Energie umgewandelt. Die großen Seen wie der Thunersee und der Brienersee dienen als Wasserspeicher und ermöglichen eine geregelte Stromproduktion. Die Aare, die Emme und viele kleinere Flüsse bieten zahlreiche Standorte für Wasserkraftwerke. Besonders entlang der Aare liegen viele Wasserkraftwerke.



Abbildung 9 Wasserkraftwerke entlang der Aare; Quelle: <https://www.bernerzeitung.ch/so-stark-nutzt-die-bkw-die-energie-der-aare-23539690053>

Durch das viele Wasser der Aare und den Seen als natürlicher Wasserspeicher kann das enorme Potential des Wassers entlang gut ausgeschöpft werden.



Abbildung 10 Wasserkraftwerke entlang der Aare mit Produktionsdaten; Quelle: <https://www.bernerzeitung.ch/so-stark-nutzt-die-bkw-die-energie-der-aare-235396900539>

7.2.1 Wasserkraftwerk Mühleberg¹⁶

Während Europa in den Schützengräben des Ersten Weltkriegs versank und die Welt von Tod und Zerstörung geprägt war, entstand im beschaulichen Westen Berns etwas Neues: das Wasserkraftwerk Mühleberg. Im Jahr 1920 nahm dieses imposante Bauwerk den Betrieb auf und markierte den Aufbruch in eine neue Ära der Elektrifizierung.

Die Idee, die Wasserkraft der Aare zu nutzen, war nicht neu. Doch erst der Krieg, der die Kohle- und Ölvorkommen Europas dezimierte, verlieh diesem Projekt eine neue Dringlichkeit. Elektrizität galt als die Energie der Zukunft, als Symbol für Fortschritt und Wohlstand. Die Bernischen Kraftwerke, unter der Leitung des visionären Eduard Will, erkannten das Potenzial und setzten alles daran, dieses ehrgeizige Projekt zu realisieren. Durch den Bau eines 35 Meter hohen Staudamms entstand der 15 Kilometer lange Wohlensee, der nicht nur als Wasserspeicher für das Kraftwerk diente, sondern auch die Landschaft nachhaltig veränderte. Die Menschen in der Region waren fasziniert von diesem gewaltigen Bauwerk und den unendlichen Möglichkeiten, die die Elektrizität eröffnete.

Doch der Bau des Kraftwerks war auch mit Herausforderungen verbunden. Die Arbeiter schufteten unter schwierigen Bedingungen, um dieses technische Wunderwerk zu errichten. Die Auswirkungen auf die Umwelt wurden damals noch nicht so intensiv diskutiert wie heute.

Das Wasserkraftwerk Mühleberg ist ein Zeugnis des menschlichen Schaffensvermögens und ein Symbol für den technischen Fortschritt des frühen 20. Jahrhunderts. Bis heute versorgt es die Region mit sauberer Energie und erinnert uns daran, wie wichtig es ist, unsere natürlichen Ressourcen nachhaltig zu nutzen.

¹⁶ Vgl. Wohlensee Hans Markus Tschirren



Abbildung 11 Wasserkraftwerk Mühleberg; Quelle:
<https://www.bkw.ch/de/energie/energieproduktion/wasserkraft/uebersicht-wasserkraftwerke>

Durch den Wasserspeicher des Wohlensees wird es dem Wasserkraftwerk ermöglicht, mit einer Nutzwassermenge von $301\text{m}^3/\text{s}$ welche aus, 19m auf die 6 Francis- und 1 Kaplan turbine treffen Energie zu gewinnen. Diese Turbinen sind mit Generatoren gekoppelt. Durch die Rotation der Turbinen wird in den Generatoren elektrische Energie erzeugt. Die Installierte Leistung beträgt 45 MW. Mit dieser gewonnenen Energie können rund 45'000 Haushalte aus der Region Bern mit sauberer, erneuerbarer Energie versorgt werden. Die Jahresproduktion des Wasserkraftwerkes Mühleberg beträgt rund 160 GWh.



Abbildung 12 Turbinenhalle Wasserkraftwerk Mühleberg; Quelle: <https://www.bernerzeitung.ch/seit-100-jahren-die-gleichen-turbinen-995911458061>

7.2.2 Aufbau und Funktion des Wasserkraftwerkes Mühleberg

Ein quer über den Fluss errichtete Wehr staut das Wasser auf und schafft so einen Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser. Dieser Höhenunterschied ist entscheidend für die Energiegewinnung, da er die potenzielle Energie des Wassers bestimmt. Die Höhe des Staus wird sorgfältig berechnet, um einerseits genügend Druck für die Turbinen zu erzeugen und andererseits die ökologischen Auswirkungen auf die Flusslandschaft zu minimieren. Das aufgestaute Wasser wird über einen Zuleitkanal zum Maschinenhaus geleitet, wo sich die Turbinen und Generatoren befinden. Vor dem Eintritt in die Turbine passiert das Wasser ein Rechen, der grobe Schmutzpartikel zurückhält und so Schäden an der Turbine verhindert. Im Herzen des Kraftwerkes befindet sich die Turbine. Sie ist darauf ausgelegt, die kinetische Energie des Wassers aufzufangen und in eine Drehbewegung umzuwandeln.

Die Wahl der Turbinenart (z.B. Kaplan-, Francis- oder Pelton-Turbine) hängt von der spezifischen Wassermenge, dem Gefälle und anderen Faktoren ab.

Durch die Rotation der Turbine wird ein mit der Turbine verbundener Generator angetrieben.

Dieser Generator wandelt die mechanische Energie der rotierenden Turbine in elektrische Energie um. Dieses Prinzip basiert auf der elektromagnetischen Induktion: Durch die Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld wird eine elektrische Spannung induziert. Der Transformator dient dazu, die vom Generator erzeugte Spannung an die Anforderungen des Stromnetzes anzupassen. Nach der Passage der Turbine wird das Wasser über einen Abflusskanal wieder in den Fluss zurückgeführt.

Laufwasserkraftwerke

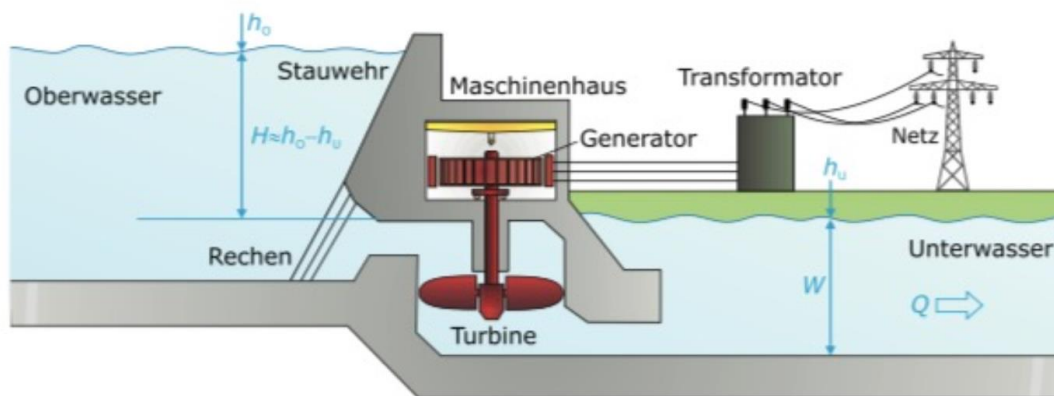


Abbildung 13 Aufbau eines Laufwasserkraftwerkes; Quelle: Buch Regenerative Energiesysteme von Volker Quaschnig

Moderne Kraftwerke sind oft mit Fischpässen ausgestattet, um den Fischen den Aufstieg und Abstieg im Fluss zu ermöglichen und so die ökologischen Auswirkungen zu minimieren. Auch das Wasserkraftwerk Mühleberg wurde modernisiert und besitzt seit 2021 einen Fischpass, der es den Fischen bei ihrer Wanderung flussaufwärts ermöglicht das Wehr zu überwinden. Für die Fische gilt es, eine Höhendifferenz von rund 20 Meter zu überwinden. Mit einem Fischlift werden die Fische in einer Wanne rund 20 Meter in die Höhe gehoben, bevor sie über eine Rinne in den Wohlensee gelangen. Für die Wanderung flussabwärts sucht die Forschung nach wie vor nach passenden Lösungen.

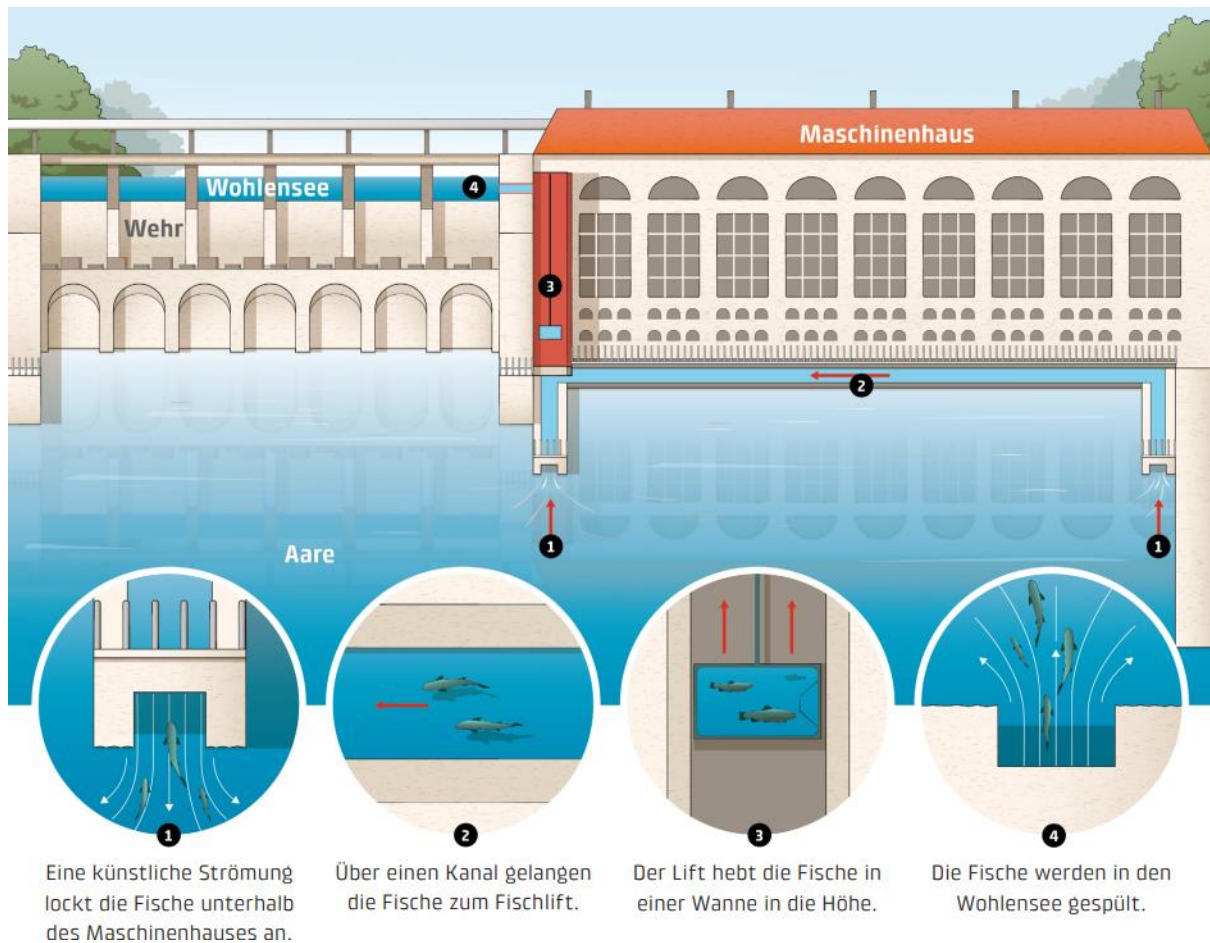


Abbildung 14

https://www.bkw.ch/fileadmin/user_upload/03_Energie/03_05_Energieproduktion/Faktenblatt_Fischlift_DE.pdf

Die Beckenabmessungen, die Neigung der Transportwege und die Strömungsgeschwindigkeit im Fischlift sind exakt auf die Bedürfnisse der Leitfischarten, insbesondere Lachs, Seeforelle und Barbe, abgestimmt.¹⁷

¹⁷ Vgl. Faktenblatt Fischlift BKW Energie AG

7.2.3 Wasserkraftwerk Kandergrund¹⁸

Das Wasserkraftwerk Kandergrund ist ein bedeutendes Stück Industriegeschichte der Schweiz und ein Paradebeispiel für die Nutzung der Wasserkraft zur Stromerzeugung. Seine Geschichte ist eng mit der Entwicklung der Infrastruktur und der Energieversorgung in der Region verbunden. Das Kraftwerk wurde in den Jahren 1907 bis 1910 primär für die Elektrifizierung der Lötschbergbahn errichtet. Die Idee, die Wasserkraft der Kander für die Stromerzeugung zu nutzen, war zu Beginn des 20. Jahrhunderts revolutionär. Mit der Zeit wurden die Anforderungen an die Stromerzeugung höher und die Technik machte große Fortschritte. Daher wurde das Kraftwerk 1991 grundlegend erneuert. Zwar wurde die Anzahl der Turbinen reduziert, jedoch wurden leistungsfähigere Turbinen eingesetzt. Seit 1991 verrichten zwei Pelton-Turbinen mit je 9,4 MW ihre Arbeit im Wasserkraftwerk Kandergrund. Die Jahresproduktion des Wasserkraftwerks Kandergrund beträgt 98.000 MWh¹⁹.



Abbildung 15 Wasserkraftwerk Kandergrund; Quelle: <https://markenportal.bkw.ch/share/hyxbVi9M7DnMZVVUWXZ9>

¹⁸ Vgl. Webseite Gemeinde Kandergrund <https://www.kandergrund.ch/gemeinde/geschichte> abgerufen 17.09.2024

¹⁹ Vgl. BKW-Fact-Tafel Wasserkraftwerk Kandergrund

7.2.2 Aufbau und Funktion des Wasserkraftwerkes Kandergrund

Ähnlich wie bei dem Wasserkraftwerk Mühleberg, wird bei dem Wasserkraftwerk Kandergrund das Wasser der Kander aufgestaut bzw. gefasst. Jedoch führt diese Stauung nicht zu einem See wie dem Wohlensee. Bei dem Wasserkraftwerk Kandergrund wird das gefasste Wasser der Kander in einen 4,2 km langen Stollen geleitet. Über zwei Druckleitungen wird das Wasser mit einer Fallhöhe von circa 300 Metern den Turbinen zugeführt und versetzen diese in eine Rotationsbewegung. Die beiden, mit der Turbinenwelle verbundenen Generatoren wandeln die kinetische Energie des Wassers in elektrische Energie um²⁰.

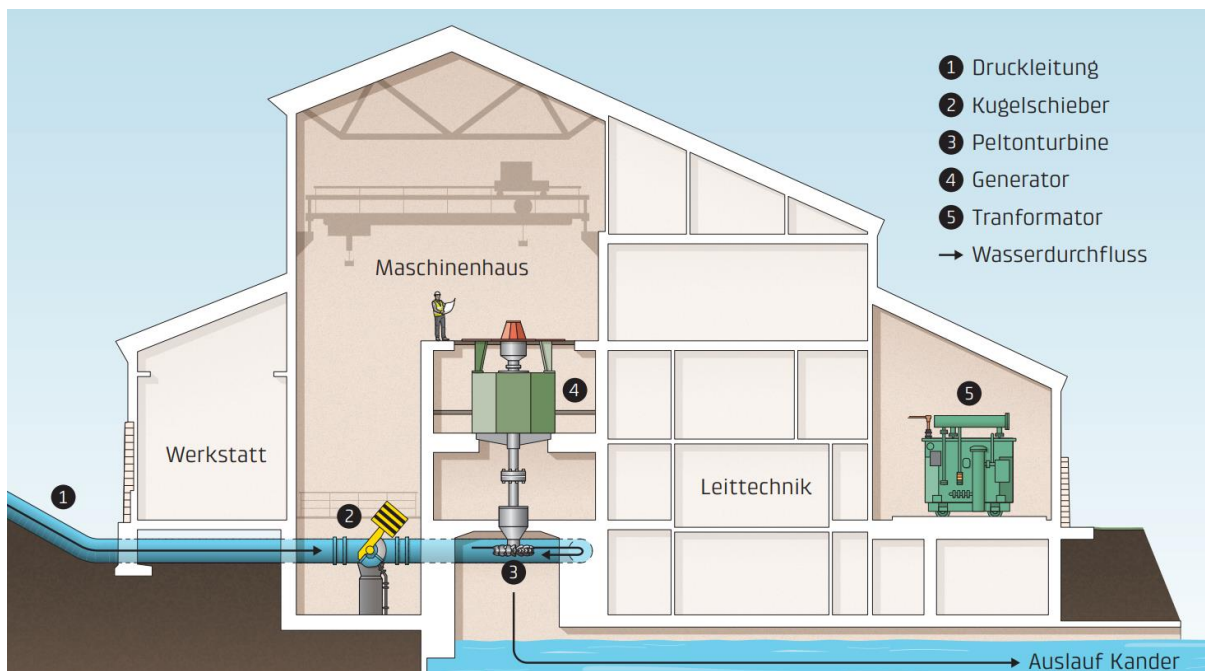


Abbildung 16 Querschnitt Wasserkraftwerk Kandergrund; Quelle: Fact-Tafel Wasserkraftwerk Kandergrund

²⁰ Vgl. BKW-Fact-Tafel Wasserkraftwerk Kandergrund

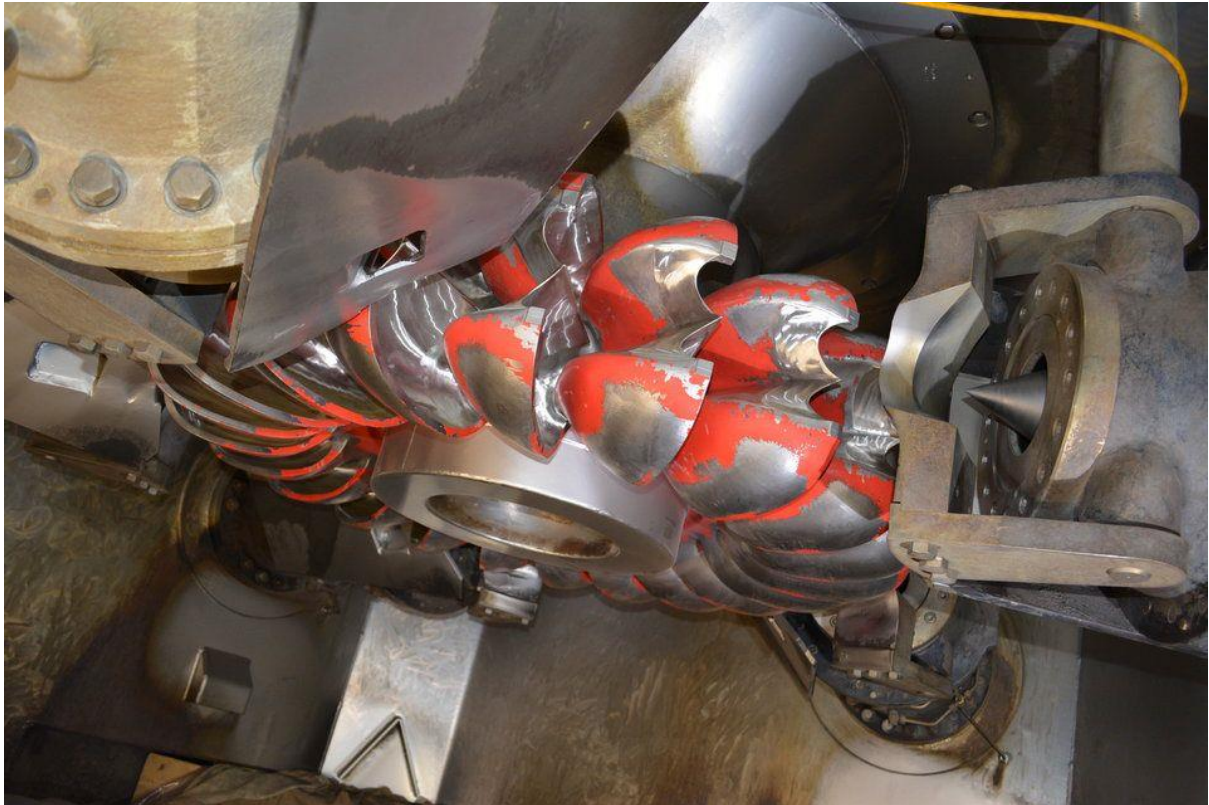


Abbildung 17 Pelton turbinenrad Wasserkraftwerk Kandergrund; Quelle: <https://www.bernerzeitung.ch/facelifting-fuer-ein-kraftwerk-540290585607>



Abbildung 18 Druckleitungen und Überlaufleitung Wasserkraftwerk Kandergrund; Quelle: <https://standseilbahnen.ch/images/3000/3716.01-kandergrund-kraftwerk-2.jpg>

7.3 Solarpark Mont Soleil

Der Solarpark Mont Soleil im Berner Jura ist weit mehr als nur eine Stromerzeugungsanlage. Er ist ein lebendiges Zeugnis der frühen Tage der Solarenergie in Europa und hat bis heute eine immense Bedeutung für die Energiewende. Die Idee, auf dem Mont Soleil ein großes Sonnenkraftwerk zu errichten, entstand Mitte der 1980er Jahre. In einer Zeit, als die Solarenergie noch als Zukunftsmusik galt, wagten sich Visionäre an dieses ambitionierte Projekt. Die Entscheidung, auf dem hochgelegenen Plateau im Berner Jura zu bauen, war mutig, aber auch logisch: Die Sonneneinstrahlung ist hier überdurchschnittlich hoch, und die umliegende Natur ist weitgehend unberührt. 1992 wurde das Kraftwerk schließlich eingeweiht und war damals das größte seiner Art in Europa. Mit einer Leistung von 560 Kilowatt lieferte es ausreichend Strom für rund 120 Haushalte. Aber der Mont Soleil ist nicht nur ein Kraftwerk, sondern auch eine wichtige Forschungsplattform. Hier werden neue Technologien getestet und entwickelt, die den Weg für weitere Fortschritte in der Solarenergie ebneten. Erstaunlich ist, dass die Solarmodule, die 1992 installiert wurden, bis heute im Einsatz sind und immer noch einen beachtlichen Teil ihres ursprünglichen Wirkungsgrades aufweisen. Der Produktionsverlust beträgt lediglich 0,07 Prozent. Dies unterstreichen die Langlebigkeit und Zuverlässigkeit moderner Solartechnologie. Der Solarpark Mont Soleil ist mehr als nur eine technische Anlage. Er ist ein Symbol für die Energiewende und die Möglichkeit, unsere Energieversorgung auf erneuerbare Quellen umzustellen. Das Kraftwerk zeigt, dass es möglich ist, saubere Energie zu erzeugen und gleichzeitig die Umwelt zu schonen. Auch heute noch spielt der Mont Soleil eine wichtige Rolle in der Energiewelt. Es gibt Pläne, die Leistung des Kraftwerks zu verdoppeln und es zu einem internationalen Referenzpunkt für die Entwicklung von Solarmodulen zu machen. Der Solarpark ist ein beliebtes Ausflugsziel und zieht Besucher aus aller Welt an, die sich für erneuerbare Energien interessieren²¹.

²¹ Vgl. <https://www.bkw.ch/de/ueber-uns/aktuell/blog/menschen/2024/auf-dem-mont-soleil-scheint-genug-sonne-fuer-120-haushalte>



Abbildung 19 Solarpark Mont Soleil; Quelle:
https://bkwfmbenergie.sharepoint.com/sites/T_BKWP_AM_PV_Switzerland/

7.3.1 Aufbau und Funktion eines Solarpanels

Ein Solarpanel, oder genauer gesagt ein Photovoltaikmodul, wandelt Sonnenlicht direkt in elektrischen Strom um. Dieser Prozess, die sogenannte Photovoltaik, basiert auf einem physikalischen Effekt, der in bestimmten Materialien, vor allem Halbleitern wie Silizium, auftritt.

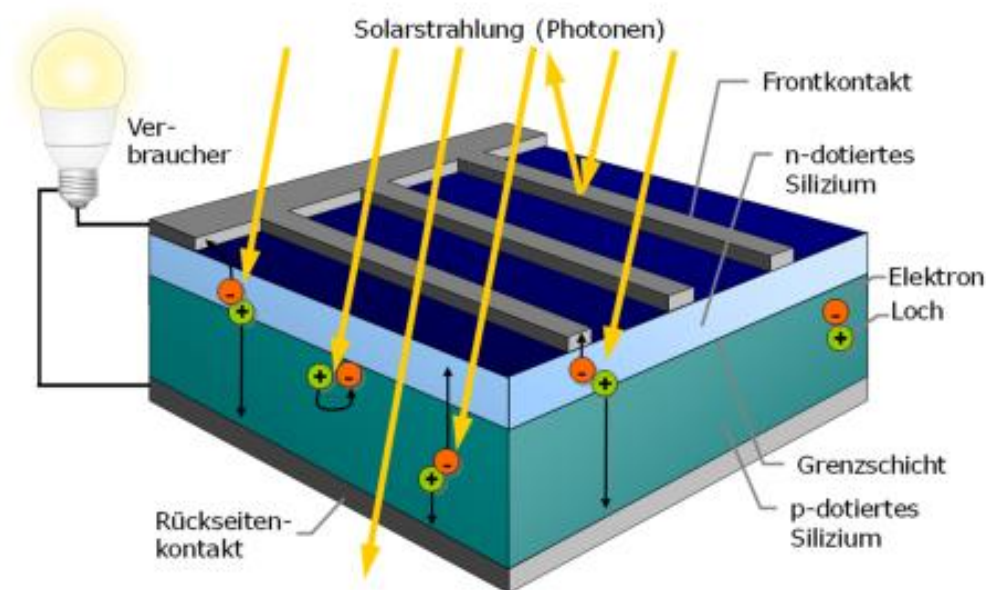


Abbildung 20 Prinzipieller Aufbau einer kristallinen Solarzelle; Quelle: Buch *Regenerative Energiesysteme* von Volker Quaschnig

Der Kontakt zwischen einem p-dotierten und einem n-dotierten Halbleiter führt zur Bildung eines pn-Übergangs. Aufgrund der unterschiedlichen Ladungsträgerkonzentrationen diffundieren die Elektronen aus dem n-Bereich in den p-Bereich und die Löcher in umgekehrter Richtung. Diese Diffusion führt zu einer räumlichen Trennung der Ladungsträger und zur Entstehung einer elektrischen Raumladungszone. In dieser Zone befinden sich im Wesentlichen nur die ortsfesten, ionisierten Dotieratome, die eine elektrische Spannung erzeugen.²²

²² Vgl. *Regenerative Energiesysteme* Quaschnig

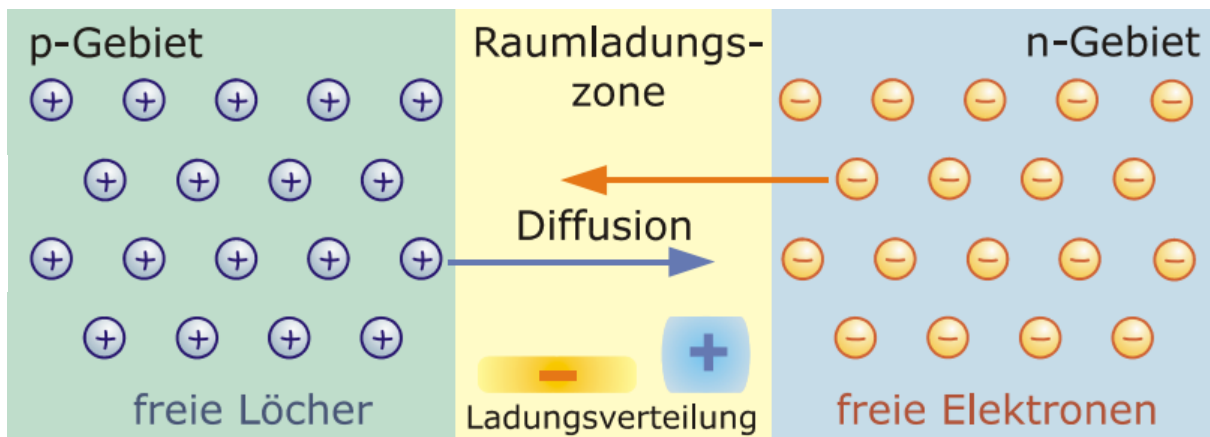


Abbildung 21 Raumladungszone im pn-Übergang durch Diffusion von Elektronen und Löchern; Quelle: Buch Regenerative Energiesysteme von Volker Quaschnig

Trifft nun Sonnenlicht (Photonen) auf die Solarzelle, wird Energie auf die Elektronen übertragen. Diese können sich dann aus ihren Bindungen lösen und bewegen sich frei im Material. Das elektrische Feld in der Raumladungszone bewirkt, dass die freigesetzten Elektronen in den n-dotierten Bereich und die positiv geladenen Löcher in den p-dotierten Bereich wandern. Schließt man einen elektrischen Leiter an die Solarzelle an, fließt ein Strom, da die Elektronen einen Weg finden, zum positiven Pol zurückzukehren.

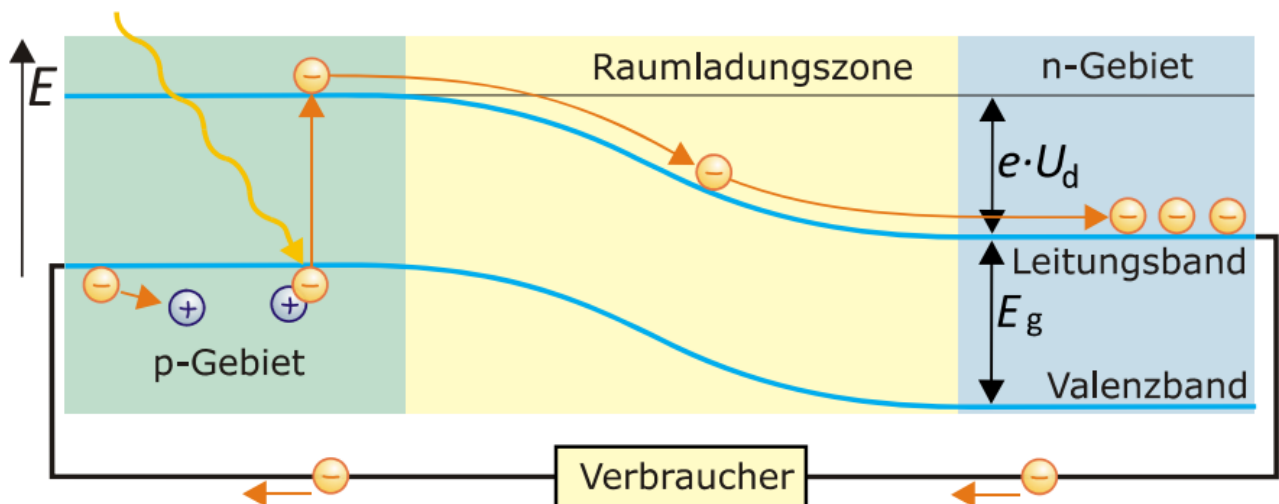


Abbildung 22 Prinzip einer Solarzelle; Quelle: Buch Regenerative Energiesysteme von Volker Quaschnig

Der theoretische Wirkungsgrad von 29% für kristalline Siliziumzellen ist ein wichtiger Bezugspunkt für die Bewertung von Solarzellen. Obwohl dieser Wert in der Praxis nicht erreicht wird, gibt er Aufschluss über die Potenziale und Grenzen dieser Technologie. Die Forschung ist kontinuierlich bemüht, neue Wege zu finden, um den Wirkungsgrad von Solarzellen weiter zu steigern und die Solarenergie noch effizienter zu nutzen.²³

7.4 Windpark Mont Crosi/Mont Soleil

Der Windpark Mont Crosin ist ein bedeutendes Projekt im Bereich der erneuerbaren Energien in der Schweiz. Er befindet sich im Berner Jura und ist der größte Windpark des Landes. Der Windpark ist auf dem gleichnamigen Berg, dem Mont Crosin, errichtet. Seine strategische Lage nutzt die vorherrschenden Windverhältnisse in dieser Region optimal aus. Mit einer Gesamtleistung von 37,2 Megawatt und 16 Windkraftanlagen verschiedener Typen ist er ein beeindruckendes Beispiel für die Nutzung von Windenergie in der Schweiz. Die technische Entwicklung des Windparks Mont Crosin ist anhand der installierten Turbinentypen gut nachvollziehbar. Von den anfänglich kleinen V44- und V47-Turbinen ging es über die leistungsstärkeren V52 und V66-Modelle bis hin zu den heutigen V90-Anlagen. Die Gondeln der V90-Turbinen ragen 95 Meter in die Höhe und die Rotorblätter haben eine Länge von 45 Metern. Diese Dimensionen ermöglichen eine effiziente Nutzung des Windes. Die Turbinen beginnen bei einer Windgeschwindigkeit von 7 km/h zu drehen und produzieren ab 14 km/h Strom. Die Drehzahl passt sich dabei den Windverhältnissen an und liegt zwischen 9 und 17 Umdrehungen pro Minute. Das zweite Repowering-Projekt, abgeschlossen im September 2016, führte zur Installation von vier modernen Vestas V112-Turbinen mit je 3,3 MW Leistung. Diese ersetzen ältere Modelle und ermöglichten eine Erhöhung der jährlichen Stromproduktion von zuvor 50 auf nun 70 Gigawattstunden pro Jahr und sind die Leistungsstärksten Windturbinen der Schweiz.

²³ Vgl. Regenerative Energiesysteme Quaschnig

²⁴ Vgl. <https://www.juvent.ch/de/windkraftwerk/repowerings/repowering-2016> abgerufen 10/2024



Abbildung 23 Windpark Mont Crosin/Mont Soleil; Quelle:
<https://www.juvent.ch/de/windkraftwerk/uebersicht/eindruecke> abgerufen 08.10.2024

7.4.1 Aufbau und Funktion einer Windkraftanlage ²⁵

Windenergieanlagen wandeln die kinetische Energie des Windes in elektrische Energie um. Dieser Prozess ist komplex und beruht auf einem Zusammenspiel verschiedener technischer Komponenten. Im Folgenden wird die Funktionsweise einer modernen Windenergieanlage detailliert erläutert. Eine Windenergieanlage besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

Rotor: Das Herzstück der Anlage. Die Rotorblätter, meist aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), nutzen das Auftriebsprinzip, um die kinetische Energie des Windes in eine Drehbewegung umzuwandeln.

Nabe: Die Nabe verbindet die Rotorblätter mit der Gondel und überträgt die Drehbewegung.

Gondel: In der Gondel befinden sich die zentralen Komponenten der Anlage:

Generator: Er wandelt die mechanische Rotationsenergie in elektrische Energie um. Moderne Anlagen verwenden häufig Asynchron- oder Permanentmagnetgeneratoren.

Getriebe: Das Getriebe erhöht die Drehzahl des Rotors, um den Generator optimal zu betreiben. In modernen Anlagen werden zunehmend direkt angetriebene Generatoren ohne Getriebe eingesetzt.

Bremsen: Bremsen dienen zur sicheren Stilllegung der Anlage und zum Schutz vor Überlast.

Steuerungssystem: Die Steuerung optimiert den Betrieb der Anlage, passt die Ausrichtung der Rotorblätter an den Wind an und schützt die Anlage vor Schäden.

Turm: Der Turm trägt die Gondel und den Rotor in eine windreiche Höhe. Moderne Türme werden häufig aus Stahl oder Beton gefertigt.

Fundament: Das Fundament sichert die Standsicherheit der gesamten Anlage.

Schema eines Horizontalachsen-Rotors

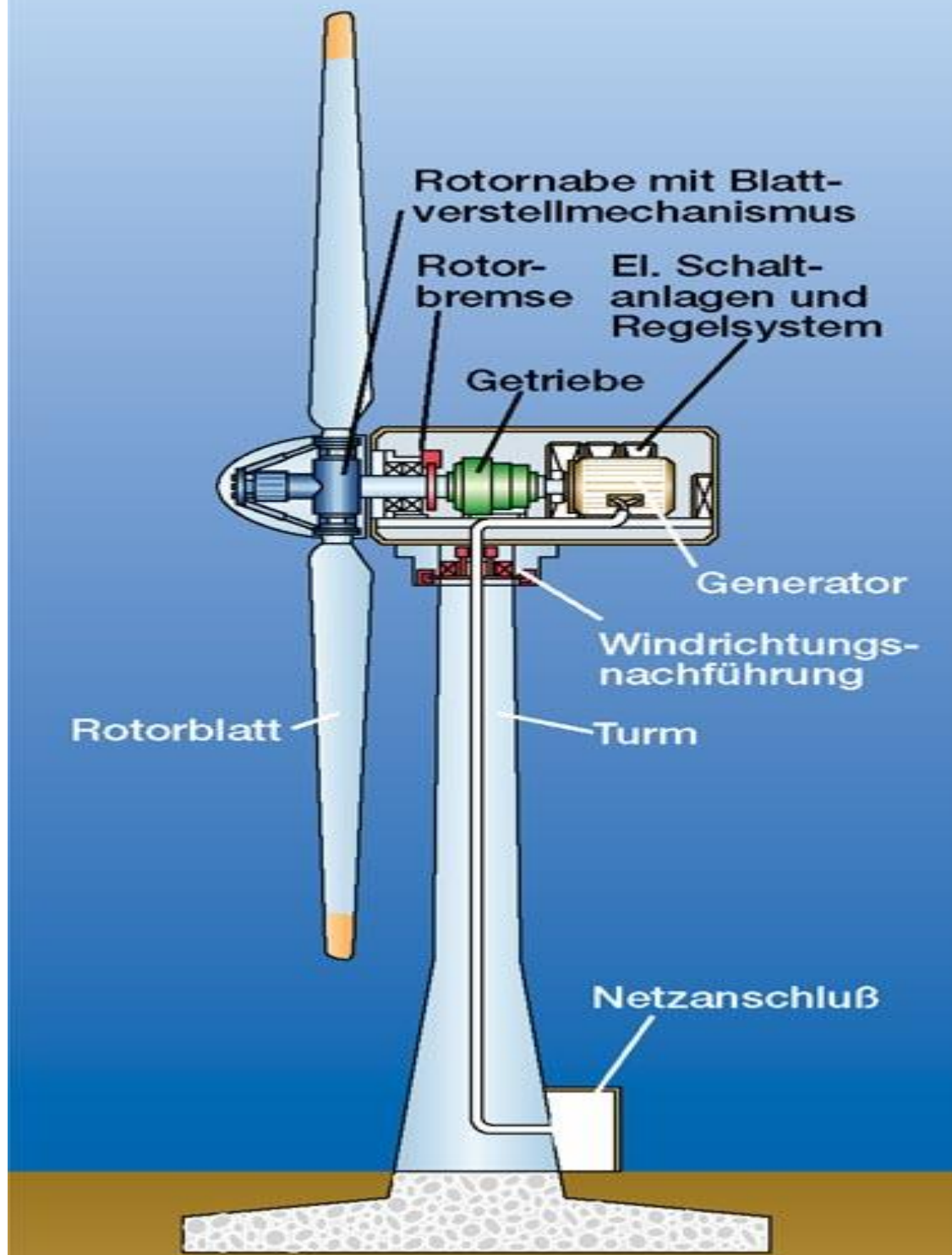


Abbildung 24 Aufbau Windkraftanlage; Quelle: http://wasserstoff_ag.tripod.com/wind/der_aufbau_einer_windanlage.html abgerufen 08.10.2024

Funktionsbeschreibung: Die Rotorblätter moderner Windkraftanlagen (WKA) sind Meisterwerke der Aerodynamik. Ihre Form, vergleichbar mit einem Flugzeugflügel, erzeugt Auftriebskräfte, die die Drehung der Anlage antreiben.

Die Luft strömt schneller über die gewölbte Oberseite des Blattes als unter der flacheren Unterseite. Dieser Geschwindigkeitsunterschied führt zu einem Druckunterschied: Oben entsteht ein Unterdruck, unten ein Überdruck. Die resultierende Kraft, der Auftrieb, drückt das Blatt nach oben und setzt es in Drehung. Der Winkel, unter dem das Blatt auf den Wind trifft (Anstellwinkel), bestimmt die Stärke dieser Kraft.

Im Gegensatz zu Flugzeugtragflächen, die oft symmetrische Profile haben, sind Rotorblätter meist asymmetrisch geformt. Dies ermöglicht einen höheren Wirkungsgrad bei geringer Windgeschwindigkeit. Zudem sind Rotorblätter oft verdreht, um den veränderlichen Anströmwinkel über die gesamte Länge auszugleichen.

Die Materialien der Rotorblätter müssen belastbar und zugleich leicht sein, um den hohen Anforderungen gerecht zu werden. Ingenieure arbeiten kontinuierlich daran, die Form und die Materialien der Rotorblätter zu optimieren, um die Energieeffizienz weiter zu steigern und die Lebensdauer der Anlagen zu verlängern. Die Drehbewegung der Rotorblätter wird über die Nabe auf ein Getriebe übertragen. Das Getriebe erhöht die Drehzahl, um den Generator optimal anzutreiben. Der Generator ist das Herzstück der WKA. Er wandelt die mechanische Rotationsenergie in elektrische Energie um. Dieses Prinzip beruht auf der elektromagnetischen Induktion.

Moderne WKAs verfügen über komplexe Regelungssysteme, welche die Leistungsabgabe an die schwankenden Windverhältnisse anpassen und den Betrieb optimieren.

²⁵ Vgl. Regenerative Energiesysteme Quaschning

8. Gegenüberstellung der Produktionsanlagen ²⁶

Mit der globalen Klimakrise und dem steigenden Energiebedarf wächst das Interesse an umweltfreundlichen Energiequellen. Windkraftanlagen, Wasserkraftwerke, Atomkraftwerke und Solarkraftwerke gehören zu den vier zentralen Technologien, die zur Deckung des Energiebedarfs und zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen können. Jede dieser Technologien hat spezifische Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, die eine sorgfältige Bewertung notwendig machen. In dieser Gegenüberstellung werden die ökologischen Fußabdrücke, sozialen sowie wirtschaftlichen Aspekte dieser Technologien verglichen, um eine fundierte Basis für zukünftige Energieentscheidungen zu schaffen.

Atomkraftwerke

Ökologischer Fußabdruck

Atomkraftwerke erzeugen während des Betriebs nahezu keine CO₂-Emissionen und haben im Vergleich zu fossilen Brennstoffen einen geringen ökologischen Fußabdruck in der Stromproduktion. Allerdings sind die Emissionen und Umweltschäden entlang der gesamten Produktionskette von der Uranförderung bis zur Entsorgung erheblich. Radioaktiver Abfall stellt eine immense Herausforderung dar, da er über viele Jahrtausende sicher gelagert werden muss. Zudem besteht das Risiko von Atomunfällen, die wie in Tschernobyl oder Fukushima massive Umweltauswirkungen haben und ganze Landstriche unbewohnbar machen können. Die Frage der Endlagerung von Atommüll ist ungelöst und belastet kommende Generationen.

²⁶ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Deutschland <https://www.bmu.de> abgerufen 10.10.2024

Vgl. Umweltbundesamt (UBA), Deutschland <https://www.umweltbundesamt.de> abgerufen 10.10.2024

Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) <https://www.ise.fraunhofer.de> abgerufen 10.10.2024

Vgl. International Energy Agency (IEA) <https://www.iea.org> abgerufen 10.10.2024

Soziale Aspekte

Atomkraft hat weltweit eine polarisierende Wirkung auf die Gesellschaft. Viele Menschen sehen in Atomkraftwerken eine Bedrohung für ihre Gesundheit und die Umwelt. Die Angst vor einem Unfall ist insbesondere in dicht besiedelten Regionen groß. Radioaktive Strahlung kann schwere Gesundheitsprobleme verursachen und ist besonders gefährlich für zukünftige Generationen, da sich die Halbwertszeiten der radioaktiven Stoffe über viele tausend Jahre erstrecken. Andererseits bietet die Atomindustrie gut bezahlte Arbeitsplätze, insbesondere in Hochtechnologieländern, und trägt zur Entwicklung und Aufrechterhaltung des technischen Know-hows bei.

Wirtschaftliche Aspekte

Der Bau von Atomkraftwerken ist sehr kostspielig und kann Jahrzehnte dauern, bevor eine Anlage tatsächlich Strom produziert. Obwohl die Betriebskosten gering sind, da Uran sehr energieintensiv ist, entstehen erhebliche Zusatzkosten für den Rückbau von Anlagen und die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle. Auch die Versicherungskosten für mögliche Unfälle sind enorm, wobei in vielen Ländern der Staat als Versicherer einspringt. Trotz der hohen Investitionskosten können Atomkraftwerke eine kosteneffiziente Energiequelle sein, wenn die Laufzeit lang genug ist und keine größeren Unfälle oder zusätzliche Entsorgungskosten anfallen.

Wasserkraftwerke

Ökologischer Fußabdruck

Wasserkraftwerke sind ebenfalls eine emissionsarme Energiequelle, haben jedoch erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt. Der Bau von Dämmen und Stauseen verändert die Flussökosysteme erheblich und führt zu Störungen im Wasserhaushalt. Der natürliche Flussverlauf wird unterbrochen, was zur Verringerung der biologischen Vielfalt führen kann. Fische und andere Wasserlebewesen verlieren oft ihren Lebensraum, und die Wanderungswege von Fischarten wie Lachs werden blockiert. Zudem führt der Bau von Stauseen zur Überschwemmung großer Landflächen, was oft wertvolle Ökosysteme zerstört und Treibhausgase durch die Zersetzung von Pflanzenmaterial freisetzen kann.

Soziale Aspekte

Wasserkraftwerke haben aufgrund ihrer großflächigen Landnutzung oft gravierende Auswirkungen auf die Bevölkerung. Der Bau eines großen Staudamms erfordert häufig die Umsiedlung ganzer Dörfer, was soziale Spannungen erzeugen kann. In einigen Fällen gibt es nur unzureichende Entschädigungen für die Umsiedlung, und die betroffenen Gemeinschaften müssen sich in eine neue Umgebung integrieren. Auch kulturelle und historische Stätten können durch den Bau von Staudämmen verloren gehen. Positiv zu vermerken ist jedoch, dass Wasserkraftwerke nicht nur Strom liefern, sondern auch Schutz vor Hochwasser bieten und Wasserreserven für Trockenzeiten anlegen.

Wirtschaftliche Aspekte

Wasserkraftwerke sind kapitalintensiv im Bau, aber langlebig, oft bis zu 100 Jahre. Einmal errichtet, fallen geringe Betriebskosten an, und die Anlagen liefern eine konstante und zuverlässige Energiequelle. In Regionen mit geeigneten geografischen Bedingungen wie bergigen und regenreichen Gebieten sind Wasserkraftwerke eine wirtschaftlich rentable Energiequelle. Die Planbarkeit und Stabilität der Energieproduktion sind große Vorteile, die Wasserkraftwerke zu einer geschätzten Energiequelle für viele Länder machen. Die langfristigen wirtschaftlichen Vorteile können die hohen Anfangsinvestitionen rechtfertigen.

Solkraftwerke

Ökologischer Fußabdruck

Solkraftwerke erzeugen im Betrieb keinerlei CO₂-Emissionen und tragen so wesentlich zur Senkung des Treibhausgas-Ausstoßes bei. Die Produktion von Solarpanelen ist jedoch energieintensiv, und der Abbau der benötigten Rohstoffe wie Silizium, Silber und Cadmium kann umweltschädlich sein. Eine Herausforderung ist die Entsorgung alter Module, da die Materialien teils toxisch sind und spezielle Recyclingverfahren erfordern. Mit einer Lebensdauer von 25 bis 30 Jahren haben Solarpanels einen vergleichsweise kleinen ökologischen Fußabdruck, insbesondere wenn sie am Ende ihrer Lebensdauer fachgerecht recycelt werden.

Soziale Aspekte

Im Vergleich zu anderen Energiequellen führt die Installation von Solaranlagen zu weniger Konflikten, da sie oft auf Dächern oder Industriebrachen errichtet werden und kaum Landschaftsveränderungen bewirken. Solaranlagen ermöglichen dezentrale Energieerzeugung, wodurch Gemeinden und Privatpersonen ihre Energie selbst erzeugen und teilweise auch ins Netz einspeisen können. Dies stärkt die Energieunabhängigkeit und fördert sozioökonomische Vorteile. Auch die Zahl der

Arbeitsplätze in der Solartechnologie hat weltweit zugenommen, vor allem in den Bereichen Installation und Wartung.

Wirtschaftliche Aspekte

Die Produktionskosten für Solarenergie sind in den letzten Jahrzehnten drastisch gesunken, und Solarkraft ist heute eine der günstigsten Energiequellen. Besonders in sonnenreichen Regionen kann Solarenergie kosteneffizient produziert werden. Da Solaranlagen jedoch stark von der Sonneneinstrahlung abhängig sind, sind Energiespeicher oder ergänzende Energiequellen nötig, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Zudem haben viele Länder Förderprogramme wie Einspeisetarife und Subventionen eingerichtet, die Solarenergie zusätzlich wirtschaftlich attraktiv machen.

Windkraftanlagen

Ökologischer Fußabdruck

Windkraftanlagen sind eine erneuerbare Energiequelle, die während des Betriebs nur minimale CO₂-Emissionen verursacht. Der ökologische Fußabdruck entsteht vor allem in der Bau- und Produktionsphase. Die Produktion der Turbinen, insbesondere der Rotorblätter, ist ressourcenintensiv. Sie erfordert Stahl, Beton und seltene Erden wie Neodym und Dysprosium, die meist unter erheblichen Umweltauswirkungen abgebaut werden. Zudem müssen Windkraftanlagen nach etwa 20 bis 25 Jahren erneuert werden. Auch das Recycling der Rotorblätter ist komplex, da sie aus Verbundstoffen bestehen, die schwer abbaubar sind. Trotz dieser Herausforderungen sind Windkraftanlagen unter dem Strich eine CO₂-arme Technologie und eine sinnvolle Lösung zur Reduktion fossiler Energieträger.

Soziale Aspekte

Die Errichtung von Windparks kann soziale Spannungen erzeugen, insbesondere in dicht besiedelten oder touristisch attraktiven Regionen. Einige Anwohner empfinden die Anlagen als störend, da sie Geräusche erzeugen und den Landschaftsblick verändern. Der sogenannte „Schattenwurf“ – die periodische Abschattung durch die Rotorblätter – kann ebenfalls als unangenehm empfunden werden. Dennoch schafft die Windkraft auch Arbeitsplätze, insbesondere in ländlichen und strukturschwachen Gebieten, die von den wirtschaftlichen Effekten profitieren können. Eine dezentrale Energieproduktion ermöglicht zudem lokale Beteiligungsmodelle, die den sozialen Rückhalt stärken können.

Wirtschaftliche Aspekte

In den letzten Jahren ist Windenergie zunehmend wirtschaftlich geworden. Während die Baukosten zunächst hoch sind, sind die Betriebskosten gering, da keine Brennstoffe benötigt werden. Die Energiepreise von Windkraftanlagen sinken stetig, insbesondere bei Großprojekten. Staatliche Förderungen wie Einspeisevergütungen und Zuschüsse für erneuerbare Energien haben die Rentabilität zusätzlich gesteigert. Bei geeigneten Standortbedingungen ist die Windkraft eine kostengünstige und rentable Energiequelle, die auch in verschiedenen Skalierungen – von kleinen Windrädern bis hin zu großen Windparks genutzt werden kann.

Schlussfolgerung:

Zusammenfassen kann man sagen, die Wahl zwischen Windkraft, Wasserkraft, Atomkraft und Solarkraft für die zukünftige Energieversorgung erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen jeder Technologie. Jede dieser Energiequellen weist spezifische Vorteile und Nachteile auf, die in verschiedenen geografischen, klimatischen und wirtschaftlichen Kontexten unterschiedlich zum Tragen kommen. Eine nachhaltige und zukunftssichere Energiepolitik wird daher auf einer Diversifikation basieren müssen, um die Vorteile jeder Technologie zu maximieren und die Nachteile so weit wie möglich zu minimieren.

Ökologische Aspekte:

Wind- und Solarkraft bieten die größten Vorteile in Bezug auf den CO₂-Ausstoß im laufenden Betrieb, da sie keine fossilen Brennstoffe verbrauchen und keine Emissionen verursachen. Dennoch bringen sie ökologische Herausforderungen mit sich, insbesondere bei der Herstellung, dem Ressourcenverbrauch und der Entsorgung. Wasserkraftwerke sind emissionsarm und bieten hohe Energieeffizienz, doch die Eingriffe in Flussökosysteme und die Auswirkungen auf Flora und Fauna sind beträchtlich. Atomkraftwerke verursachen ebenfalls wenig CO₂ im Betrieb, jedoch fallen radioaktive Abfälle an, die die Umwelt über Jahrtausende belasten und ein enormes Risiko für zukünftige Generationen darstellen. So kann keine dieser Technologien als vollständig „umweltneutral“ betrachtet werden, und die Auswahl sollte jeweils im Einklang mit den lokalen ökologischen Gegebenheiten erfolgen.

Soziale Aspekte:

Jede Technologie hat spezifische Auswirkungen auf die Bevölkerung und die Lebensqualität in ihrem Umfeld. Windkraft stößt vor allem auf Widerstand in ländlichen Regionen, wo Lärm und visuelle Veränderungen als belastend empfunden werden. Wasserkraftwerke können sogar ganze Dörfer und Siedlungen zur Umsiedlung zwingen und Kulturlandschaften unwiederbringlich verändern. Die Atomkraft birgt das Risiko verheerender Unfälle, deren Folgen Generationen überdauern und die gesellschaftliche Akzeptanz erheblich beeinflussen. Solarkraft hingegen gilt als die sozial verträglichste Technologie, da sie keine erheblichen Eingriffe in die Landschaft und keine gesundheitlichen Risiken birgt. Insgesamt zeigt sich, dass Technologien, die dezentral einsetzbar sind und den Anwohnern Mitspracherechte einräumen, eher auf Akzeptanz stoßen und das Potential haben, soziale Konflikte zu verringern.

Wirtschaftliche Aspekte:

Wirtschaftlich gesehen haben alle vier Technologien unterschiedliche Kostenstrukturen und Potenziale. Windkraft und Solarenergie profitieren von sinkenden Produktionskosten und Förderprogrammen, was sie inzwischen zu den günstigsten Energiequellen macht. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt jedoch stark von den Standortbedingungen ab – für Windkraft sind windreiche Gebiete, für Solarenergie sonnenreiche Regionen ideal. Wasserkraftwerke haben hohe Baukosten, die durch die langfristig niedrigen Betriebskosten und die hohe Zuverlässigkeit aber oft gerechtfertigt werden. Atomkraftwerke weisen eine komplexe Kostenstruktur auf, da hohe Anfangsinvestitionen und Entsorgungskosten anfallen und Unfälle immense wirtschaftliche Schäden verursachen können.

Eine nachhaltige Energiewirtschaft wird daher auf eine optimale Mischung aus kostengünstigen und gleichzeitig zuverlässigen Technologien setzen müssen.

Die nachfolgende Tabelle stellt die einzelnen Kraftwerksarten unter den oben genannten Aspekten gegenüber. Es wird eine Skala von 1 bis 4, wobei 1 das beste und 4 das schlechteste Ranking darstellt.

Kraftwerkstyp	Soziale Aspekte	Ökologische Aspekte	Wirtschaftliche Aspekte	Gesamtbewertung
Windkraftwerk	2	2	2	6
Wasserkraftwerke	3	1	1	5
Solkraftwerke	1	3	3	7
Kernkraftwerke	4	4	4	12

Erläuterung des Rankings:

1. Soziale Aspekte: beinhaltet die gesellschaftliche Akzeptanz, Beschäftigungsmöglichkeiten und eventuelle soziale Konflikte.

- Bestes Ranking (1): Solarkraftwerke - hohe Akzeptanz, Arbeitsplatzmöglichkeiten, geringe soziale Konflikte.

- Schlechtestes Ranking (4) Kernkraftwerke - aufgrund von Sicherheitsbedenken und potenziellen Unfallrisiken.

2. Ökologische Aspekte bewertet die Umweltfreundlichkeit, Emissionen und Auswirkungen auf das Ökosystem.

- Bestes Ranking (1): Wasserkraftwerke - emissionsfreier Betrieb und hohe Effizienz.

- Schlechtestes Ranking (4) Kernkraftwerke - aufgrund radioaktiver Abfälle und möglicher Umweltgefahren.

3. Wirtschaftliche Aspekte beinhaltet die Kosten für Bau, Betrieb und Wartung sowie die Wirtschaftlichkeit und Effizienz.

- Bestes Ranking (1): Wasserkraftwerke - hohe Effizienz und niedrige Betriebskosten langfristig.

- Schlechtestes Ranking (4): Kernkraftwerke - hohe Bau- und Entsorgungskosten.

Gesamtbewertung: Die Gesamtbewertung ergibt sich aus der Summe der einzelnen Rankings; die niedrigere Summe zeigt die potenziell vorteilhaftere Option an.

9. Ausblick in die Energieproduktion im Kanton Bern und die Frage» geht es auch ohne konventionelle Kraftwerke?«

Zukunftsaussichten:

Der zukünftige Energiemix wird voraussichtlich sowohl Wind- als auch Solarkraft als zentrale Säulen der Energieerzeugung umfassen, ergänzt durch Wasserkraft. Angesichts der volatilen Produktion von Wind und Solar die von Wetter und Tageszeit abhängt, wird die Entwicklung von Energiespeichersystemen und eine intelligente Netzsteuerung entscheidend sein, um Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Auch die Standortwahl und Technologien zur Minimierung der ökologischen und sozialen Belastungen müssen vorangetrieben werden. In Gegenden mit Flüssen und Wasservorkommen bleibt die Wasserkraft ein wertvolles Rückgrat für die Stromversorgung, während Länder mit entsprechender Infrastruktur die Atomkraft möglicherweise weiterhin zur Erzeugung von Grundlaststrom nutzen werden.

Nachhaltige Energiekombination:

Die optimale Lösung liegt in der Kombination dieser Technologien unter Berücksichtigung der jeweiligen Stärken und Schwächen. Eine vielfältige Energieversorgung ermöglicht es, die Nachteile einer einzelnen Technologie durch die Vorteile einer anderen auszugleichen. Beispielsweise kann die wetterabhängige Wind- und Solarenergie durch die beständige Stromerzeugung der Wasserkraft oder der Atomenergie unterstützt werden. Solare und dezentrale Ansätze können die sozialen Akzeptanzbarrieren überwinden und die Bürger als aktive Partner der Energiewende einbeziehen.

Insgesamt wird die Zukunft der Energieversorgung nicht auf der „einen besten“ Technologie beruhen, wobei die Atomkraft ausscheidet, sondern auf einem dynamischen Energiesystem, das flexibel auf die Bedürfnisse der Gesellschaft, der Umwelt und der Wirtschaft reagiert. Dies erfordert Innovationskraft, kontinuierliche Forschung und Entwicklung sowie eine Politik, die den Ausbau nachhaltiger Energien durch gesetzliche und wirtschaftliche Anreize fördert. Eine wohlüberlegte Kombination der genannten Energiequellen und der Einsatz fortschrittlicher Technologien zur Speicherung und effizienten Verteilung wird es ermöglichen, den steigenden Energiebedarf auf nachhaltige Weise zu decken und gleichzeitig die Umweltauswirkungen zu minimieren.

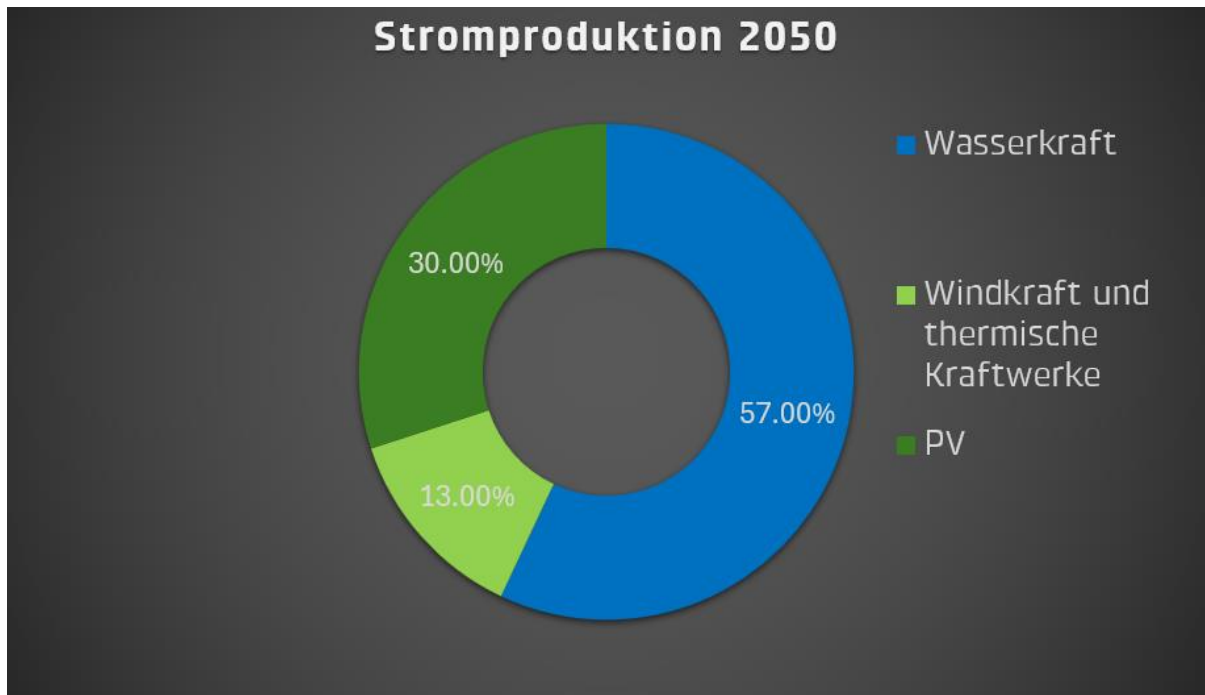


Abbildung 25 Strommix Schweiz 2025; Quelle: eigene Darstellung

10 Fazit und Schlussreflektion

Das Fazit dieser Arbeit unterstreicht die Bedeutung eines ausgewogenen und nachhaltigen Energiemixes für den Kanton Bern, insbesondere im Hinblick auf die angestrebte Energiezukunft der Schweiz. Die Untersuchung unterschiedlicher Energiequellen – darunter Wasserkraft, Atomkraft, Windkraft und Solarenergie – zeigt, dass jede Technologie spezifische Vorteile und Herausforderungen mit sich bringt, die in einem langfristig tragfähigen Energiemodell berücksichtigt werden müssen.

Die Wasserkraft, eine der ältesten und bedeutendsten Energiequellen im Kanton Bern, leistet weiterhin einen wesentlichen Beitrag zur Stromversorgung und bietet gleichzeitig eine zuverlässige und beständige Energiequelle. Die geografischen und hydrologischen Bedingungen des Kantons Bern, mit seinen Flüssen und Stauseen, sind ideal für den Einsatz von Wasserkraftwerken. Gleichzeitig stellen die erheblichen Eingriffe in die Flussökosysteme und die landschaftliche Veränderung durch Dämme eine Herausforderung dar, die in der Zukunft weiter optimiert werden muss. Die moderne Wasserkraft, ergänzt durch Technologien wie Fischpässe und optimierte Steuerungssysteme, ermöglicht es jedoch, den ökologischen Fußabdruck zu verringern und gleichzeitig eine hohe Energieeffizienz zu erreichen.

Die Atomkraft hat im Kanton Bern lange Zeit eine entscheidende Rolle in der Grundlastversorgung gespielt. Das Kernkraftwerk Mühleberg, das mittlerweile abgeschaltet wurde, stellte eine verlässliche und emissionsarme Energiequelle dar. Dennoch haben die unlösbaren Probleme der radioaktiven Abfallentsorgung und das hohe Risiko eines Unfalls die Akzeptanz dieser Energiequelle deutlich eingeschränkt. Der Atomausstieg der Schweiz markiert daher einen bedeutenden Wendepunkt. Die freiwerdenden Kapazitäten durch die Stilllegung von Kernkraftwerken können in Zukunft durch den Ausbau erneuerbarer Energien und durch innovative Speicherlösungen sowie Netzoptimierungen ersetzt werden.

Die Solarenergie zeigt großes Potenzial, vor allem aufgrund der sinkenden Kosten und der technologischen Fortschritte in der Photovoltaik. Im Solarpark Mont Soleil sowie bei vielen dezentralen Solaranlagen wird gezeigt, dass Solarenergie eine flexible und umweltfreundliche Ergänzung des Energiemixes darstellt. Die Installation von Solarpanels auf Dächern und Industriebrachen minimiert den Flächenverbrauch und bietet gleichzeitig eine emissionsfreie Energiequelle, die besonders in den sonnenreichen Sommermonaten zur Versorgungssicherheit beiträgt. Jedoch bleibt die Abhängigkeit von Sonneneinstrahlung eine Herausforderung, weshalb der Ausbau von Speicherkapazitäten und intelligenter Netzmanagementsysteme notwendig ist, um Versorgungslücken in der Nacht oder an bewölkten Tagen zu schließen.

Der Windpark Mont Crosin im Berner Jura zeigt auf, dass auch die Windkraft eine wertvolle Rolle im Energiemix spielen kann. Die Windenergie weist im Betrieb nahezu keine Emissionen auf und trägt effektiv zur Reduktion fossiler Brennstoffe bei. Ein entscheidender Vorteil der Windkraft liegt darin, dass sie insbesondere in den windreichen Monaten und Regionen eine stabile Energieversorgung ermöglicht. Allerdings sind auch hier geografische Einschränkungen, Lärm und visuelle Beeinträchtigungen zu berücksichtigen, die die Akzeptanz von Windparks in der Bevölkerung beeinflussen können. Eine gezielte Standortwahl und eine transparente Kommunikation mit der Bevölkerung können jedoch dazu beitragen, soziale Akzeptanz zu gewinnen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Zukunft der Energieversorgung im Kanton Bern und in der Schweiz nur durch eine wohlüberlegte Kombination aus verschiedenen Energiequellen erreicht werden kann.

Die jeweilige Bedeutung der einzelnen Energiequellen muss dabei an die geografischen, klimatischen und wirtschaftlichen Bedingungen des Kantons Bern angepasst werden, um eine effiziente, wirtschaftlich tragbare und umweltfreundliche Energieproduktion zu gewährleisten.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt für die Zukunft ist die Notwendigkeit der Integration moderner Speichertechnologien und intelligenter Steuerungssysteme. Speichertechnologien wie Batteriespeicher, Pumpspeicherwerke und innovative thermische Speicher können die Schwankungen erneuerbarer Energien ausgleichen und zur Netzstabilität beitragen. Dies ist besonders relevant, um die wetterabhängigen Erzeugungsschwankungen von Solar- und Windenergie auszugleichen und die Versorgungssicherheit zu erhöhen.

Der Ausblick auf die Energieproduktion im Kanton Bern zeigt, dass es möglich ist, eine stabile Energieversorgung auch ohne konventionelle Energiequellen wie die Atomkraft sicherzustellen. Um jedoch den Übergang zu einem vollständig regenerativen Energiesystem zu schaffen, ist es entscheidend, dass sowohl technische Innovationen als auch politische Maßnahmen zusammenwirken. Die Förderung erneuerbarer Energien und der Netzausbau müssen ebenso vorangetrieben werden wie die Entwicklung von effizienten Energiespeichern und einer Flexibilisierung des Energieverbrauchs. Dabei spielt die aktive Beteiligung der Bevölkerung und eine klare Kommunikation über die Vorteile und Herausforderungen der Energiewende eine zentrale Rolle.

Insgesamt zeigt diese Arbeit, dass ein nachhaltiges und sicheres Energieversorgungssystem im Kanton Bern auf einem integrativen Ansatz beruhen sollte, der nicht nur auf den Ausbau erneuerbarer Energien fokussiert ist, sondern auch soziale, wirtschaftliche und ökologische Gesichtspunkte umfassend berücksichtigt. Dies wird den Kanton Bern nicht nur unabhängiger von fossilen Energieträgern machen, sondern auch einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der nationalen Klimaziele und zur Bekämpfung des Klimawandels leisten.

11 Quellenverzeichnis

Kaltschmitt ; Streicher (2009)

Kaltschmitt, Martin ; Streicher, Wolfgang: Regenerative Energien in Österreich. - 1. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009

Doering ; Dehli ; Schedwill (2012)

Doering, Ernst; Dehli, Martin; Schedwill, Herbert: Grundlage der technischen Thermodynamik. - 7. Aufl. Heidelberg: Springer, 2012

Bergmann; Schaefer (1998)

Bergmann, Ludwig; Schaefer, Clemens: Lehrbuch der Experimentalphysik. - 11. Aufl. Berlin; New York: de Gruyter, 1998

Cerbe; Wilhelms (2013)

Cerbe, Günter; Wilhelms, Gernot: Technische Thermodynamik. - 17. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2013

Crastan (2009)

Crastan, Valentin: Energie: Elektrische Energieversorgung 2. – 2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2009

Willimann;

Egil-Broz (2010)

Willimann, Ivo; Egil-Broz, Helena: Ökologie: Einführung in die Wechselwirkung zwischen Mensch und Natur. – 2. Aufl. Zürich: Compendio Bildungsmedien AG, 2010

Erdmann; Zweifel (2010)

Erdmann, Georg; Zweifel, Peter: Energieökonomik. –

2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2010

Energieregime in der Schweiz seit 1800; Bundesamt für Energie BFE

Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2022 Bundesamt für Energie
BFE

[https://de.nucleopedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Mühleberg#Fernwärme_Mühleberg_-_Bern_\(FEMBE\)](https://de.nucleopedia.org/wiki/Kernkraftwerk_Mühleberg#Fernwärme_Mühleberg_-_Bern_(FEMBE)) abgerufen 17.09.2024

<https://www.ensi.ch/de/druckwasserreaktor-und-siedewasserreaktor-stark-vereinfacht/> abgerufen 17.09.2024

Hans Markus Tschirren Wohlensee Weber Verlag 2023

Faktenblatt Fischlift BKW Energie AG

Webseite Gemeinde Kandergrund <https://www.kandergrund.ch/gemeinde/geschichte>
abgerufen 17.09.2024

BKW-Fact-Tafel Wasserkraftwerk Kandergrund

<https://www.bkw.ch/de/ueber-uns/aktuell/blog/menschen/2024/auf-dem-mont-soleil-scheint-genug-sonne-fuer-120-haushalte> abgerufen 20.09.2024

Quaschnig (2013)

Quaschnig, Volker: Regenerative Energiesysteme. - 11. Aufl. München

Carl Hanser Verlag, 2022

<https://www.juvent.ch/de/windkraftwerk/repowerings/repowering-2016> abgerufen
10/2024

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU),
Deutschland <https://www.bmu.de> abgerufen 10.10.2024

Umweltbundesamt (UBA), Deutschland <https://www.umweltbundesamt.de> abgerufen
10.10.2024

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) <https://www.ise.fraunhofer.de>
abgerufen 10.10.2024

International Energy Agency (IEA) <https://www.iea.org> abgerufen 10.10.2024

12 Eigenständigkeitserklärung

Ich bestätige, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und alle benutzten Quellen gekennzeichnet habe. Diese Arbeit wurde weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits einer Prüfungskommission vorgelegt.

M. Meister

Meister Matthias

Worb, 27. Oktober 2024