

Abstract Englisch

Switzerland is pursuing the goal of being climate-neutral by 2050. An important step on this path is increasing the share of renewable energies in power generation. However, especially in the winter months, there is a power gap as demand due to heating and lighting is higher, while power generation from renewable sources such as solar and wind power is lower due to weather conditions. In order to close this gap, renewable energies must be optimally combined with each other.

This bachelor thesis examines the optimal mix for the expansion of renewable energies in order to reduce the winter power shortage in Switzerland. For this purpose, various scenarios for the expansion of solar energy, wind energy and hydropower are analyzed, taking into account costs, availability and environmental impact. The aim is to find a mix that ensures the highest possible security of supply and at same time makes ecological and economical sense.

The results show that the expansion of renewable energies in Switzerland is possible and that a mix of different energy sources can effectively reduce the winter power shortage. However, it is crucial to carefully balance the diverse energy sources in order to maintain a stable and reliable power supply. This work thus provides important insights for planning the further expansion of renewable energies in Switzerland and therefor contributes to achieving the climate target by 2050.

Ort, Datum

Horw, 09.06.2023

© **Sandro Casillo, Hochschule Luzern – Technik & Architektur**

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser dieser Bachelorarbeit

Mit grosser Freude und Stolz präsentiere ich Ihnen meine Diplomarbeit. Die Arbeit ist das Ergebnis monatelanger intensiver Recherchen und Überlegungen. Es ist mir eine Ehre, diese Arbeit mit Ihnen teilen zu dürfen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während dieser lehrreichen Zeit unterstützt haben. Zunächst bedanke ich mich herzlichst bei meinem Betreuer Herr Dr. Oliver Woll vom Institut für Innovation und Technologiemanagement der HSLU T&A in Horw, der mich mit seiner fachlichen Expertise und wertvollen Anregungen durch das gesamte Forschungsprojekt begleitet hat.

Ebenso möchte ich mich bei meinen Kommilitoninnen und Kommilitonen bedanken, die mir mit ihren interessanten Anregungen und Diskussionen, wertvolle Impulse gegeben haben. Auch bedanke ich mich bei meinem persönlichen Umfeld, dem Freundes- und Familienkreis, die mich in dabei herzlichst unterstützt und mir stets den Rücken gestärkt haben – dafür bin ich allen sehr dankbar.

Nicht zuletzt möchte ich mich auch bei den Personen bedanken, die bereit waren, an meinem Projekt teilzunehmen und mir wichtige Informationen, Meinungen, Daten, Prognosen und Analysen für die Arbeit zur Verfügung stellten.

Ich hoffe, dass die Arbeit dazu beitragen kann, das Verständnis für das Thema, insbesondere der Projektproblematik zu vertiefen und möglicherweise weitere Forschung anregt.

Herzlichen Dank,

Sandro Casillo

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	6
1 Einleitung.....	7
1.1 Ausgangssituation	7
1.2 Problemstellung	8
1.3 Zielsetzung.....	8
1.4 Struktur der Arbeit	9
2 Grundlagen.....	10
2.1 Energiestrategie2050	10
2.1.1 drei Kernpunkte der Energiestrategie2050.....	10
2.1.2 quantitative Ziele und Massnahmen.....	11
2.1.3 Instrumente der Energiestrategie2050	12
2.2 Elektrizitätsmarkt-Schweiz	13
2.2.1 Elektrizitätsversorgung.....	13
2.2.2 inländische Stromproduktion.....	13
2.2.3 Entwicklung der Elektrizitätsnachfrage.....	14
2.2.4 Volatilität der Elektrizitätsnachfrage (Saisonalität).....	15
2.2.5 absolute Zahlen: Elektrizitätsmarkt Schweiz (2022)	16
2.2.6 Herausforderungen des Elektrizitätsmarkt	17
2.3 Python	19
2.3.1 Bibliotheken / Pakete	19
2.3.2 Funktionen & Methoden	19
2.3.3 Variablen & Parameter	19
2.3.4 Schleifen	19
2.4 Zwischenfazit.....	20
3 Methodik.....	21
3.1 Datenrecherche.....	21
3.2 Literaturrecherche.....	22
3.2.1 systematische Suche	22
3.2.2 vorwärts gerichtete Suche.....	22
3.2.3 Kombination	22
3.3 Modellierung.....	23
3.3.1 Modell.....	23
3.3.2 mathematische Entscheidungsmodelle	23
3.3.3 lineare Optimierung	24
3.3.4 Zielfunktion.....	24
3.3.5 Entscheidungsvariablen.....	24
3.3.6 Nebenbedingungen	25
3.3.7 lineare Programmierung	25
3.4 Zwischenfazit.....	25
4 Daten.....	26
4.1 Datenbeschreibung	26
4.2 Datenverarbeitung	26
4.3 Zwischenfazit.....	26

5	Modell	27
5.1	Modellarchitektur.....	27
5.2	Modellcode.....	27
5.2.1	Bibliotheken/Pakete.....	27
5.2.2	Zielfunktion des Modells	28
5.2.3	Entscheidungsvariablen des Modells	28
5.2.4	Nebenbedingungen des Modells.....	28
5.3	Annahmen:	30
5.3.1	Nennleistungen der Produktionstechnologien	30
5.3.2	Gestehungskosten der Technologien.....	31
5.3.3	Investitionskosten für den Zubau von Wind & PV	31
5.4	Zwischenfazit.....	33
6	Modellergebnisse	34
6.1	Basismodell: Stromproduktions-Mix 2022	34
6.2	Ergebnis: optimaler Stromproduktions-Mix 2050.....	35
6.3	Ergebnis: optimaler Zubau Wind & PV bis 2050	35
6.4	Ergebnis: Abweichungen zu Energieperspektiven2050+	36
6.4.1	max. Strombedarf (+25% Abweichung).....	36
6.4.2	min. Strombedarf (-25% Abweichung)	37
6.5	Ergebnis: Variation der annuitätischen Investitionskosten.....	38
6.6	Diskussion und Güte des Modells	38
6.7	Zwischenfazit.....	39
7	Modellvergleich.....	40
7.1	Zukunftsszenario BfE: «Energieperspektiven2050+».....	40
7.2	Ergebnisvergleich: Modellergebnisse vs. Energieperspektiven2050+	41
7.3	Ergebnisvergleich: Vergleich des Stromimports im Jahr 2050	41
7.4	Zwischenfazit.....	42
8	Diskussion.....	43
9	Schlussbetrachtung und Ausblick.....	44
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	44
9.2	Lessons Learned	44
9.3	Handlungsempfehlung	45
9.4	Zukünftiger Forschungsbedarf	45
10	Literaturverzeichnis.....	46
	Anhang	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verwendung des Netzzuschlags (BfE, Energiestrategie2050, 2023).....	12
Abbildung 2: Übertragungsnetz Schweiz (Swissgrid, 2023)	13
Abbildung 3: Stromproduktions-Mix Schweiz (VSE, 2023)	14
Abbildung 4: historische Elektrizitätsnachfrageentwicklung der Schweiz ³	15
Abbildung 5: schwankende Elektrizitätsnachfrage stündlich für das Jahr 2022 ⁴	16
Abbildung 6: Elektrizitätsimport- Export für das Jahr 2022 (BfE, Energiestatistiken, 2023)	18
Abbildung 7: Methoden zur Datenrecherche ⁵	21
Abbildung 8: Schematische Darstellung eines mathematischen Modellierungsprozess ⁶	23
Abbildung 9: berücksichtigte Technologien des Modells (Quelle: selbst erstellt)	27
Abbildung 10: Zielfunktion der Projektarbeit (Quelle: selbst erstellt)	28
Abbildung 11: Abdeckung der Stromnachfrage (Quelle: selbst erstellt)	28
Abbildung 12: Kapazitätsbeschränkungen erneuerbare Energien (Quelle: selbst erstellt)	29
Abbildung 13: Aufteilung der Stromnachfrage (Quelle: selbst erstellt)	29
Abbildung 14: Kapazitätsbeschränkung der Pumpspeicher (Quelle: selbst erstellt)	30
Abbildung 15: Modellergebnis "Basismodell" repräsentativ für das Jahr 2022 (Quelle: selbst erstellt).....	34
Abbildung 16: Modellergebnis optimaler Mix Produktionstechnologien (Quelle: selbst erstellt).....	35
Abbildung 17: Modellergebnis bei +25% mehr Nachfrage im Jahr 2050 (Quelle: selbst erstellt)	36
Abbildung 18: Modellergebnis bei -25% mehr Nachfrage im Jahr 2050 (Quelle: selbst erstellt)	37
Abbildung 19: Strommix der Energieperspektiven2050+ (BfE, Energieperspektiven2050+, 2023).....	40
Abbildung 20: Vergleich des Stromimports im Jahr 2050 (BfE, Energieperspektiven2050+, 2023)	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>Teilforschungsfragen der Bachelorarbeit (Quelle: selbst erstellt)</i>	8
Tabelle 2: <i>spezifische Ziele der Bachelorarbeit (Quelle: selbst erstellt)</i>	9
Tabelle 3: <i>Stilllegung Kernkraftwerke</i> ¹	10
Tabelle 4: <i>quantitative Ziele der Energiestrategie2050</i> ²	11
Tabelle 5: <i>quantitative Ziele der Energiestrategie2050 für 2035 (BfE, Energiestrategie2050, 2023)</i> ...	11
Tabelle 6: <i>absolute Stromdaten im Jahr 2022 (BfE, Energiestatistiken, 2023)</i>	17
Tabelle 7: <i>Symbolbeschreibung der Formeln (Wolfgang Domschke, 2015)</i>	24
Tabelle 8: <i>verwendete Nennleistungen Modell (BfE, Energiestatistiken, 2023)</i>	30
Tabelle 9: <i>verwendete Gestehungskosten im Modell</i> ⁷	31
Tabelle 10: <i>Investitionskosten Wind & PV (BfE, Kosten Windenergie, 2023) (Solarratgeber, 2023)</i>	31
Tabelle 11: <i>Berechnung des Barwertfaktor für die entsprechende Lebensdauer</i> ⁸	32
Tabelle 12: <i>Berechnung annuitätische Investitionskosten (Wirtschaftslexikon, 2023)</i>	32
Tabelle 13: <i>Modellergebnisse zu Variation annuitätische Investitionskosten (Solarratgeber, 2023)</i> ...	38
Tabelle 14: <i>Vergleich der Modellergebnisse (BfE, Energieperspektiven2050+, 2023)</i>	41

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
AKW	Atomkraftwerk
Anz.	Anzahl
BF	Barwertfaktor
BfE	Bundesamt für Energie
BfS	Bundesamt für Statistik
CHF	Schweizer Franken
DE	Deutschland
EnG	Energiegesetz
EDA	eidgenössisches Departement für auswärtige Angelegenheiten
ENSI	eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EnV	Energieverordnung
EU	europäische Union
exkl.	exklusive
Fr.	Franken
FR	Frankreich
HSLU	Hochschule Luzern
inkl.	Inklusive
IIT	Institut für Innovation & Technologie der Hochschule Luzern
KKW	Kernkraftwerk
konv.	konventionelle
OOP	Objektorientiertes Programmieren
PV	Photovoltaik
Rp.	Rappen
SW	Software
VSE	Verband Schweizerische Elektrizitätswerke

Physikalische Einheiten:

GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
Sek.	Sekunde
Std.	Stunde
TW	Terawatt
TWh	Terawattstunde
W	Watt
Wh	Wattstunde

1 Einleitung

Der katastrophale Unfall im Jahr 2011 in Fukushima verdeutlicht die Gefahren und Risiken der Energiegewinnung durch Kernenergie. Das Ereignis unterstreicht die dringende Notwendigkeit nachhaltiger Energiequellen. Als Reaktion auf die damalige Katastrophe in Japan haben viele Länder Massnahmen und Schritte für eine nachhaltige Energiezukunft eingeleitet. Die Schweizer Politik hat dazu die Energiestrategie2050 formuliert. Das Hauptziel dieser Strategie besteht darin die Schweizer Energiewirtschaft bis ins Jahr 2050 vollständig auf erneuerbare Energiegewinnung umzustellen. Die Energiestrategie2050 beinhaltet spezifische Ziele, Massnahmen und Taktiken zu deren Umsetzung. Die erfolgreiche Realisierung erfordert erhebliche Investitionen in innovative Technologien sowie auch die gesellschaftliche Akzeptanz und Unterstützung.

Trotz des Anstiegs des Interesses an erneuerbaren Energiequellen, sieht sich die Schweiz auch in Zukunft insbesondere in den Wintermonaten mit einer erheblichen Stromlücke zwischen Angebot- und Nachfrage konfrontiert. Derzeit wird das Defizit durch Stromimporte und fossile Energieträger überbrückt. Zur Erreichung der Klimaziele ist es ist der Ausbau der erneuerbaren Energiequellen zwingend erforderlich und zentraler Bestandteil der Energiestrategie2050. Der Ausbau und die Umstellung auf alternative Energiere Ressourcen verursachen eine Verringerung der Abhängigkeit vom Ausland und eine Reduktion der Stromknappheit.

Um einen optimalen Mix für den zukünftigen Ausbau erneuerbarer Energiequellen in der Schweiz zu ermitteln und gleichzeitig die Winterstromlücke möglichst zu reduzieren, wird in der Bachelorarbeit ein Modell verwendet, welches die komplexe Energieversorgung der Schweiz nachbildet. Das Hauptziel der Modellierung ist es dabei den Anteil erneuerbarer Energien zur Deckung des Strombedarfs zu maximieren und gleichzeitig die damit verbundenen Kosten und Umweltauswirkungen zu minimieren. Die Modellierung ermöglicht Simulationen verschiedener Szenarien, welche wertvolle Einblicke in die Förderung alternativen Energiequellen liefern.

1.1 Ausgangssituation

Die Energieversorgung in der Schweiz stützt sich stark auf fossile Energien und Kernenergie. Mit der Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens im Jahr 2015 und der anschliessend vom Bundesrat ausgearbeiteten Energiestrategie2050, wurden Ziele und Massnahmen für die Zukunft vordefiniert. Durch die geplante Ausserbetriebnahme der in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerke, entsteht eine erhebliche Lücke im Produktionsangebot. Diese Versorgungslücke gilt es alternativ zu schliessen. Ein wesentlicher Kernpunkt bei der Umsetzung der Strategie ist der Zubau von erneuerbaren Energien. Durch den geplanten Ausbau und deren Integration in das Elektrizitätsnetz entstehen neue Probleme, welche die Schweizer Wirtschaft, Gesellschaft und Politik vor neue Herausforderungen stellt. Als Grundlage dieser Bachelor-Diplomarbeit dient ein Computermodell, welches vom Institut für Innovation und Technologie IIT der HSLU zur Verfügung gestellt wurde. Das Modell wird während der Projektarbeit so bearbeitet, überarbeitet und ergänzt, dass eine möglichst realistische Abbildung und Prognose der Problematik möglich ist. Es veranschaulicht dabei das komplexe Energiesystem der Schweiz und liefert die Lösung für den optimalen Stromerzeugungs-Mix in Bezug auf den zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energiequellen.

1.2 Problemstellung

Die nachhaltige Produktion von Elektrizität ist stark mit Bedingungen und Abhängigkeiten verknüpft. Es entstehen eine Vielzahl neuer Herausforderungen und neuer Probleme in der Energieversorgung. Die Hauptproblematik dieser Forschungsarbeit bezieht sich auf die Umstellung der Energieversorgung mit möglichst geringem Kostenaufwand unter der Bedingung den Schweizer Strombedarf jederzeit abzudecken. Durch den geplanten Ausbau der erneuerbaren Energiequellen entstehen zunehmend starke Schwankungen in der Produktion von Elektrizität. Diese wachsende Unstetigkeit in der zukünftigen Stromversorgung ist auf die Wetter- bzw. Tageszeitabhängigkeiten der alternativen Technologien zurückzuführen.

Durch die zunehmende Volatilität im Energiemarkt und der Verknappung an Elektrizität bei geringer Produktionsauslastung, entsteht ein neues beachtliches Problem und gefährdet die zukünftige Versorgungssicherheit. Zusätzlich zur allgemein vergrößerten Volatilität im Strommarkt zeigt sich dieser Effekt verstärkt auch in den Wintermonaten, da erneuerbare Energiequellen im Winter nur eingeschränkt zur Verfügung stehen. Im Winter 21/22 hat sich die Situation gegenüber dem Vorjahr weiter verschlechtert, die Nettoimporte stiegen im Jahr 2022 weiter an. (BfE, 2023) Dies verdeutlicht den Bedarf nach alternativen Lösungen wie dem Einsatz und Ausbau erneuerbarer Energien.

1.3 Zielsetzung

Das primäre Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Frage des Zubaus erneuerbarer Energiequellen in der Schweiz zu vertiefen und einem optimalen Stromerzeugungsmix zu ermitteln, welcher das winterliche Stromdefizit reduziert. Dabei sollen verschiedene Kombinationen alternativer Energien betrachtet werden. Diese sollen nicht nur Kosten und Umweltauswirkungen minimieren, sondern auch eine stabile Versorgungssicherheit gewährleisten können. Um dies zu erreichen werden umfangreiche Untersuchungen zu den jeweiligen Einschränkungen und den kombinierten Auswirkungen jeder einzelnen Technologie durchgeführt. Es soll bestimmt werden, wie diese zusammen eingesetzt werden können, um eine nachhaltige Energienutzung der Schweiz zu erreichen. Um einen Überblick in die Thematik zu erhalten, wurden in der Tabelle 1 folgende Teilforschungsfragen formuliert.

1.	Was beinhaltet die Energiestrategie2050? <ul style="list-style-type: none"> ○ Was sind die genauen Ziele der Energiestrategie? ○ Wie sollen sie erreicht werden?
2.	Wie ist der Energiemarkt Schweiz aufgebaut? <ul style="list-style-type: none"> ○ Welche Parteien / Anspruchsgruppen gibt es?
3.	Wer ist für die schweizerische Stromversorgung verantwortlich? <ul style="list-style-type: none"> ○ Gibt es Sicherheiten-, Versorgungsgarantien?
4.	Wieviel Elektrizität benötigt die Schweiz in der Winter- und Sommerzeit? <ul style="list-style-type: none"> ○ Wie ist die Entwicklung der Stromlücke?
5.	Wieviel tragen erneuerbare Energien zur Abdeckung des Strombedarfs bei?
6.	Welche Ausbauprojekte an erneuerbaren Energiequellen sind bereits geplant?
7.	Wie kann die zukünftige Elektrizitätsproduktion stabilisiert werden?

Tabelle 1: Teilforschungsfragen der Bachelorarbeit (Quelle: selbst erstellt)

Spezifische Ziele:

Um das allgemein formulierte Forschungsziel zu realisieren und zu konkretisieren, werden folgende spezifischen Detailziele definiert.

Literaturrecherche:	<ul style="list-style-type: none"> - Die Bachelorarbeit soll wissenschaftlich verfasst und auf einer umfassenden, konsistenten Literaturrecherche basieren
Datenrecherche:	<ul style="list-style-type: none"> - Die Bachelorarbeit soll reale und aktuelle Daten des Elektrizitätsmarkt Schweiz beinhalten
Optimierungsmodell:	<ul style="list-style-type: none"> - Das für die Bachelorarbeit verwendete Modell soll so weiterentwickelt werden, sodass <ul style="list-style-type: none"> o eine realistische Abbildung des Schweizer Energieversorgungssystem möglich ist o ein entsprechend errechnetes Ergebnis für einen optimalen Produktionsmix möglich ist o eine Zubau-Variable für zukünftige Wind- und Solarstromproduktion möglich ist - Das Modell soll alle relevanten Produktionstechnologien berücksichtigen - Das Modell soll die Stromnachfrage der Schweiz stündlich als Zeitreihen importieren - Das Modell soll die Stromnachfrage kategorisieren in: (E-Mobilität, Wärmepumpen und Restnachfrage) - Das Modell soll die Stromproduktion der erneuerbaren Energien stündlich als Zeitreihen berücksichtigen
Modellergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Die Ergebnisse des Modells sollen in einem Excel-File abgespeichert werden - Die Ergebnisse des Modells sollen geeignet visualisiert werden
Vergleich des Modells:	<ul style="list-style-type: none"> - Die Ergebnisse des Basismodells sollen mit der vom Bundesamt für Energie verfassten Szenarien verglichen werden - Die Güte des Modells soll bestimmt werden
Handlungsempfehlung:	<ul style="list-style-type: none"> - Die Ergebnisse der Bachelorarbeit sollen als Grundlage für weitere Entscheidungen zur Förderung von erneuerbarer Energie in der Schweiz beitragen

Tabelle 2: spezifische Ziele der Bachelorarbeit (Quelle: selbst erstellt)

Die Teilziele dienen dazu, das Forschungsziel in partielle und quantifizierbare Einheiten zu unterteilen. Jedes spezifische Detailziel konzentriert sich auf einen besonderen Aspekt der Forschungsaufgabe und gliedert stufenweise die Erreichung des Forschungsziels.

1.4 Struktur der Arbeit

Die Struktur der vorliegende Bachelorarbeit gliedert sich in sieben Hauptbereiche, welche jeweils die verschiedenen Aspekte des Themas untersuchen. Das Einleitungskapitel bietet den Hintergrund und Kontext der Arbeit. Im Grundlagenkapitel erfolgt eine vertiefte wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den theoretischen Grundlagen zur Energiestrategie2050, erneuerbaren Energiequellen und zur Winterstromknappheit. Anschliessend wird die Forschungsmethodik erklärt. Im vierten und fünften Kapitel werden die Daten und das Modell genauer beschrieben. In Kapitel sechs folgt eine umfassende Dokumentation und Interpretation der Modellergebnisse inkl. der angenommenen Szenarien. Im letzten Kapitel folgt ein geeigneter Vergleich mit dem Szenario der Energieperspektiven2050+. Dies dient zur Bestimmung der Güte und der Bewertung des Modells. Zum Schluss dieser Arbeit wird ein Fazit gezogen, welches die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfasst und dabei einen Ausblick für die Zukunft in diesem Bereich darstellt. Zusätzlich sind im Anhang detaillierte technische Informationen zum Modell und der erstellte Modellcode verfügbar.

2 Grundlagen

Im Grundlagenkapitel wird die Theorie und das notwendige Wissen dokumentiert, auf welcher diese Bachelorarbeit aufgebaut ist. Es umfasst detaillierte Informationen und Fakten, welche spezifisch auf den Kontext der Projektaufgabe abgestimmt sind. Das Kapitel liefert eine solide Wissensbasis und dient zum näheren Verständnis des Projektthemas. Die enthaltenen Informationen ermöglichen es, die Themen und Herausforderungen der Bachelor-Diplomarbeit im Gesamtkontext zu verstehen.

2.1 Energiestrategie2050

Die Energiestrategie2050 ist von zentraler Bedeutung für Schweizer Energiepolitik und soll den Wandel zu einer nachhaltigen und sicheren Energieversorgung ermöglichen. Die Energiestrategie2050 wurde im Jahr 2017 zur Erreichung der Pariser Klimaziele verfasst. Das Hauptziel der Energiestrategie2050 besteht darin bis im Jahr 2050 eine nachhaltige Energieversorgung der Schweiz zu realisieren. Die Strategie basiert auf drei wesentlichen Kernpunkten, welche die Struktur und den Inhalt bestimmen. Sie sind von besonderer Bedeutung, da sie das zentrale Gerüst für den Weg zur Umsetzung der Energieziele darstellen. Folgend werden die drei Kernpunkte der Strategie beschrieben. (BfE, 2023)

2.1.1 drei Kernpunkte der Energiestrategie2050

(1) Ausserbetriebnahme der Kernkraftwerke

Der erste zentrale Kernpunkt der Energiestrategie2050 ist die geplante Ausserbetriebnahme der in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerke. Der Prozess des Kernenergieausstiegs soll stufenweise und gemäss dem VSE nach folgendem Zeitplan erfolgen. (Energieexperten, Stilllegungsplan Kernkraftwerke, 2023)

Kernkraftwerk:	Stilllegungsjahr:
Beznau I	2029
Beznau II	2031
Gösgen	2039
Leibstadt	2044

Tabella 3: Stilllegung Kernkraftwerke ¹

Das Bundesamt für Energie schätzt, dass bis ins Jahr 2035 Investitionen in Höhe von 44 Milliarden CHF für den Ausbau erneuerbarer Energien erforderlich sind, um die Ausserbetriebnahme der Kernenergie alternativ abzudecken. Diese Investitionen sind entscheidend für die Sicherstellung der Schliessung des zukünftigen Stromdefizits. Die Steigerung der Energieeffizienz und die Förderung erneuerbarer Technologien sind für die Energiestrategie2050 von zentraler Bedeutung.

(2) Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie

Der zweite Kernpunkt der Energiestrategie besteht in der verstärkten Erzeugung bzw. dem zusätzlichen Ausbau erneuerbarer Energiequellen. Mit dem zusätzlichen Ausbau insbesondere Solar-, Wasser-, und Windenergie, soll die zukünftige Stromversorgung nachhaltig gestaltet werden (BfE, 2023). Die quantitativen Ziele der Energiestrategie2050, welche für diese Projektarbeit von bedeutender Relevanz sind, werden in Kapitel 2.1.2 erklärt. Die Ausserbetriebnahme der Kernenergie wird unter anderem mit dem zusätzlichen Ausbau von erneuerbaren Energiequellen substituiert.

¹ (Energieexperten, Stilllegungsplan Kernkraftwerke, 2023)

(3) Steigerung der Energieeffizienz

Der letztere wesentliche Kernpunkt der Energiestrategie2050 ist die signifikante Steigerung der Energieeffizienz. Das Ziel ist es dabei nicht nur den totalen Energieverbrauch, sondern insbesondere den Energieverbrauch pro Person zu reduzieren. Zur Umsetzung dieses Kernziels wurden mehrere Gesetze und Verordnungen erlassen. Diese betreffen die Industrie sowie auch den privaten Sektor. Die neuen Richtlinien schaffen Anreize für Einzelpersonen sowie auch für Unternehmen den Energieverbrauch zu optimieren/reduzieren (BfE, 2023).

2.1.2 quantitative Ziele und Massnahmen

Um das Hauptziel der Energiestrategie2050, den Umstieg auf erneuerbare Energien bis 2050 zu realisieren, wurden Massnahmen und quantitative Ziele formuliert. Die folgende Tabelle präsentiert die wichtigsten Massnahmen und quantitativen Ziele der Energiestrategie2050.

Ausstieg Kernenergie:	Ausbau erneuerbare Energien	Steigerung Energieeffizienz
<ul style="list-style-type: none"> - keine Neubauten - Betrieb bestehender nur so lange Sicherheit gewährleistet (Entscheid ENSI) bereits stillgelegt: <ul style="list-style-type: none"> - Mühleberg 2019 noch in Betrieb: <ul style="list-style-type: none"> - Beznau I (seit 1969) - Beznau II (seit 1971) - Gösgen (seit 1979) - Leibstadt (seit 1984) 	neues Fördermodell PV: <ul style="list-style-type: none"> - Einmalvergütung Landwirtschaftsschutz: <ul style="list-style-type: none"> - Güterabwägung Ausbauprojekte und Reservekraftwerk: <ul style="list-style-type: none"> - 250 MW Reservekraftwerk - Birr AG (BfE, Reservekraftwerke, 2023)	Mobilität: <ul style="list-style-type: none"> - verschärfte Emissionsvorschriften seit 2021 Gebäudeprogramm: <ul style="list-style-type: none"> - CO₂ – Abgabe - steuerliche Anreize für Sanierung - intelligente Stromzähler (SmartMeter)

Tabelle 4: quantitative Ziele der Energiestrategie2050 ²

Die Bewertung und Kontrolle der Umsetzungsmassnahmen wird gemäss BfE im Fünfjahreszyklus evaluiert. Für das Jahr 2035 wurden gemäss Bundesamt für Energie folgende Detailziele definiert. (BfE, Energiestrategie2050, 2023)

Ziele gesamte Schweiz für 2035:		Ziele pro Person für 2035:	
∅ erneuerbare Energieproduktion (ohne Wasserkraft)	11'400 GWh	Senkung ∅ des Energieverbrauchs	* 43%
∅ Produktion Wasserkraft	37'400 GWh	Senkung ∅ des Stromverbrauchs	* 13%

Tabelle 5: quantitative Ziele der Energiestrategie2050 für 2035 (BfE, Energiestrategie2050, 2023)

*** Wichtig!** Die relativ formulierten Ziele sind in Bezug auf das Referenzjahr 2000 zu betrachten!

Die quantitativen Ziele dienen als Leitfaden für die Umsetzung der Energiestrategie2050. Die Ziele sind kostenintensiv, anspruchsvoll und aufwendig, jedoch dienen sie als Grundlage für eine in die Zukunft gerichtete, nachhaltige Energieversorgung in der Schweiz (BfE, Energiestrategie2050, 2023).

² (Energieexperten, Massnahmen der Energiestrategie2050, 2023)

2.1.3 Instrumente der Energiestrategie2050

Um die Ziele der Energiestrategie erfolgreich zu realisieren, hat die Schweizer Politik eine Reihe von regulatorischen, marktorientierten und finanziellen Instrumenten eingeführt. In folgenden Teilkapiteln werden die Instrumente erläutert. (BfE, Instrumente Energiestrategie, 2023)

2.1.3.1 politische & regulatorische Instrumente

Die politischen und regulatorischen Instrumente beinhalten die Einführung neuer Gesetze und Verordnungen, die Anpassung bestehender Gesetze sowie die Umsetzung von Förderprogrammen. Zu den politischen und regulatorischen Instrumenten gehören beispielsweise das Energiegesetz EnG und die Energieverordnung EnV. Sie stellen die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien und die Steigerung der Energieeffizienz dar. Weiter beinhaltet sie spezifische Programme zu Energieeffizienz in Gebäuden und Industrie. (BfE, Energiestrategie2050, 2023)

2.1.3.2 finanzielle Instrumente

Auch umfasst die Energiestrategie2050 eine Reihe von finanziellen Instrumenten. Es wurde, um die Kosten für Investitionen finanzieren zu können, eine Erhöhung des Netzzuschlags im EnG definiert. Der Netzzuschlag beträgt **2.3 Rp. pro kWh** (BfE, Energiestrategie2050, 2023). Der Zuschlag spielt eine wesentliche Rolle bei der Finanzierung der eingeleiteten Massnahmen. Die Verwendung des erhobenen Netzzuschlags wird in folgender Abbildung dargestellt.

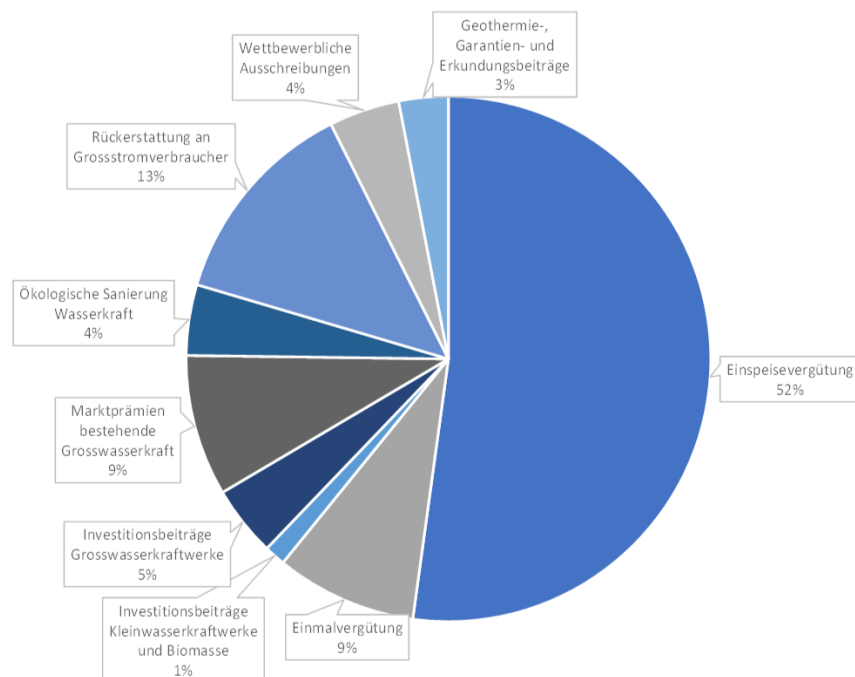


Abbildung 1: Verwendung des Netzzuschlags (BfE, Energiestrategie2050, 2023)

2.1.3.3 marktorientierte Instrumente

Marktorientierte Instrumente schaffen Anreiz für Privatpersonen und Industrie, in erneuerbare Energien und Steigerung der Energieeffizienz zu investieren. Dazu gehören beispielweise die Liberalisierung des Elektrizitätsmarkts, die Einführung von Preissignalen sowie die Miteinbeziehung von externen Kosten für umweltschädliches Verhalten.

Die Energiestrategie2050 setzt auf eine Kombination von politischen, regulatorischen, finanziellen und marktbasierten Instrumenten und hat bereits wesentlich zur Förderung von erneuerbaren Energien und zur Steigerung der Energieeffizienz beigetragen. (BfE, Energiestrategie2050, 2023)

2.2 Elektrizitätsmarkt-Schweiz

Der Elektrizitätsmarkt der Schweiz ist sehr vielfältig und komplex aufgebaut. Mit einem Jahresumsatz von 44.24 Milliarden CHF ist der Markt ein bedeutender und grundlegender Sektor der Schweizer Wirtschaft (Statista.com, 2023).

2.2.1 Elektrizitätsversorgung

Die Schweiz verfügt über ein modern ausgebautes Elektrizitätsnetz, welches in sieben unterschiedliche Netzebenen unterteilt ist. Auf der ersten Ebene befindet sich das Übertragungsnetz, es verbindet mit rund 6'700km Leitungen Kraftwerke und Unterwerke. Das Übertragungsnetz verfügt über 41 Grenzleitungen ins Ausland und verfügt somit Zugang zu dem internationalen Handelsmarkt. Betrieben wird es von Swissgrid. Das Unternehmen ist dabei der alleinige Übertragungsnetzbetreiber und zuständig für die Überwachung und Steuerung des Elektrizitätsnetzes. Ebenso ist Swissgrid für die Sicherstellung der Netzstabilität und die Aufrechterhaltung der Schweizer Stromversorgung verantwortlich. In der folgenden Abbildung wird das Schweizer Übertragungsnetz mit den drei unterschiedlichen Höchstspannungsebenen dargestellt. (Swissgrid, 2023)

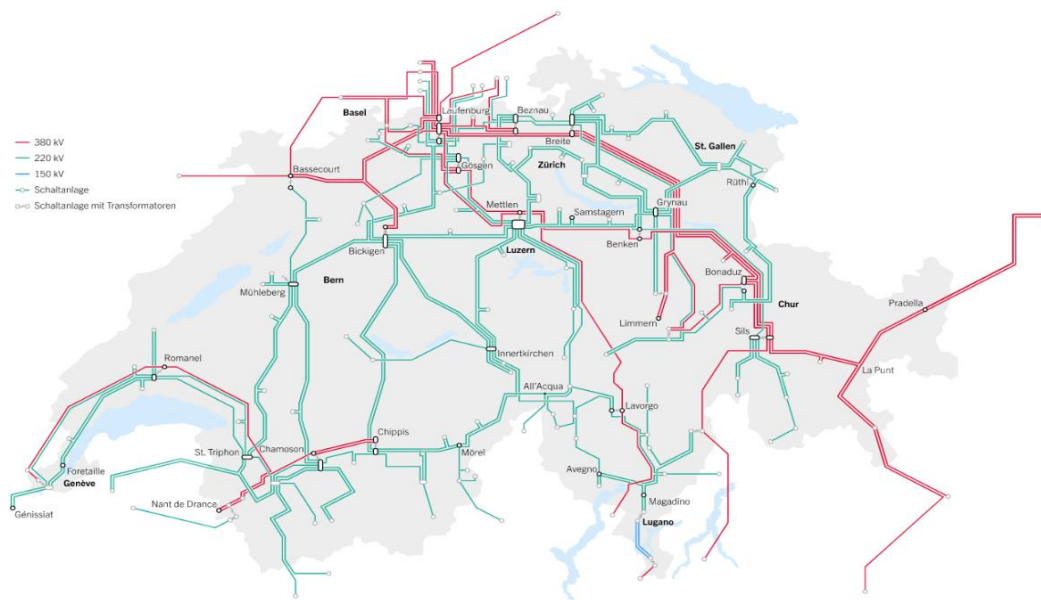


Abbildung 2: Übertragungsnetz Schweiz (Swissgrid, 2023)

Auf den unteren Netzebenen befinden sich die Verteilnetze, sie sind dafür zuständig, dass die Elektrizität vom Übertragungsnetz sicher zum Endverbraucher befördert wird. Die Gewährleistung einer stabilen und zuverlässigen Stromversorgung ist das Resultat des Zusammenspiels der Übertragungsnetzbetreiber und Verteilnetzbetreiber. Durch gemeinsames Zusammenarbeiten wird ein optimales Ergebnis erreicht, sodass die Bedürfnisse der Industrie und Bevölkerung erfüllt werden und die Stromnachfrage stets abgedeckt werden kann. (Swissgrid, 2023)

2.2.2 inländische Stromproduktion

Die Schweiz ist in der Lage den grössten Teil des vorhandenen Strombedarfs aus einem vielfältigen Produktionsmix von verschiedenen Energiequellen zu decken. Der bedeutendste Energieträger der Schweiz ist Wasserkraft. Nachfolgende Abbildung repräsentiert den Stromproduktions-Mix der inländischen Elektrizitätsgewinnung. (VSE, 2023)

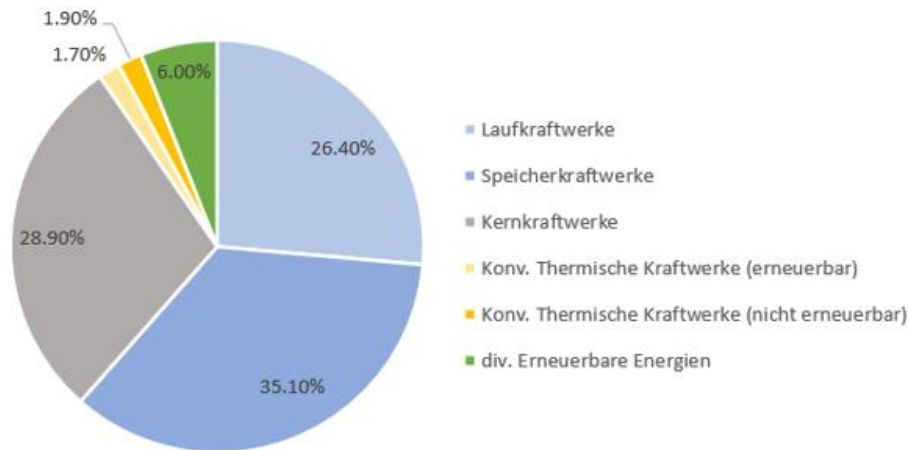


Abbildung 3: Stromproduktions-Mix Schweiz (VSE, 2023)

Die geographische Lage der Schweiz ist bei der Energiegewinnung besonders vorteilhaft. Es wird überdurchschnittlich viel Elektrizität mit Wasserkraft produziert. Über 60 % der gesamt produzierten Elektrizität in der Schweiz stammen aus Wasserkraft (EDA, 2023). Die Grafik veranschaulicht, dass die Kernenergie mit dem zweitgrössten Anteil von 28.9% zur Schweizer Stromproduktion beiträgt. Das Kernziel der Energiestrategie2050 ist es diesen Anteil in den folgenden 27 Jahren mit nachhaltigen Stromquellen zu substituieren oder zusätzlich zu importieren. Die konventionelle Energiegewinnung trägt im Verhältnis zur Gesamtproduktion nur einen geringen Anteil zur Produktion bei. Zuletzt wird der Produktions-Mix ergänzt durch die erneuerbaren Energien Solar- und Windenergie. Diese tragen mit 6 % ebenso nur geringen Beitrag zur Gesamtproduktion bei.

2.2.3 Entwicklung der Elektrizitätsnachfrage

Historisch betrachtet stieg die Schweizer Elektrizitätsnachfrage beinahe kontinuierlich an. Dies ist auf verschiedene Faktoren und Ursachen zurückzuführen. Zum einen wird wegen des kontinuierlich fortschreitenden technologischen Fortschrittes immer mehr Elektrizität nachgefragt. Mit jeder Innovation und entstehen zusätzliche Energieverbraucher, dies führt zu einer stetig wachsenden Stromnachfrage. Zum anderen trägt das kontinuierliche Bevölkerungswachstum zur wachsenden Elektrizitätsnachfrage bei. Eine grössere Bevölkerung erfordert mehr Wohnraum, Transport und Infrastruktur. Dies trägt erheblich am beinahe stetigen Wachstum der Elektrizitätsnachfrage bei (AvenirSuisse, 2023).

In Bezug auf die Energiestrategie2050 liegt der Fokus des Elektrizitätsverbrauchs im Jahre 2000. In diesem Jahr betrug die Schweizer Nachfrage **51'000 GWh** (BfE, Energiestrategie2050, 2023). Dieser Wert dient als Ausgangspunkt für die Berechnungen und Zielsetzungen der Energiestrategie2050. Das BfE hat in dem Szenario Energieperspektiven2050 eine potenzielle Nachfrageentwicklung prognostiziert. Diese Entwicklung wird zu einem späteren Zeitpunkt der Bachelorarbeit detailliert erläutert.

Die historischen Daten des Schweizer Strombedarfs zeigen gemäss dem Bundesamt für Energie eine kontinuierliche Zunahme bis ins Jahr 2006. In nachfolgender Abbildung wird der absolute Stromnachfrage der vergangenen Jahre dargestellt.

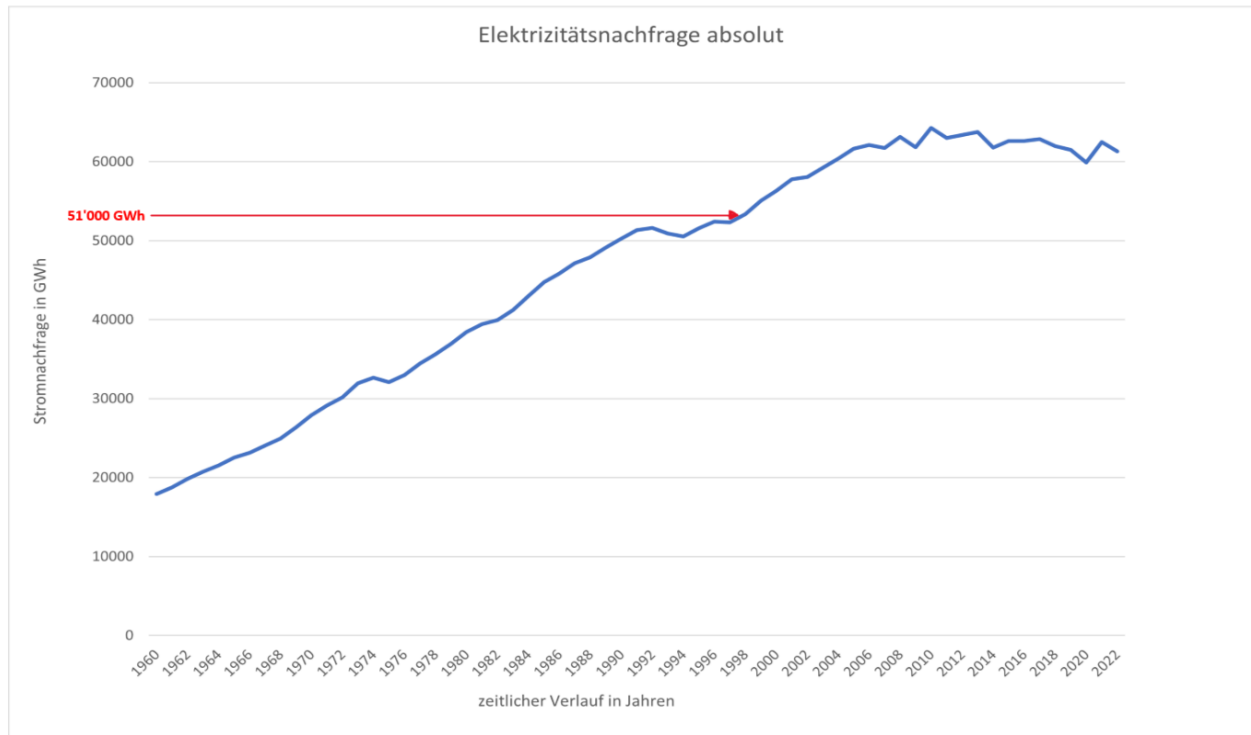


Abbildung 4: historische Elektrizitätsnachfrageentwicklung der Schweiz ³

Beginnend mit der Stromnachfrage von 17.9 TWh im Jahr 1960, zeigt die Grafik eine stetige Zunahme des Schweizer Strombedarfs in den folgenden Jahrzehnten. Im Jahr 1980 wurde erstmals eine absolute Stromnachfrage in der Schweiz von 38.5 TWh erreicht. Die stetige Zunahme setzte sich bis ins Jahr 2006 fort, in welchem ein Maximum von 62.1 TWh erreicht wurde. Anschliessend zeigt der historische Verlauf eine gewisse Volatilität. Dies beruht auf verschiedenen Faktoren, wie Änderungen in Wirtschaftsaktivitäten, Energieeffizienzmassnahmen und Veränderungen in der Energiepolitik. Trotz erhöhter Volatilität bleibt der allgemeine Trend einer steigenden Stromnachfrage jedoch auch zukünftig bestehen. Im Jahr 2022 betrug die absolute Nachfrage 61.3 TWh. Dies stellt einen leichten Rückgang gegenüber dem Vorjahr dar, bleibt aber dennoch im Vergleich zum Jahr 2000 auf einem sehr hohen Niveau. Ebenso ist zu bemerken, dass trotz des Trends zu mehr Energieeffizienz und dem zunehmenden Einsatz erneuerbarer Energien die absolute Stromnachfrage in der Schweiz nach wie vor eher zunehmend ist (BfE, Energiestatistiken, 2023). Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass die historische Entwicklung der Stromnachfrage in der Schweiz durch eine stetige Zunahme gekennzeichnet ist, jedoch mit periodischen Schwankungen, die auf eine Reihe von Faktoren zurückzuführen sind. Die Zunahme der Nachfrage nach Elektrizität korreliert ebenso mit dem technologischen Fortschritt, insbesondere in Bereichen wie der verstärkten Implementierung von Wärmepumpensystemen und der Ausweitung der Elektromobilität.

2.2.4 Volatilität der Elektrizitätsnachfrage (Saisonalität)

Die aktuell in der Schweiz zu erwartende Stromnachfrage dient als Ressource und Basis für das in der Projektarbeit erstellte Modell. Die Nachfrage ist nicht konstant und teils starken Schwankungen ausgesetzt. Die Elektrizitätsnachfrage zeigt eine hohe Abhängigkeit von meteorologischen und saisonalen Faktoren. Diese Abhängigkeit gilt es für die erfolgreiche Realisierung der Energieziele der Energiestrategie2050 zu berücksichtigen.

³ (BfE, Energiestatistiken, 2023)

In der nachfolgenden Abbildung wird die saisonale und die metrologische Abhängigkeit der Schweizer Stromnachfrage während des Jahres 2022 dargestellt. (BfE, Energiestatistiken, 2023)

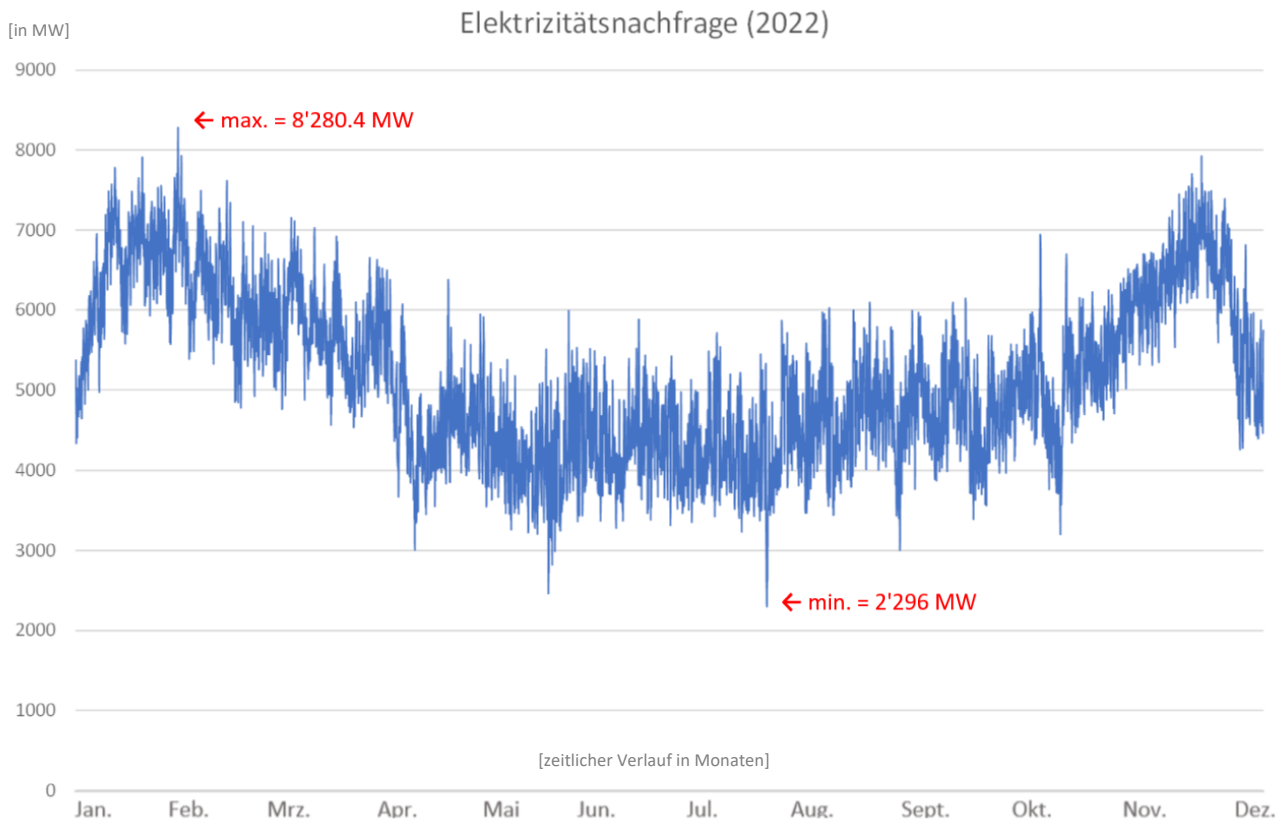


Abbildung 5: schwankende Elektrizitätsnachfrage stündlich für das Jahr 2022 ⁴

Die horizontale Achse veranschaulicht den Verlauf eines Jahres in Monaten. Auf der vertikalen Achse der Grafik wird der Strombedarf in MW dargestellt. Die jährliche Stromnachfrage der Schweiz weist eine erhöhte Variabilität auf und ist somit nicht konstant im Verlauf der Zeit. Dies führt zu Spitzenlasten und Erholungsphasen. Die Abbildung unterstreicht ebenso die Herausforderung, den schwankenden Strombedarf zu decken. Auch ist der erhöhte Strombedarf in den Wintermonaten bzw. am Anfang und Ende des Jahres ersichtlich. Angesichts des erwarteten Ausbaus zusätzlicher erneuerbarer Energiequellen, ist anzunehmen, dass diese Schwankungen in Zukunft besonders in den Wintermonaten in ausgeprägter Form auftreten. Der maximal stündliche Strombedarf im Jahr 2022 liegt bei 8'280.4 MWh und wurde anfangs Februar nachgefragt. Das absolute Minimum wurde im Sommer mit 2'296.03 MW erreicht (BfE, Energiestatistiken, 2023).

2.2.5 absolute Zahlen: Elektrizitätsmarkt Schweiz (2022)

Im Jahr 2022 betrug der Gesamtstromverbrauch der Schweiz 61,3 Terawattstunden TWh. Gemäss den Daten des Bundesamtes für Energie wird erwartet, dass sich die absolute Stromnachfrage bis zum Jahr 2050 signifikant verändern wird.

Die nachfolgende Tabelle, basierend auf Daten des Bundesamtes für Energie (BfE, Energiestatistiken, 2023), gibt einen detaillierten Überblick über die monatliche Stromnachfrage, den erforderlichen Stromimport, die mit Kernenergie erzeugte Leistung sowie die gesamte Stromproduktion der Schweiz im Jahr 2022 in GWh.

⁴ (BfE, Energiestatistiken, 2023)

Einheiten: [in GWh]	Stromnachfrage		Import	Kernenergie	Gesamte Stromproduktion
Jan.	6'169		+1'124	2'205	5'362
Feb.	5'474		+1'285	1'989	4'492
März	5'607		+1'044	2'191	4'855
Apr.	4'984		+244	2'104	5'114
Mai	4'772		-583	1'644	5'778
Juni	4'640		-135	746	5'226
Juli	4'487		-902	1'706	6'013
Aug.	4'566		-663	1'966	5'826
Sept.	4'700		-183	2'071	5'387
Okt.	4'808		+37	2'170	5'375
Nov.	5'276		+972	2'121	4'789
Dez.	5'837		+1'143	2'200	5'287
Total	61'320		+3'383	23'113	63'504
Verluste					4'290
Bilanz	61'320 GWh				59'214 GWh

Tabelle 6: absolute Stromdaten im Jahr 2022 (BfE, Energiestatistiken, 2023)

Die Tabelle verdeutlicht den erhöhten Bedarf an Importstrom während den Wintermonaten. Im Sommer wird die Stromproduktion durch verschiedene Faktoren wie verstärkte Sonneneinstrahlung, die die Leistung von PV-Anlagen erhöht, und erhöhter Wasserdurchfluss durch Schneeschmelze intensiviert. Im Jahr 2022 betrug der Gesamtverlust durch die Übertragung und die Transformation der elektrischen Energie 4.290 GWh. Aus Kernenergie gewonnene elektrische Leistung belief sich auf 23.113 GWh, was 28,9% der gesamten in der Schweiz erzeugten Elektrizität entspricht. Die aktuelle Situation verdeutlicht die Abhängigkeit von Kernenergie. Die Gesamtleitung der Kernenergie gilt es in Zukunft durch nachhaltige Alternativen zu ersetzen, idealerweise ohne erhebliche Stromimporte.

Die Differenz zwischen der Produktion (abzüglich der Verluste) und der Nachfrage betrug -2.106 GWh, was darauf hinweist, dass die Schweiz im Jahr 2022 mehr Strom importierte als exportierte und somit eine negative Elektrizitätsbilanz für das Jahr 2022 nachwies (BfE, Energiestatistiken, 2023). Diese Informationen unterstreichen die Herausforderung, eine sichere und nachhaltige Stromversorgung in der Schweiz aufrechtzuerhalten, während gleichzeitig die Umstellung auf erneuerbare Energien ausgebaut wird (BfE, Energiestrategie 2050, 2023).

2.2.6 Herausforderungen des Elektrizitätsmarkt

Die Schweizer Energieversorgung steht vor diversen Herausforderungen. Einerseits muss das Energieversorgungsnetz stetig instandgehalten werden, andererseits erfordert das Netz Investitionen in neue Technologien und zusätzliche Infrastrukturen zur erfolgreichen Umsetzung der Energiestrategie 2050. In folgenden Teilkapiteln werden die Herausforderungen in Bezug auf das Projektthema beschrieben.

2.2.6.1 Integration erneuerbarer Energiequellen

Die Integration erneuerbarer Energiequellen in das Schweizer Energieversorgungsnetz ist komplex. Durch die neuen lokalen Energieproduzenten wird die Elektrizitätsversorgung der Schweiz vermehrt ansteigend föderalistisch gestaltet. Die Netzanbindung stellt eine erhebliche Herausforderung für den Schweizer Elektrizitätsmarkt dar, da sie keine konstante Produktion gewährleistet. Im Gegensatz zur traditionellen Energiegewinnung, besteht die zukünftige Energieversorgung aus einer Vielzahl von zunehmend kleineren Produktionskraftwerken (Epexspot.com, Marktintegration erneuerbarer Energien, 2023).

2.2.6.2 Winterstromlücke

Eine zentrale und komplexe Herausforderung ist die Winterstromlücke. Der Begriff bezeichnet das saisonale Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage an elektrischer Energie im Winter, das durch verschiedene Faktoren bedingt ist. Zum einen führen die niedrigeren Temperaturen im Winter zu einem signifikant erhöhten Energiebedarf für Heizungszwecke, insbesondere in Wohn- und Geschäftsräumen. Gleichzeitig fällt die Leistung der erneuerbaren Energiequellen in den Wintermonaten geringer aus. Die verkürzte Tageslichtdauer und die ungünstigen Wetterbedingungen tragen dazu bei, dass die Produktion von Solarenergie im Winter erheblich zurückgeht. Dies führt zu einer saisonal bedingten Verringerung der gesamten in der Schweiz erzeugten Elektrizität.

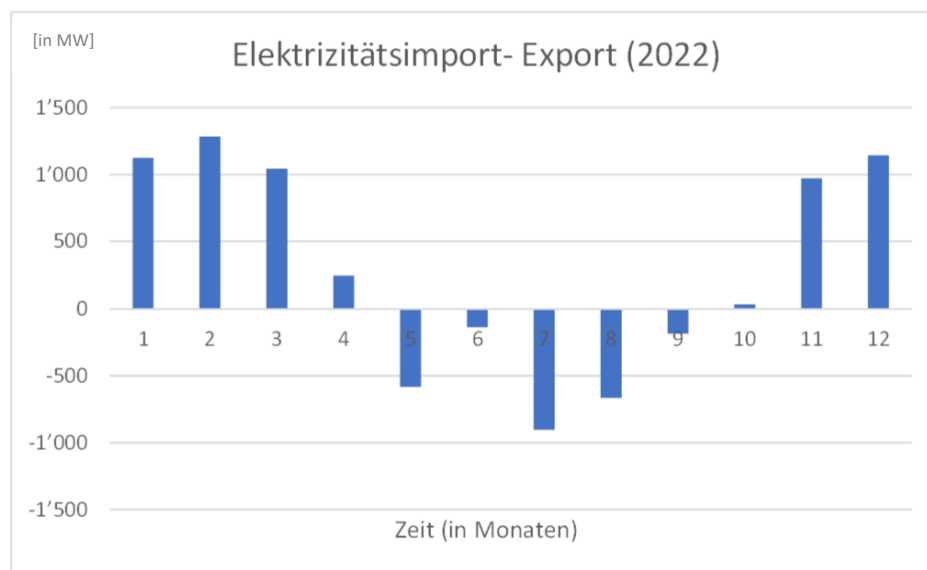


Abbildung 6: Elektrizitätsimport- Export für das Jahr 2022 (BfE, Energiestatistiken, 2023)

Das absolute Stromdefizit für den Winter 2022 (von November bis März) belief sich auf **5'568 GWh** (BfE, Energiestatistiken, 2023) und wird im vorangegangenen Kapitel 2.2.5 in der Tabelle explizit hervorgehoben. Um diese Lücke zu schliessen, hat die Schweiz auf zusätzliche Stromimporte zurückgegriffen (Energie360.ch, 2023). Die Abhängigkeit von Importstrom führt zu einer Reihe von Problemen. Zunächst erhöht sie die Unsicherheit in der Energieversorgung, da die Schweiz dadurch von der Verfügbarkeit, Preisstabilität und Zuverlässigkeit ausländischer Märkte abhängig wird. Darüber hinaus fallen durch die Stromimporte zusätzliche Kosten an, die nicht nur finanzieller, sondern auch ökologischer Natur sind. Der Transport von elektrischer Energie über grosse Distanzen ist mit Energieverlusten verbunden und erfordert Infrastrukturen, deren Errichtung und Unterhaltung Ressourcen verbrauchen und ebenso Umweltauswirkungen haben. Auch führt der Import von Elektrizität aus den Nachbarländern unter Umständen zu erhöhten CO₂-Emissionen. Dies widerspricht den Zielen der Energiestrategie2050.

2.3 Python

Python ist eine Programmiersprache, die für ihre Einfachheit, Lesbarkeit und klare Syntax bekannt ist. Sie findet Anwendung in verschiedenen Bereichen wie Datenanalyse, Webentwicklung, Künstlicher Intelligenz, Spieleentwicklung und Automatisierung. Als plattformübergreifende und Open-Source-Programmiersprache ist Python auf verschiedenen Betriebssystemen anwendbar, und ihr Quellcode ist öffentlich einsehbar, modifizierbar und teilbar. Diese Merkmale tragen zu ihrer Beliebtheit und weit verbreiteten Nutzung bei. (Bigdata-Insider, 2023)

2.3.1 Bibliotheken / Pakete

Eine zentrale Eigenschaft von Python ist die Unterstützung einer Vielzahl von Bibliotheken oder Paketen. Diese stellen vorgefertigte Methoden und Funktionen zur Verfügung, die die Entwicklung komplexer Anwendungen erheblich erleichtert und beschleunigt (Bigdata-Insider, 2023). In dieser Bachelorarbeit sind insbesondere diejenigen Bibliotheken von Interesse, die für die Modellierung und Optimierung relevant sind. Folgende werden in Kapitel 5 detaillierter umschrieben.

2.3.2 Funktionen & Methoden

In der Programmiersprache Python sind Funktionen und Methoden zwei grundlegende Konzepte, die eine entscheidende Rolle in der Strukturierung und Modularisierung eines Codes spielen. Die Konzepte ermöglichen es, dass bestimmte Operationen wiederverwendet werden können, was zur Klarheit und Effizienz des Programmcodes beiträgt. Eine Funktion in Python ist ein blockierter Code, der nur ausgeführt wird, wenn er aufgerufen wird. Die Parameter einer Funktion sind die Eingangsdaten, die verarbeitet werden. Die zurückgegebenen Werte stellen das Ergebnis der Verarbeitung dar. Eine Methode in Python ähnelt einer Funktion, da sie auch ein blockierter Code ist, der eine spezifische Aufgabe ausführt. Der Hauptunterschied jedoch besteht darin, dass eine Methode immer mit einem Objekt verknüpft. Funktionen und Methoden sind die Grundbausteine der OOP (Bigdata-Insider, 2023).

2.3.3 Variablen & Parameter

Variablen dienen als lokale Speicherorte für Daten, deren Werte während der Laufzeit eines Programms geändert werden. Parameter hingegen sind Variablen, die in der Definition einer Funktion verwendet werden und dazu dienen, Werte in die Funktion zu übergeben. Die korrekte Verwendung von Variablen und Parametern ist entscheidend für die erfolgreiche Implementierung und Ausführung von Python-Anwendungen. Die in Python eingebundenen Konzepte von Variablen und Parametern ermöglichen eine effiziente Handhabung und Operation von Daten. Sie sind entscheidend für die erfolgreiche Modellierung im Rahmen der Forschungsarbeit (Bigdata-Insider, 2023).

2.3.4 Schleifen

In Python gibt es verschiedene Schleifenstrukturen. Schleifen dienen dazu, bestimmte Blöcke von Code mehrmals auszuführen zu lassen. Hier sind die zwei wichtigsten Arten von Schleifen in Python:

- **For-Schleifen:** For-Schleifen sind vielseitig. Sie können über Sequenzen (wie Listen und Strings) oder über andere iterierbare Objekte iterieren (Bigdata-Insider, 2023).
- **While-Schleifen:** Eine While-Schleife wird so lange ausgeführt, wie eine bestimmte Bedingung erfüllt ist (Bigdata-Insider, 2023).

2.4 Zwischenfazit

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde bisher ein umfassendes Verständnis für das Energiesystem der Schweiz und seine geplante Umsetzung im Kontext der Energiestrategie2050 erarbeitet. Die Energiestrategie2050 stellt einen soliden Plan für die Umstellung des Schweizer Energiesektors dar, wobei erneuerbare Energien dabei eine zentrale Rolle in der Zukunft der Energieversorgung spielen. Die für diese Bachelorarbeit wichtigen quantitativen Ziele der Strategie wurden dokumentiert, ebenso wie die Herausforderungen, insbesondere dem Stromdefizit im Winter, das sich bei der Integration erneuerbarer Energiequellen in das bestehende Versorgungsnetz ergibt.

Die aktuelle Infrastruktur der Schweiz zeichnet sich durch ein gut vernetztes und umfangreiches Netzwerk von Hoch- bzw. Höchstspannungsleitungen aus. Die gegenwärtige Stromerzeugung beruht auf einer Vielzahl von Quellen, wobei Wasserkraft und Kernenergie derzeit eine bedeutende Rolle spielen. Um den Übergang zu erneuerbaren Energien zu ermöglichen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit aufrechtzuerhalten, muss die Schweiz ihre Abhängigkeit von Kernenergie und Stromimporten reduzieren. Daher ist die Modellierung von Stromengpässen, insbesondere auf die Winterzeit betrachtet, ein wichtiger Aspekt dieser Bachelorarbeit. Für die Entwicklung effektiver Strategien zur Integration erneuerbarer Energien und zur Reduzierung der Winterstromlücke kann Python als Werkzeug für die Modellierung von Optimierungsproblemen verwendet werden. Dies ermöglicht verschiedene Szenarien zu simulieren und den optimalen Mix für den Zubau erneuerbarer Energien zu bestimmen.

Mit diesen Grundlagen kann eine umfassende Analyse der Herausforderungen und Möglichkeiten im Schweizer Energiesektor durchgeführt werden. Die Einblicke in die aktuelle Situation und die zukünftigen Ziele der Schweizer Energiepolitik ermöglichen es Empfehlungen für den optimalen Mix von erneuerbaren Energien zu formulieren. Damit kann die Projektarbeit dazu beitragen, den Energiesektor der Schweiz erfolgreich und nachhaltig in die Zukunft zu führen.

3 Methodik

In diesem Kapitel wird die für diese Bachelor-Diplomarbeit angewandte Methodik ausführlich beschrieben. Es erfolgt eine Erklärung des Vorgehens der Literatur- und Datenrecherche. Es wird die Bedeutung der Modellierung insbesondere der linearen Optimierung im Kontext dieser Forschungsarbeit verdeutlicht. Auch wird gezeigt, wie mit Hilfe eines linearen Optimierungsmodells, mögliche Szenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien im Schweizer Energiemarkt entwickelt werden können. Die Ergebnisse der Optimierungsaufgabe bilden die Entscheidungsgrundlage für den optimalen Strommix und den zukünftigen Ausbau erneuerbaren Energiequellen.

3.1 Datenrecherche

Die Datenrecherche ist ein wesentlicher Bestandteil und eine Methode dieser Projektarbeit. Sie ist die Grundlage für die Ergebnisse des Basismodells und dient als Input für das Optimierungsmodell. Eine umfassende und solide Datenrecherche ermöglicht eine qualitative Analyse und Prognose. Um passende Daten zu finden, bestehen mehrere Möglichkeiten. Zum einen ist die Nutzung von öffentlich zugänglichen Datenbanken, Archivmaterial, Berichten, wissenschaftlichen Publikationen und sozialen Medien etc. eine Möglichkeit geeignete Daten zu finden. Zum anderen können auch primäre Daten durch Interviews, Fragebogen, Experimente oder direkte Beobachtungen etc. erhoben werden. Um sicherzustellen, dass alle notwendigen Daten gesammelt und konsistent erhoben werden, ist eine klare und systematische Vorgehensweise erforderlich. Eine effektive Datenrecherche umfasst die Formulierung und Definition der eigentlichen Ziele, die Festlegung bestimmter Kriterien, der Entscheidung für Tools und Instrumente, sowie der Planung und Umsetzung des Vorgehens (Günther, Methoden der Datenrecherche, 2023).

Eine Datenrecherche kann mit Hilfe von verschiedenen Strategien durchgeführt werden. Zur weiteren Veranschaulichung des Vorgehens einer umfassenden Datenrecherche dient folgende Abbildung.



Abbildung 7: Methoden zur Datenrecherche ⁵

Das Vorgehen besteht darin, dass zu Beginn die eigentlichen Ziele formuliert und definiert werden. Anschliessend werden Kriterien festgelegt und es wird entschieden, mit welchen Tools und Instrumenten die Recherche durchgeführt wird. Zuletzt wird das Vorgehen geplant und durchgeführt. (Günther, Methoden der Datenrecherche, 2023)

⁵ (Günther, Methoden der Datenrecherche, 2023)

3.2 Literaturrecherche

Eine umfassende Literaturrecherche ist erforderlich, um ein tieferes Verständnis in das Projektthema zu erlangen. Das gesammelte Wissen und die recherchierten Informationen dienen als Ausgangslage bzw. Grundlage für die weiteren Modellierungen und Simulationen.

3.2.1 systematische Suche

Die systematische Suche ist eine Methode der Recherche nach bestimmten themenverwandten und abgeleiteten Schlüsselwörtern. Die wichtigsten Bücher, Magazine, Zeitschriften, sowie auch weitere Medien werden grob durchsucht und quergelesen. Dies verschafft einen ersten guten Überblick in das Themengebiet. Die systematische Suche eignet sich besonders gut für die Suche nach bestimmten Einzelinformationen. Die Recherche erfolgt dabei mit Hilfe von Schlagworten. (Kache, Leitfaden Literaturrecherche, 2023, S. 10) Eine systematisch durchgeführte Literaturrecherche liefert eine breite Menge an relevanten Quellen für diese Projektarbeit. Zu Beginn der Recherche werden Begriffe definiert, mit welchen verschiedenen Plattformen wie Bing, Google, Swiscovery, Google Scholar etc. durchforscht werden. Nachfolgend werden einige relevante Schlagworte aufgezählt.

- Energiestrategie2050
- Abhängigkeiten des Schweizer Elektrizitätsmarkts
- Schweizer Strombedarf
- Geplante Projekte zum Ausbau erneuerbarer Energien
- Stromimport Bilanz
- Energiestatistiken / Stromverbrauchzunahme

3.2.2 vorwärts gerichtete Suche

Die vorwärts gerichtete Suche benötigt ein zentrales Werk, welches den Start der Suche ermöglicht. Man recherchiert themennahe Literatur und untersucht diese anschliessend ins Detail. Das Vorgehen verläuft dabei folgendermassen: Sie beginnt mit einer geeigneten und möglichst aktuellen Quelle. In dieser Literatur wird das Literaturverzeichnis nach Quellen bzw. Autoren durchsucht, um dadurch weitere Quellen zu finden. Trifft man eine bestimmte Quelle wiederholt in unterschiedlichen Literaturverzeichnissen, ist dies eine Hinweis darauf, dass die Quelle vertrauenswürdig ist. (Kache, Leitfaden Literaturrecherche, 2023)

3.2.3 Kombination

Die beiden Methoden sind in Kombination sehr hilfreich, um eine umfassende Literaturrecherche für diese Projektarbeit durchführen zu können. Grundsätzlich wird zu Beginn der Recherche ein Überblick in das Themengebiet verschafft. Dabei ist es zu Beginn nicht unbedingt notwendig alle Quellen detailliert zu lesen. Es sollte erstmal der Inhalt der Dokumente in seiner Breite durchforscht werden, um den Zeitaufwand möglichst gering zu halten. Anschliessend wird der Wissensstand in die wesentlichen Teilbereiche vertieft. Hier drei grundlegende Strategieempfehlungen (Kache, Leitfaden Literaturrecherche, 2023, S. 10)

1. Vom **Allgemeinen** zum **Speziellen**
2. Vom **Aktuellen** zum **Älteren**
3. Von **kurzen** zu **langen Werken**

3.3 Modellierung

Modellierung ist eine wissenschaftliche Tätigkeit, deren Ziel es ist, einen bestimmten Teil oder ein bestimmtes Merkmal leichter verständlich, zu definieren, zu quantifizieren, zu visualisieren oder zu simulieren. Eine erfolgreiche Modellierung erfordert die Identifikation relevanter Aspekte einer realen Situation und die anschließende Entwicklung / Abbildung in Form eines Modells.

3.3.1 Modell

Ein Modell ist eine vereinfachte Darstellung oder Beschreibung eines komplexen Systems oder einer komplexen Situation. Ein Modell dient dazu, bestimmte Aspekte des Systems oder der Situation zu analysieren und zu verstehen, um aufgrund dessen Entscheidungen zu treffen. Modelle können in verschiedenen Formen vorliegen beispielweise in Form von Computermodellen, mathematischen Gleichungen, Diagrammen, Zeichnungen, Simulationen oder auch physischen Modellen. Beim Erstellen von Modellen gelten folgende sechs Grundsätze: (Hans Robert Hansen, 2019)

1. Grundsatz der **Richtigkeit**
2. Grundsatz der **Relevanz**
3. Grundsatz der **Wirtschaftlichkeit**
4. Grundsatz der **Klarheit**
5. Grundsatz der **Vergleichbarkeit**
6. Grundsatz des **systematischen Aufbaus**

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sind alle sechs Grundsätze zur Modellerstellung relevant und müssen bei der Modellerstellung beachtet werden, um ein möglichst solides Forschungsergebnis zu erzielen.

3.3.2 mathematische Entscheidungsmodelle

Ein mathematisches Modell dient als abstrakte Abbildung einer Situation oder Systems und ermöglicht es, das Verhalten mithilfe von mathematischen Gleichungen oder Funktionen zu beschreiben und zu analysieren. Der Prozess der Modellbildung benötigt die Identifikation der relevanten Variablen und deren Beziehungen innerhalb des Systems. Durch die Quantifizierung dieser Eigenschaften und lassen sich komplexe Zusammenhänge vereinfacht darstellen. Mathematische Modelle sind in vielen wissenschaftlichen Anwendungsbereichen von hoher Bedeutung. Sie ermöglichen es, das Verhalten von Systemen unter unterschiedlichen Bedingungen zu analysieren und Entscheidungen über die Optimierung eines Systems oder einer Situation zu treffen. (Math.Uni-Hamburg, 2023)

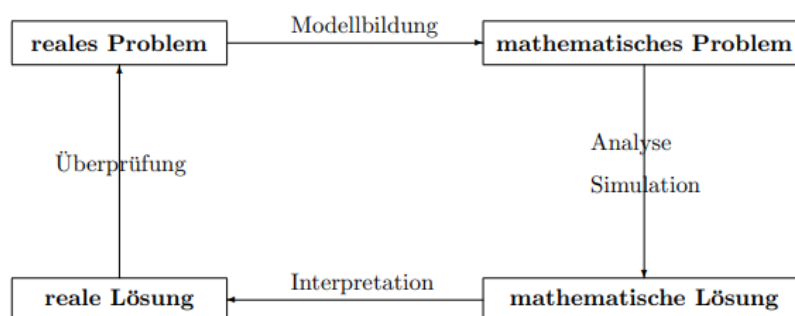


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines mathematischen Modellierungsprozess ⁶

⁶ (Math.Uni-Hamburg, 2023)

Die Erstellung eines mathematischen Entscheidungsmodells erfordert mehrere Schritte. Zunächst ist es notwendig, die Problemstellung und die Ziele der Modellierung klar zu definieren. Anschliessend müssen die Variablen und deren Beziehungen identifiziert und in mathematischer Form dargestellt werden. Dies erfolgt durch Gleichungen, Differentialgleichungen oder Funktionen. Die Gültigkeit des Modells sollte durch die Anwendung und Simulation überprüft werden. Es ist wichtig, die Ergebnisse des Modells kritisch zu bewerten und gegebenenfalls das Modell so anzupassen, dass eine bessere Lösung möglich ist. Die Qualität eines mathematischen Modells hängt von seiner Fähigkeit ab, das reale System oder Phänomen mit ausreichender Genauigkeit zu beschreiben. (Hans Robert Hansen, 2019)

3.3.3 lineare Optimierung

Lineare Optimierung ist eine Methode zur Optimierung einer linearen Funktion unter Berücksichtigung linearer Nebenbedingungen. Für den Fall der Optimierung bedeutet dies, dass die Zielfunktion und die Nebenbedingungs-Gleichungen/Ungleichungen linear voneinander abhängig sind. Lineare Optimierungsmodelle dienen dazu, eine optimale Lösung für ein mathematisches Problem zu finden. Es ist meist eine Darstellung eines realen Problems, bei dem bestimmte Ziele oder Bedingungen optimiert werden sollen. Ein Optimierungsmodell lässt sich im Allgemeinen wie folgt in zwei Gleichungen/Ungleichungen mathematisch beschreiben. (Wolfgang Domschke, 2015, S. 4-6)

$$\text{Maximiere / Minimiere: } z = F(x) \quad \text{unter den Nebenbedingungen: } g(x) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} 0$$

Die verwendeten Symbole haben folgende Bedeutung:

x	Variablenvektor mit n Komponenten $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$
$F(x)$	Zielfunktion bzw. Zielfunktionswert für den Variablenvektor x
$x \in \mathbb{R}$	Mengenbedingung der Variablen x

Tabelle 7: Symbolbeschreibung der Formeln (Wolfgang Domschke, 2015)

Die Funktion z ist die Zielfunktion, welche von x abhängig ist und maximiert/minimiert werden soll. Das Optimierungsproblem wird dargestellt in Form von Gleichungen und/oder Ungleichungen. Sehr allgemein lässt sich jedes Optimierungsproblem so darstellen und ist auch für diese Forschungsarbeit von zentraler Bedeutung. Ein Optimierungsmodell verwendet mathematische Operationstechniken, um eine optimale Lösung für ein beschriebenes Problem zu finden, die alle Bedingungen erfüllt. Lineare Optimierungsmodelle werden in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt, wie beispielsweise in Produktion, Logistik, Finanzen, Wirtschaft, Umwelt, Energie, Verkehr, etc. und sind nützliche Werkzeuge für Entscheidungsträger, um komplexe Probleme zu analysieren und Entscheidungen zu treffen. Nachfolgend werden die drei Hauptkomponenten eines Optimierungsmodells genauer erklärt.

3.3.4 Zielfunktion

Die Zielfunktion ist die Funktion, die bei der Optimierung verwendet wird, um das beste Ergebnis unter den Nebenbedingungen zu erzielen. Es ist die Funktion einer bestimmten Messgrösse, die maximiert oder minimiert werden soll. Sie ist das Ziel der Optimierung und bildet die Grundlage für die Ergebnisse. (Wolfgang Domschke, 2015)

3.3.5 Entscheidungsvariablen

Entscheidungsvariablen sind Variablen, die eine zentrale Rolle in der Gestaltung und Kontrolle des modellierten Systems spielen. Sie repräsentieren die Handlungsoptionen, die möglich sind. Die Entscheidungsvariablen haben direkten Einfluss auf das Verhalten des Systems, und werden als Steuerelemente für das optimale Ergebnis verwendet. (Wolfgang Domschke, 2015)

3.3.6 Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen definieren die Einschränkungen innerhalb eines Optimierungsproblems. Sie stellen Parameter und Variablen dar, welche den Ergebnisbereich eingrenzen. Nebenbedingungen werden mittels Gleichungen und/oder Ungleichungen dargestellt. Durch die mathematische Strukturierung und Quantifizierung wird eine systematische und effiziente Suche möglich, die zur optimalen Lösung des Problems führt. (Wolfgang Domschke, 2015)

3.3.7 lineare Programmierung

Lineare Programmierung ist die Grundlage, auf welcher lineare Softwaremodelle basieren. Sie stellt eine spezifische Art der mathematischen Optimierung dar, bei der eine lineare Zielfunktion unter Berücksichtigung von linearen Gleichungs- oder Ungleichungsnebenbedingungen maximiert oder minimiert wird. Die lineare Programmierung kann in verschiedenen Programmiersprachen implementiert werden, darunter Python, R, MATLAB usw. unabhängig von der gewählten Sprache, ist der Kern der linearen Programmierung die Definition und Manipulation der Zielfunktion und der Nebenbedingungen, um eine optimale Lösung zu erzielen. (MathWorks, 2023)

Lineare Programmierung ist ein systematischer Ansatz zur Lösung von Optimierungsproblemen. Sie basiert auf logischen und mathematischen Prinzipien und nutzt Algorithmen, um den Entscheidungsraum effizient zu durchsuchen. Das Ergebnis ist eine optimale Lösung, die die Zielfunktion unter Beachtung aller Nebenbedingungen optimiert. (MathWorks, 2023)

3.4 Zwischenfazit

In dem Kapitel wurde die Vorgehensweise für die Daten- und Literaturrecherche und die gewählte Methodik zur Lösung des Optimierungsproblems beschrieben. Es wurden die Schritte erläutert, welche zur Daten- und Literaturrecherche notwendig sind, um geeignete Informationen und Daten zu erhalten. Die Datenrecherche ist von entscheidender Bedeutung für die Bachelorarbeit. Es wird ein klarer und systematischer Ansatz verfolgt, um sicherzustellen, dass alle notwendigen Daten konsistent erhoben werden. Verschiedene Quellen wie öffentlich zugängliche Datenbanken, Archivmaterial, Berichte, wissenschaftliche Publikationen und soziale Medien werden genutzt, um relevante Daten zu sammeln. Eine Literaturrecherche ist notwendig, um ein tieferes Verständnis für die Forschungsproblematik zu erhalten. Die systematische-, und die vorwärts gerichtete Suche werden als Methode angewendet, um relevante Literatur zu ermitteln. Durch die Kombination dieser beiden Methoden wird ein umfassendes Gesamtbild der Forschungsproblematik möglich. Die Methode der linearen Optimierung/Programmierung wurde als relevantes Instrument zur Modellierung und Simulation von Szenarien für den Schweizer Strommarkt identifiziert. Sie ermöglicht eine systematische und logische Lösung des Optimierungsproblems, indem sie die Zielfunktion und relevante Nebenbedingungen nutzt, um eine optimale Lösung für den Ausbau der erneuerbaren Energiequellen zu finden.

Das Kapitel dient als Basis für das Vorgehen die weitere Modellentwicklung und dem Entwickeln von Szenarien für den zukünftigen Schweizer Strommarkt. Das nachfolgende Modell inkl. der verwendeten Inputdaten dient als Entscheidungsfindung bezüglich des optimalen Ausbaus von erneuerbaren Energien. Es wird als Ausgangspunkt für die weitere Forschung und die Entwicklung von Strategien zur Optimierung des Schweizer Strommarktes verwendet. Die gewählte Methodik stellt einen robusten Rahmen für die Durchführung der Forschungsarbeit dar. Sie ermöglicht eine systematische und umfassende Untersuchung des Projektthemas und bildet die Grundlage für anschließende Entscheidungen zur Optimierung des Modells.

4 Daten

Im folgenden Kapitel werden die Daten, welche als Input für das Basismodell dienen, sowie auch die Daten für die Simulation der Zukunftsszenarien erläutert. Die Daten stammen alle aus öffentlich zugänglichen Quellen wie dem Bundesamt für Energie und dem Bundesamt für Statistik. Sie werden im Modell entsprechend verarbeitet und aufbereitet, um sie für die Optimierung des Ausbaus erneuerbarer Energien zu nutzen. Dabei wird im Modell lineare Programmierung zur Erstellung einer optimalen Lösung der Zielfunktion angewendet. Durch die Nutzung von aktuellen Daten und verschiedenen Optimierungsparametern wird das Modell schrittweise an die Bedingungen der Realität angepasst, sodass eine passende Abbildung der Schweizer Elektrizitätsversorgung möglich wird.

4.1 Datenbeschreibung

Die Inputdaten des Modells umfassen die Elektrizitätsnachfrage sowie die Stromproduktionsdaten der unterschiedlichen Technologien in stündlichen Zeitreihen in MW. Im Laufe der Projektarbeit wurde mit verschiedenen Inputdaten für die Nachfrage und das Stromangebot variiert. Um zu Beginn der Modellbildung ein möglich realistisches Basismodell zu entwickeln, wird das Modell in einem ersten Schritt mit der Stromnachfrage und dem Stromproduktions-Mix für das Jahr 2022 verifiziert. Die verwendeten Daten für das Jahr 2022 stammen vom BfE. Die Daten, die für das Jahr 2050 verwendet werden, stammen ebenso vom Bundesamt für Energie und wurden aus dem Energieszenario «Energieperspektiven2050+» entnommen. Die verwendeten Daten zur angenommenen Elektrizitätsnachfrage und das bis im Jahr 2050 erweiterte Stromangebot (ohne Kernenergie) inkl. dem fertig erstellten Modellcode in Form einer Python-Datei sind unter folgendem Link online verfügbar:

<https://1drv.ms/f/s!AmOsY-TQGxDLge97B7kieb8zCHuMTQ?e=yrC8Mx>

4.2 Datenverarbeitung

Um die Daten geeignet im Modell zu verwenden, müssen mehrere Vorbereitungen durchgeführt werden. Zunächst müssen die Daten in einem einheitlichen Format strukturiert und gespeichert sein, um sie im Code verarbeiten zu können. Danach werden die eingelesenen Daten auf ihre Vollständigkeit und Korrektheit überprüft, um die Datenqualität sicherzustellen. Dies wird zu Beginn des Modellcodes durchgeführt. Zuletzt werden die Daten auf relevante Variablen reduziert. Die Datenaufbereitung- und Datenverarbeitung stellt sicher, dass das Modell auf valide Daten zurückgreift.

4.3 Zwischenfazit

Dieses Kapitel konzentriert sich auf die Beschaffung, Aufbereitung und Anwendung von Daten zur Erstellung des Modells. Es wird deutlich, dass die Auswahl der Datenquellen entscheidend ist, um anwendbare Modellergebnisse zu erzielen. Die Daten, die zur Modellierung verwendet werden, stammen alle aus soliden Quellen. Sie wurden sorgfältig ausgewählt und aufbereitet, um aktuelle und zukünftige Elektrizitätsnachfrage sowie die Produktionskapazitäten der unterschiedlichen Technologien zu modellieren. Die genutzten Datenquellen liefern wichtige Informationen über aktuelle und zukünftige Zustände des Elektrizitätsmarkts Schweiz. Die Daten sind von bedeutender Wichtigkeit bei der Modellbildung, sie sind die Grundlage bei der Erstellung eines optimalen Mix und dem optimalen Zubau erneuerbarer Energien zur Reduzierung der Winterstromlücke. Die ausgewählten Daten bieten die Basis des Modells und sind eine wichtige Entscheidungsgrundlage in Bezug auf das Modellergebnis.

5 Modell

In diesem Kapitel wird das Modell konzeptionell und analytisch beschrieben, welches zur Lösung des Optimierungsproblems erstellt wurde. Die Modellierung wurde in der objektorientierten Programmiersprache Python realisiert. Der Modellcode definiert und löst das Optimierungsproblem zur Bestimmung der Ausbaustrategie für zukünftige erneuerbare Energiequellen unter der Berücksichtigung der Abdeckung des Strombedarfs. Die Optimierung zielt darauf ab, die Kosten der Stromerzeugung zu minimieren und gleichzeitig den Schweizer Strombedarf jederzeit abzudecken.

5.1 Modellarchitektur

Die Optimierung des Einsatzes und Ausbaus erneuerbarer Energien ist das zentrale Thema des Optimierungsmodells. Das Modell rechnet auf Basis der Inputdaten (in Kapitel 4 beschrieben). Nach Erstellung des Modellrahmens, werden weitere wichtige Nebenbedingungen und Beschränkungen in Bezug auf die Abbildung des Elektrizitätsmarkt Schweiz eingefügt. Durch das Erstellen und Definieren von Variablen und Parameter im Modellcode kann das Modell zu beliebigen Daten variiert und wiederverwendet werden. Die Gesamtarchitektur des Codes besteht aus 303 Zeilen Code.

5.2 Modellcode

Der Modellcode implementiert das mathematische Modell zur Optimierung der Stromproduktion in der Schweiz. Im Modell werden Produktionskapazitäten sechs unterschiedlicher Energiequellen berücksichtigt. In folgendem Ausschnitt des Modellcodes werden die berücksichtigten Technologien und ein Zeitindex für ein Jahr bzw. 8760 Stunden definiert.

```
m = pyo.ConcreteModel()
m.Stunde = pyo.RangeSet(0, 8759) # Zeitindex
m.Technologie = pyo.Set(initialize=["Laufwasser", "Kern", "Konv", "Import", "Wind", "Solar"])
```

Abbildung 9: berücksichtigte Technologien des Modells (Quelle: selbst erstellt)

5.2.1 Bibliotheken/Pakete

Die Implementierung des Modellcodes benötigt folgende Bibliotheken/Pakete, um die notwendigen Methoden und Funktionen im Modell anzuwenden.

5.2.1.1 pandas

Pandas («Panel Data») bietet Strukturen, die es ermöglichen, grosse Datensätze schnell und einfach zu bearbeiten. Mit Pandas können Daten eingelesen, bearbeitet, sortiert, gefiltert und fehlende Daten verarbeitet werden. Pandas bietet Funktionen für statische Berechnungen, Gruppierungen von Daten und das Zusammenführen von Daten aus verschiedenen Quellen (Bigdata-Insider, 2023).

5.2.1.2 NumPy

Numpy ("Numerical Python") ist eine Bibliothek für wissenschaftliches Rechnen und Datenanalyse, die insbesondere für die Arbeit mit grossen, mehrdimensionalen Arrays und Matrizen optimiert ist. NumPy bietet Funktionen für numerische Berechnungen in Python (Bigdata-Insider, 2023).

5.2.1.3 pyomo

Pyomo ("Python Optimization Modelling Object") ist eine Bibliothek für die Modellierung und Lösung von Optimierungsproblemen. Pyomo bietet eine Möglichkeit, mathematische Optimierungsmodelle in Python-Code zu formulieren. Pyomo bietet eine Vielzahl an Solvern, welche lokal oder über das Netzwerk ausgeführt werden. Der im Modellcode verwendete Solver ist das GLPK- Solverpaket (Bigdata-Insider, 2023).

5.2.2 Zielfunktion des Modells

Das Optimierungsziel des Modells besteht darin, die Gesamtkosten für die Energieproduktion durch einen Mix von verschiedenen Technologien zu minimieren. Dies geschieht unter der Berücksichtigung der Kosten für den Zubau von Wind und Solarenergie. Die Zielfunktion und das Python-Modell sind das zentrale Element dieser Forschungsarbeit und dienen dazu den optimalen Mix für das Jahr 2050 zu bestimmen. Sie ist entscheidend für die Wahl des optimalen Lösungsansatzes.

Die für diese Bachelorarbeit relevante Zielfunktion besteht aus Variablen und Parametern. Die Zielfunktion ist linear und die Entscheidungsvariablen stellen in diesem Kontext die unterschiedlichen erneuerbaren Energieressourcen dar. Die Zielfunktion der Optimierungsaufgabe wird in folgender Abbildung veranschaulicht.

```
sum(m.produktion[i, j] * m.kosten[j] for i in m.Stunde for j in m.Technologie) \
+ m.ZubauWind * 289017 + m.ZubauPV * 160514
```

Abbildung 10: Zielfunktion der Projektarbeit (Quelle: selbst erstellt)

Die Summe aus allen Energiequellen multipliziert mit deren Produktionspreis, ergibt die Kosten, die zur Produktion benötigt werden. Dazu wird der Zubau für PV und Wind multipliziert mit deren Produktionskosten addiert. Die Zielfunktion besteht also aus der Summe aller Herstellungskosten und den Investitionskosten für die zwei erneuerbaren Energie Wind und PV. Die Optimierung des Ausbaus der erneuerbaren Energiequellen basiert auf der linearen Gleichung. Die Zielfunktion wird durch das mathematische Modell in dem Python-Code umgesetzt und gelöst.

5.2.3 Entscheidungsvariablen des Modells

In dem Optimierungsmodell sind zwei Entscheidungsvariablen zur Lösung des Optimierungsproblems definiert. Sie entsprechen den **Zubau-Variablen** für zukünftige Wind und PV-Installationen und sind in der Zielfunktion in vorangegangener Abbildung 10 ersichtlich.

5.2.4 Nebenbedingungen des Modells

5.2.4.1 Nebenbedingung 1: Nachfrageabdeckung

Die erste Nebenbedingung im Modellcode ist die Lastabdeckung des Elektrizitätsmarkts. Die erste Nebenbedingung des Modells wird in nachfolgender Grafik dargestellt und bezieht sich auf die Lastabdeckung der Schweizer Stromnachfrage.

```
m.Constraint1 = pyo.ConstraintList()
for i in m.Stunde:
    m.Constraint1.add(m.produktion[i, "Laufwasser"]
        + m.produktion[i, "Kern"]
        + m.produktion[i, "Konv"]
        + m.produktion[i, "Import"]
        + m.produktion[i, "Wind"]
        + m.produktion[i, "Solar"]
        + m.spr_aus[i, "Pumpspeicher"]
        == m.nachfrage_waermepumpen[i] + m.nachfrage_elektroautos[i] + m.restnachfrage[i]
        + m.spr_ein[i, "Pumpspeicher"])
```

Abbildung 11: Abdeckung der Stromnachfrage (Quelle: selbst erstellt)

Die Produktionsleistungen der unterschiedlichen Produktionstechnologien müssen mindestens gleich der Nachfrage inkl. Pumpspeicher-verbrauch sein, um Versorgungssicherheit zu garantieren.

5.2.4.2 Nebenbedingung 2: Kapazitätsbeschränkungen erneuerbare Energien

Eine weitere wichtige Nebenbedingung ist Leistungsbeschränkung der erneuerbaren Energien Wind und Solar inkl. den beiden Zubau Variablen (Entscheidungsvariablen) des Optimierungsmodells. Das Modell muss den Zubau und die Kapazität entsprechend realistisch beschränken.

```
# Zubau Windenergie
m.Constraint2Wind = pyo.ConstraintList()
for i in m.Stunde:
    m.Constraint2Wind.add(m.produktion[i, "Wind"] <= m.prdktionskap_Wind[i] +
        m.ZubauWind*m.prdktionskap_Wind[i]/max(m.prdktionskap_Wind[i] for i in m.Stunde))
# Zubau Solarenergie
m.Constraint2PV = pyo.ConstraintList()
for i in m.Stunde:
    m.Constraint2PV.add(m.produktion[i, "Solar"] <= m.prdktionskap_Solar[i] +
        m.ZubauPV*m.prdktionskap_Solar[i]/max(m.prdktionskap_Solar[i] for i in m.Stunde))
```

Abbildung 12: Kapazitätsbeschränkungen erneuerbare Energien (Quelle: selbst erstellt)

Für jede Stunde wird die Leistungskapazität der Wind- und Solarproduktion beschränkt. Die Bedingung besteht aus der maximalen Produktion der jeweiligen Technologie addiert mit dem Zubau der entsprechenden erneuerbaren Technologie.

5.2.4.3 Nebenbedingung 3: Nachfrageunterteilung

Um die für die Zukunft entstehende Nachfrage speziell zu berücksichtigen, wurde die Gesamtnachfrage im Modellcode in die drei Teilnachfragen aufgeteilt. Die Summe aus den Teilnachfragen ergibt die Gesamtnachfrage. Folgende Abbildung stellt die Nebenbedingung der Nachfrageunterteilung dar.

```
m.Constraint3 = pyo.ConstraintList()
for i in m.Stunde:
    m.Constraint3.add(m.nachfrage_waermepumpen[i] == m.Elec_demand[i] * m.nachfrage_waermepumpen_anteil)
    m.Constraint3.add(m.nachfrage_elektroautos[i] == m.Elec_demand[i] * m.nachfrage_elektroautos_anteil)
    m.Constraint3.add(m.restnachfrage[i] == m.Elec_demand[i] *
        (1 - m.nachfrage_waermepumpen_anteil - m.nachfrage_elektroautos_anteil))
```

Abbildung 13: Aufteilung der Stromnachfrage (Quelle: selbst erstellt)

Die Nachfrage wird in drei Kategorien klassifiziert: E-Mobilität, Wärmepumpen und Restnachfrage. Die drei Klassen werden im Modell entsprechend mit prozentualen Anteilen berücksichtigt.

5.2.4.4 Nebenbedingung 4: Speicherrestriktionen

Weitere Nebenbedingungen des Modells sind die Speicherrestriktionen der Wasserkraft. Die Speicher müssen realistisch beschränkt werden.

In der nachfolgenden Abbildung 14 werden die Nebenbedingungen für die Pumpspeicherkraftwerke dargestellt. Die Speicherbeladung- und Entladung wird auf die max. Kapazität bzw. das Speichervolumen eingeschränkt. Auch wird im Modell ein Wirkungsgrad der Pumpspeicherkraftwerke von 75% definiert. Dies entspricht dem durchschnittlichen Wirkungsgrad eines in der Schweiz betriebenen Pumpspeicherkraftwerks (Energie-Lexikon.info, 2023).

```

# Leistungsbegrenzung auf Speicher-Entladung
m.Constraint8 = pyo.ConstraintList()
for i in m.Stunde:
    for j in m.Speicher:
        m.Constraint8.add(m.spr_aus[i, j] <= m.spr_ladung_kap[j])

# Leistungsbegrenzung auf Speicher-Beladung
m.Constraint9 = pyo.ConstraintList()
for i in m.Stunde:
    for j in m.Speicher:
        m.Constraint9.add(m.spr_ein[i, j] <= m.spr_ladung_kap[j])

# Speicherladung im Verhältnis zum vorherigen Zeitschritt
m.Constraint10 = pyo.ConstraintList()
for i in pyo.RangeSet(0, 8758):
    for j in m.Speicher:
        m.Constraint10.add(m.sprstand[i + 1, j] == m.sprstand[i, j]
            + m.spr_ein[i, j] * m.spreffizienz[j]
            - m.spr_aus[i, j])

# maximale Speicherkapazität
m.Constraint11 = pyo.ConstraintList()
for i in m.Stunde:
    for j in m.Speicher:

```

Abbildung 14: Kapazitätsbeschränkung der Pumpspeicher (Quelle: selbst erstellt)

5.3 Annahmen:

In diesem Kapitel werden die Annahmen, welche im Modellcode getroffen wurden, dokumentiert und erklärt. Die Annahmen zur Modellerstellung wurden in Bezug auf die Nennleistungen der jeweiligen Produktionstechnologien und deren Herstellungskosten getroffen. Auch wurden annuitätische Investitionskosten für die erneuerbaren Energiequellen Wind und Solar abgeschätzt.

5.3.1 Nennleistungen der Produktionstechnologien

Nachfolgend werden die verwendeten Nennleistungen für das Modell dokumentiert. Die ausgewählten Nennleistungen der jeweiligen Technologien resultieren aus der umfassenden Daten- und Literaturrecherche.

Technologie	Nennleistung 2022 [in MW]	Nennleistung 2050 [in MW]
Kernenergie	2'920	0
Wasserkraft	stündliche Zeitreihe Energiestatistik2022	stündliche Zeitreihe Energieperspektive2050
Konv. Energien	2'016	2'016
Solar	stündlich Zeitreihe Energiestatistik2022	stündliche Zeitreihe Energieperspektive2050
Wind	stündlich Zeitreihe Energiestatistik2022	stündliche Zeitreihe Energieperspektive2050
Import	10'000	10'000

Tabelle 8: verwendete Nennleistungen Modell (BfE, Energiestatistiken, 2023)

Die Nennleistung aller in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerke beträgt aktuell 2'920 MW. Die Nennleistung der konventionellen Energien betragen derzeit 2016 MW. Die erneuerbaren Energien werden auf Basis der Daten vom BfE im Modell stündlich eingelesen. Um die Nachfrage dauerhaft zu decken wird der Import maximal definiert, um da Phänomen der Winterstromlücke zu simulieren.

5.3.2 Gesteungskosten der Technologien

Die Gesteungskosten der unterschiedlich definierten Technologien unterscheiden sich und werden in folgender Tabelle dargestellt.

Technologie	Gesteungskosten [in CHF/MW]
Kernenergie	30.-
Wasserkraft	2.-
Konv. Energien	140.-
Solar	0.-
Wind	0.-
Import	200.-

Tabelle 9: verwendete Gesteungskosten im Modell ⁷

Die Stromerzeugungskosten für Kernenergie entsprechen 30 Schweizer Franken pro MW (Swissnuclear.ch, 2023). Die Kosten für Wasserkraft sind mit 2 Fr. pro Megawatt die geringsten Produktionskosten (Energie.ch, 2023). Solar und Wind wurden im Modell als kostenlos betrachtet, da das Modell Solar- und Windenergie bevorzugt verwenden soll, sobald sie verfügbar sind. Konv. Energiegewinnung wird im Modell mit 140 Fr. pro MW berücksichtigt (Swissnuclear, 2023). Der Stromimport wurde als teuerste Technologie implementiert, sodass ein Import als letzte Alternative vom Modell berücksichtigt wird.

5.3.3 Investitionskosten für den Zubau von Wind & PV

In folgendem Teilkapitel werden die im Optimierungsmodell verwendeten Investitionskosten pro zusätzlichen MW für ein Jahr berechnet. Die Kosten zusätzlicher Windenergie betragen gemäss Bundesamt für Energie (BfE, Kosten Windenergie, 2023) maximal 3'449 CHF pro kW. Die Kosten für Solarenergie sind geringer und betragen inkl. Speichermodul maximal 2'500 CHF pro zusätzlich installiertem kW (Solarratgeber, 2023). Die Lebensdauer für eine Windanlage beträgt gemäss Axpo durchschnittlich 15 Jahre (Axpo, 2023). Eine Solaranlage hat eine durchschnittliche Lebensdauer von 20-30 Jahren (SwissSolar, 2023). Das Modell rechnet in der Einheit MW, somit entsprechen die Kosten pro zusätzliche Leistung folgenden Werten.

Kosten pro zusätzlichen kW		Kosten pro zusätzlichen MW	
Wind:	3'449 CHF	Wind:	3'449'000 CHF
	3'000 CHF		3'000'000 CHF
	2'500 CHF		2'500'000 CHF
Solar:	2'500 CHF	Solar	2'500'000 CHF
	2'000 CHF		2'000'000 CHF
	1'500 CHF		1'500'000 CHF

Tabelle 10: Investitionskosten Wind & PV (BfE, Kosten Windenergie, 2023) (Solarratgeber, 2023)

Die Investitionskosten pro zusätzlichen MW für die erneuerbaren Energien Wind- und Solarenergie, unter Berücksichtigung der Lebensdauer werden in der Zielfunktion des Optimierungsmodells variiert, sodass unterschiedliche Szenarien mit verschiedenen Amortisierungskosten berücksichtigt werden können. Um die Investitionskosten jährlich im Modell zu einzukalkulieren, wird nachfolgend die Verzinsung des Kapitals der Anlagen mittels dem Barwertfaktor beschrieben.

⁷ (Swissnuclear.ch, 2023)

5.3.3.1 Barwertfaktor

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Berechnung des Barwertfaktors für die zwei unterschiedlichen Energieproduktionstechnologien. Für die Lebensdauer werden im Modell 15 Jahre für Wind und 20 Jahre für Solarenergie angenommen. Bei einer Kapitalverzinsung von 5 % (Buzer.de, 2023).

Formel	BF für Wind (15 Jahre bei 5 %)	BF für PV (20 Jahre bei 5 %)
$BF = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$	$BF = \frac{(1+0.05)^{15} - 1}{0.05(1+0.05)^{15}} = \mathbf{10.38}$	$BF = \frac{(1+0.05)^{20} - 1}{0.05(1+0.05)^{20}} = \mathbf{12.46}$
<i>i = Zinssatz ; n = Lebensdauer</i>		

Tabelle 11: Berechnung des Barwertfaktor für die entsprechende Lebensdauer ⁸

Der Faktor spiegelt die verzinsten jährlichen Zahlungsströme wider und ermöglicht eine wirtschaftliche Evaluierung der beiden unterschiedlichen Technologien. Die Tabelle zeigt die Anwendung des Barwertfaktors auf die zwei verschiedenen Energieproduktionsarten. In der Berechnung werden jeweils 15 Jahre für Windenergie und 20 Jahre für Solarenergie als Lebensdauer vorausgesetzt (SwissSolar, 2023) (Axpo, Lebensdauer Windanlage, 2023).

5.3.3.2 annuitätische Investitionskosten für das Modell

Um im Modell die jährlichen Investitionskosten für die Zielfunktion zu formulieren und zu variieren, müssen die Investitionskosten pro zusätzlichen MW und den für die Lebensdauer relevante Barwertfaktor berücksichtigt werden. Die nachfolgende Tabelle enthält die Formel für die annuitätischen Investitionskosten für die unterschiedlichen Investitionskosten.

annuitätische Investitionskosten:	$= \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{Barwertfaktor}}$
jährliche Zubau Kosten Wind:	$= \frac{3'449'000}{10.38} = 332'274 \text{ CHF}$
	$= \frac{3'000'000}{10.38} = \mathbf{289'017 \text{ CHF}}$
	$= \frac{2'500'000}{10.38} = 240'848 \text{ CHF}$
jährliche Zubau Kosten Solar:	$= \frac{2'500'000}{12.46} = 200'642 \text{ CHF}$
	$= \frac{2'000'000}{12.46} = \mathbf{160'514 \text{ CHF}}$
	$= \frac{1'500'000}{12.46} = 120'385 \text{ CHF}$

Tabelle 12: Berechnung annuitätische Investitionskosten (Wirtschaftslexikon, 2023)

Die jährlichen Investitionskosten werden in der Zielfunktion des Optimierungsmodells als Parameter festgelegt und sind in der Zielfunktion sowie in Tabelle 12 ersichtlich. Weiter werden die annuitätischen Investitionskosten für die ausgewählten erneuerbaren Energien zur entsprechenden Stromnachfrage für das Jahr 2050 gemäss Energieperspektive2050+ variiert und dokumentiert.

⁸ (Wirtschaftlexikon, 2023)

5.4 Zwischenfazit

Mit Hilfe des ergänzten Modellcodes und den vorangegangenen theoretischen Grundlagen, bin ich in der Lage das komplexe Energiesystem der Schweiz mathematisch zu formulieren und in einem Pythonmodell nachzubilden. Ich kann den Code so weit ergänzen, dass eine reale Abbildung der Schweizer Energieversorgung möglich wird. Das Kapitel konzentriert sich auf die Anwendung und konzeptionelle Erklärung des Modells sowie auf die für die Optimierung relevante Zielfunktion unter der Berücksichtigung definierter Nebenbedingungen. Ausserdem konnten die getroffenen Annahmen des Modells auf Basis der Daten- und Literaturrecherche kalkuliert und dokumentiert werden.

Die Zielfunktion des Modells, die Gesamtkosten der Energieproduktion durch die verschiedenen Technologien zu minimieren, ist die zentrale Aufgabe dieser Forschungsarbeit. Die Zielfunktion ist implementiert in Form einer linearen Gleichung. Die Verwendung der beiden Entscheidungsvariablen, welche im Kontext die verschiedenen Energiequellen repräsentieren, ermöglicht eine Optimierung der Zielfunktion des Modells. Neben der Zielfunktion sind auch die Nebenbedingungen des Modells von zentraler Bedeutung. Sie berücksichtigen verschiedene realistische Einschränkungen, wie die Lastabdeckung, Kapazitätsbeschränkungen der verschiedenen Produktionstechnologien und Einschränkungen der Energiespeicherung. Diese Nebenbedingungen gewährleisten, dass das Modell eine realistische Darstellung des Energiesystems bietet und tragen dazu bei, die Genauigkeit und Anwendbarkeit der Modellergebnisse zu verbessern.

Zusammenfassend zeigt dieses Kapitel die Wichtigkeit einer klaren Formulierung der Zielfunktion und einer angemessenen Berücksichtigung von Nebenbedingungen für die Erstellung einer effektiven und realistischen Modellierung. Mit Hilfe der Recherchen zum Thema der Energiestrategie2050 und der aktuellen Situation, konnte ein Grundmodell zur Simulation des Schweizer Elektrizitätsmarkts erstellt werden. Anschliessend kann das Modell mit unterschiedlichen Daten variiert und ohne Kernenergie simuliert werden, sodass ein optimaler Strommix auf Basis der Daten resultiert.

6 Modellergebnisse

In folgendem Kapitel sind die Modellergebnisse der Anwendungen und die erzielten Ergebnisse dokumentiert. Zuerst wird das Basismodell für das Jahr 2022, auf Grundlage der Daten- und Literaturrecherche referenziert. Anschliessend werden die Ergebnisse zu den verschiedenen Szenarien und dem vom Modell errechneten optimalen Stromproduktionsmix dokumentiert. Auch werden die Ergebnisse der Variation unterschiedlicher annuitätischen Investitionskosten für die beiden Zubau-Variablen präsentiert.

6.1 Basismodell: Stromproduktions-Mix 2022

Das Basismodell, welches auf der vorangegangenen Datenrecherche basiert, wird in folgendem Kapitel erklärt. In nachfolgender Abbildung wird der optimale Produktionsmix des Modells ohne Zubau Variablen dargestellt.

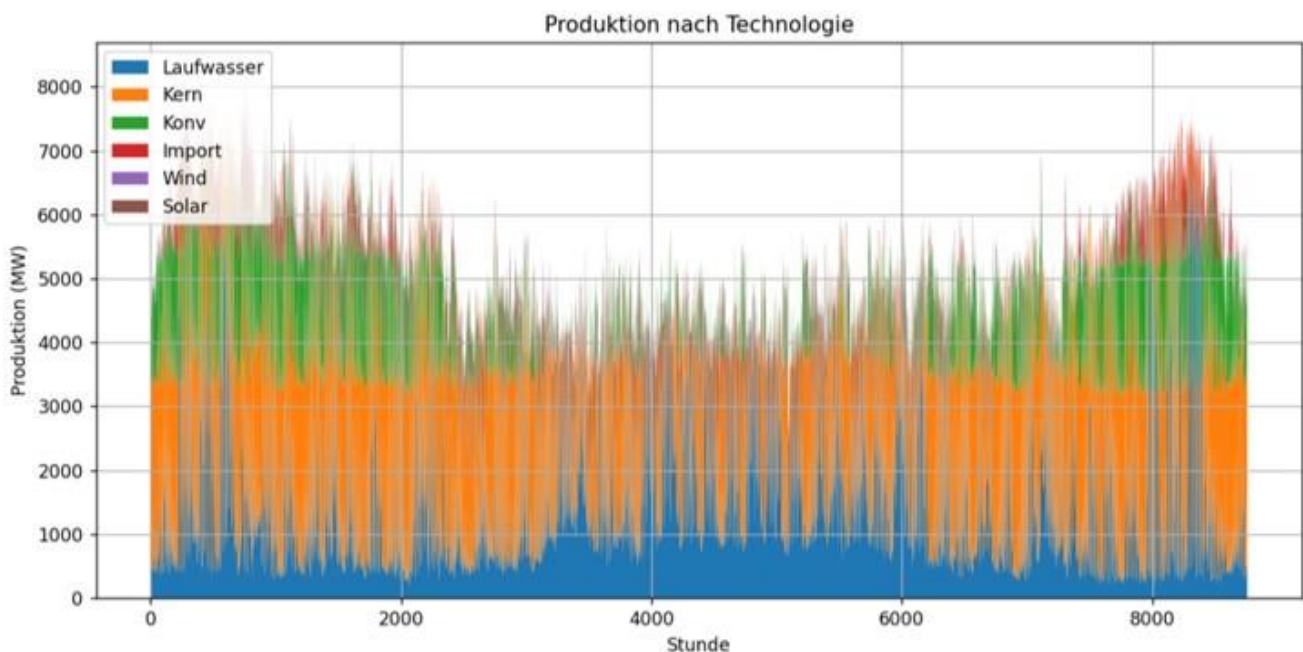


Abbildung 15: Modellergebnis "Basismodell" repräsentativ für das Jahr 2022 (Quelle: selbst erstellt)

Die Abbildung stellt den stündlichen Stromerzeugungsmix der Schweiz dar. Das Basismodellergebnis beruht auf den Daten vom Jahr 2022. Das Basismodell wurde mittels geprüften Werten aus der Literatur- und Datenrecherche erstellt. Es repräsentiert dabei den Schweizer Elektrizitätsmarkt im Jahr 2022. Die zurzeit noch betriebene Kernenergie ist in Orange abgebildet und macht einen erheblichen Anteil 28.9 % (VSE, Stromnetz Schweiz, 2023) am Produktionsmix der Schweiz aus. Der Stromimport in den Verbrauchsspitzen ist in Rot dargestellt und repräsentiert dabei das Defizit des Stromangebots der Schweiz zur bestimmten Stunde über das Jahr 2022 verteilt.

Das Modell weist einen erhöhten Anteil im Produktionsmix an konventionellen Energien auf, da diese im Modell zur Vereinfachung der Komplexität als konstant verfügbare Nennleistung definiert wird. Die erneuerbaren Energien Wasserkraft, Windkraft und Solarenergie werden im Modell stündlich interpretiert, da die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien eine erhebliche Rolle in der Stromproduktion spielt. Im Basismodell wurde noch kein Zubau von Solar und Windenergie berücksichtigt. Insgesamt repräsentiert das Basismodell den Schweizer Stromversorgungsmarkt realistisch genug, um weitere Simulationen in Bezug auf das Optimierungsproblem zu ermöglichen.

6.2 Ergebnis: optimaler Stromproduktions-Mix 2050

Die Ergebnisse des Optimierungsmodells bzw. der optimale Produktionsmix der unterschiedlichen Technologien für die Schweiz im Jahr 2050 auf Basis der Daten stammend aus der Recherche, werden in folgendem Kapitel dokumentiert und diskutiert. In nachfolgender Abbildung ist der optimale Produktionsmix inkl. Zubau von Wind- und Solarenergie dargestellt. Die Grafik liefert die Ergebnisse des Optimierungsmodells zur Entwicklung des Stromproduktionsmix in der Schweiz im Jahr 2050 ohne Kernenergie und mit der errechneten Werten für die Variablen des Ausbaus von PV- und Windenergie.

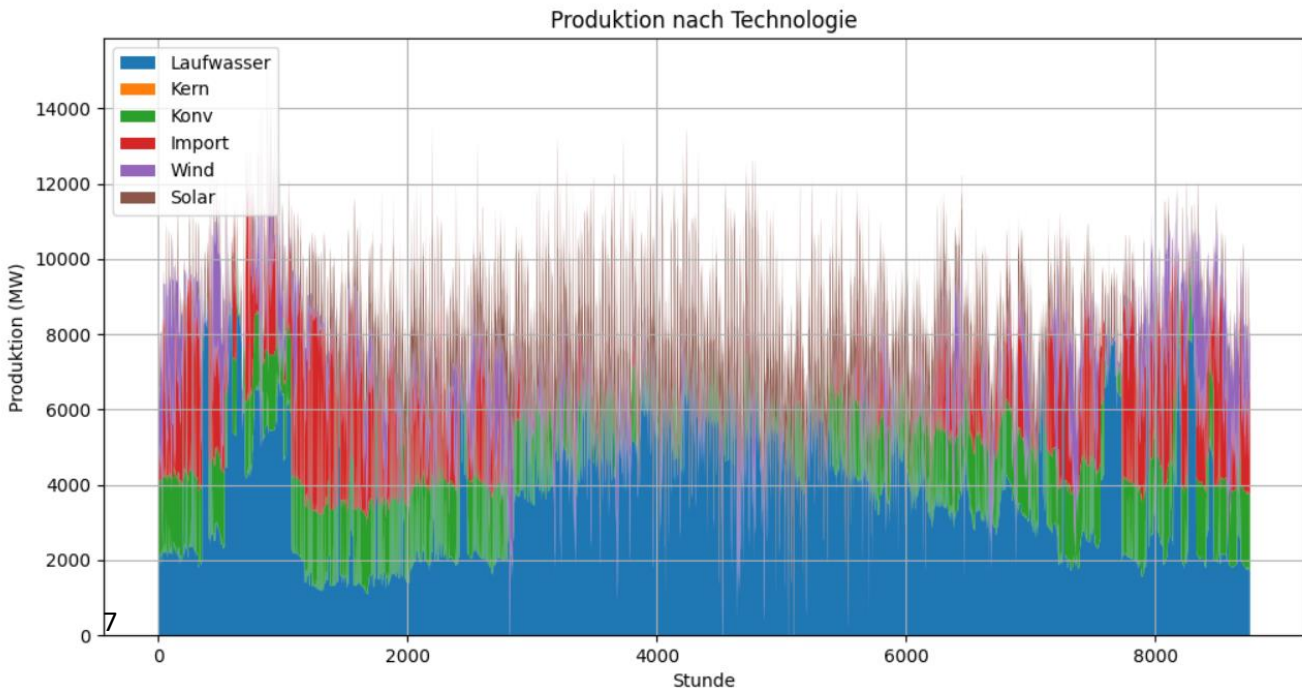


Abbildung 16: Modellergebnis optimaler Mix Produktionstechnologien (Quelle: selbst erstellt)

Die Abbildung veranschaulicht den Elektrizitätsmarkt der Schweiz im Jahr 2050. Die saisonal bedingte Schweizer Stromproduktion ist auch im Jahr 2050 deutlich erkennbar. In den Sommermonaten kann die Schweizer Stromnachfrage komplett mit erneuerbarer Energie und ohne zusätzliche Stromimporte gedeckt werden. Im Winter ist gemäss den Ergebnissen des Optimierungsmodells auch im Jahr 2050 ein Stromimport notwendig, um die Schweizer Stromnachfrage zu decken. Der Stromimport ist mit der Farbe Rot gekennzeichnet und entspricht einer Stromlücke zum jeweiligen Zeitpunkt des Jahres 2050.

6.3 Ergebnis: optimaler Zubau Wind & PV bis 2050

In folgendem Teilkapitel wird die Lösung der Zielfunktion des Optimierungsmodells für die optimale Zubaus-Nennleistung für Wind- und Solarenergie dargestellt. Das Ergebnis für den optimalen Zubau beträgt:

Zubau-PV	=	95.6	MW
Zubau-Wind	=	3'846.4	MW

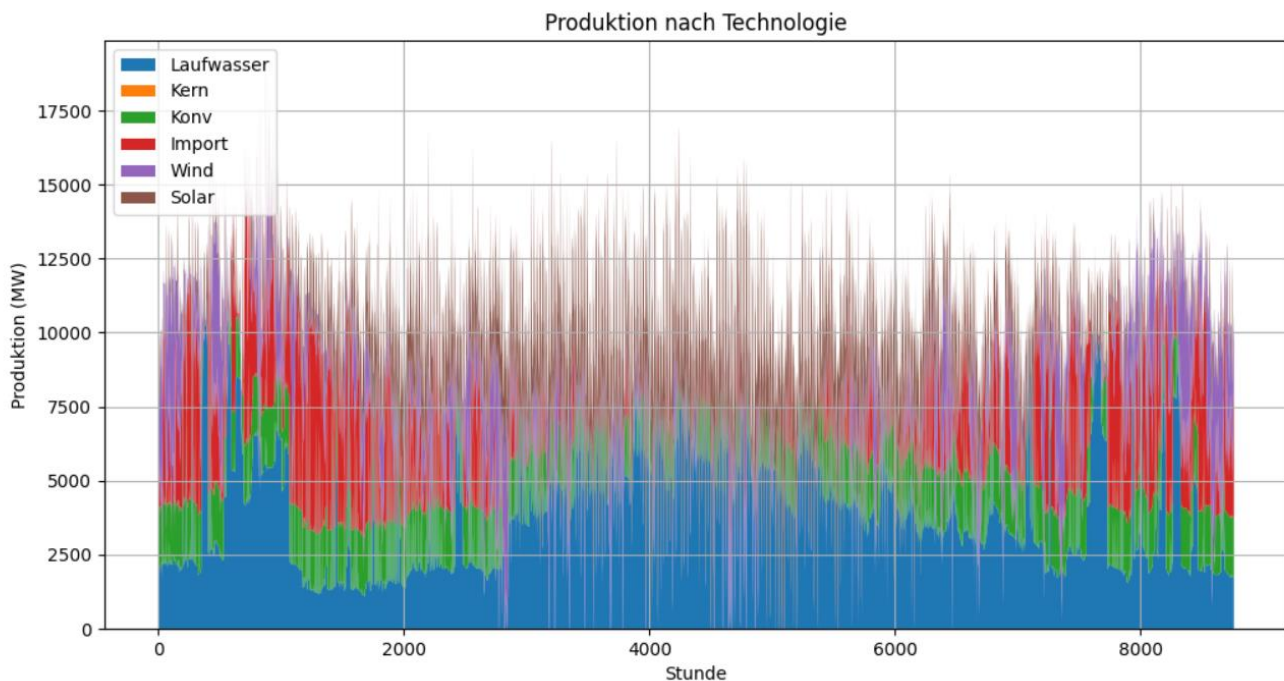
Die Ergebnisse zeigen, dass der Zubau von Windenergie erheblich höher ausfällt als der Ausbau der Solarenergie. Der Zubau von 95.6 MW zusätzlicher Nennleistung ist gemäss Modell der optimale Ausbau für die Solarenergie. Die erhaltenen Ergebnisse haben mehrere Gründe und Ursachen. Die Diskussion und Interpretation der Ergebnisse folgen ausführlich in Kapitel 8.

6.4 Ergebnis: Abweichungen zu Energieperspektiven2050+

Um die Forschung nach einem optimalen Mix für die Zukunft zu vertiefen, werden folgende zwei Szenarien in Bezug auf eine positive- und negative Abweichung der erwarteten Stromgesamtnachfrage gemäss Energieperspektiven2050+ im Jahr 2050 in Betracht gezogen. Folgend werden die Ergebnisse der variierten Nachfrage für das Jahr 2050 dokumentiert.

6.4.1 max. Strombedarf (+25% Abweichung)

Für die Simulation des Szenarios, dass die Schweiz im Jahr 2050 einen höheren Strombedarf nachfragt als in dem Hauptszenario der Energieperspektive2050+ angenommen, wird eine Abweichung von +25% der Nachfrage simuliert. Die Ergebnisse für den optimalen Zubau der beiden Technologien Wind- und Solarenergie und der Strom-Mix für das Jahr 2050 sind in folgender Abbildung dargestellt.



Es ist zu erkennen, dass die Nachfrage erhöht durch Stromimporte in Rot gedeckt werden muss. Der optimale Zubau für Solar- und Windanlagen beträgt nun laut Modell 6422.7 MW für Windenergie und 4613.8 MW für Solarenergie. Man bemerke, dass die Ausbaufähigkeit der Wind- und Solaranlage im Modell nicht berücksichtigt wird. Die Ergebnisse sind erhebliche Grössen, welche mit einer entsprechenden Ressourcenverfügbarkeit abgeklärt und kombiniert werden müssen. Es wird auch gezeigt, dass die Wasserkraft auch in Zukunft von entscheidender Bedeutung für die Energieversorgung der Schweiz bleibt. Sie liefert mehr oder weniger konstant durch das ganze Jahr Energie und macht einen bedeutenden Anteil zur Deckung der Nachfrage aus. Auch ist die Technologie Pumpspeicher geeignet, um die Stromproduktion in gewisser Weise kontrollierbarer zu gestalten.

Zusammenfassend wird bei einer positiven Abweichung der angenommenen Stromnachfrage im Jahr 2050 im Modell nachgewiesen, dass umso mehr erneuerbare Energiequellen ausgebaut und genutzt werden müssen, um der Gefahr einer Stromlücke vorzubeugen. Auch soll weiterhin Stromhandel mit dem Ausland betrieben werden, um bei bei Stromknappheit die Nachfrage abdecken zu können.

6.4.2 min. Strombedarf (-25% Abweichung)

Die Energieperspektive2050+ geht im Jahr 2050 von einer absoluten Stromnachfrage der gesamten Schweiz von 81 TWh aus (BfE, Energiestrategie2050, 2023). Für eine Simulation eines Szenarios, dass die Schweiz im Jahr 2050 eine negative Abweichung von 25% der angenommenen Nachfrage aufweist, wird eine negative Abweichung simuliert. Die Ergebnisse für den Strom-Mix im Jahr 2050 mit einer Abweichung von -25% der in der Energieperspektive angenommenen Stromnachfrage ist in folgender Abbildung dargestellt.

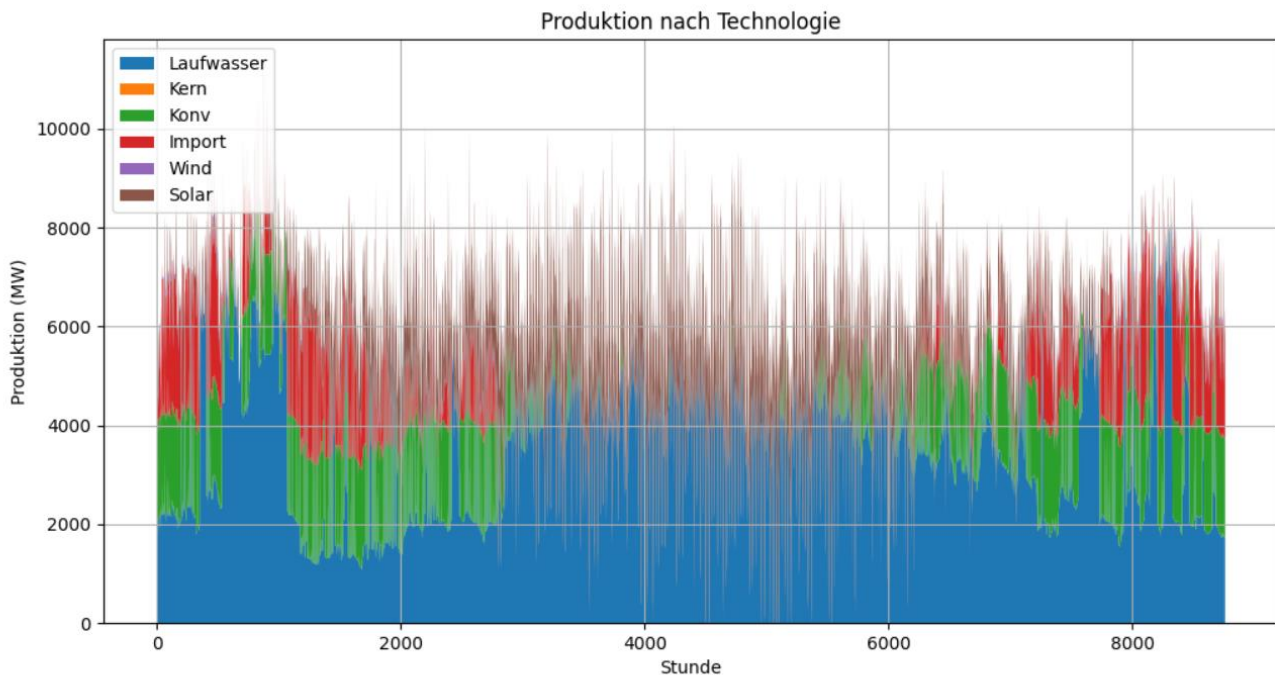


Abbildung 18: Modellergebnis bei -25% mehr Nachfrage im Jahr 2050 (Quelle: selbst erstellt)

Es ist zu erkennen, dass die Nachfrage zu einem erhöhten prozentualen Anteil durch Wasserkraft gedeckt werden kann. Der optimale Zubau für Solar- und Windanlagen beträgt laut Modell 0.0 MW für beide Technologien. Dies ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Die Zielfunktion des Optimierungsmodells berücksichtigt nur die Kapazitätsbeschränkungen und die Kosten. Das Ergebnis zeigt das bei einer geringeren Nachfrage als vom BfE angenommen rein aus Kostensicht betrachtet kein Zubau der Variablen notwendig sei. Das Modell beinhaltet keine politischen, gesellschaftlichen und geografische Einschränkungen, somit ist repräsentiert es rein das mathematische Ergebnis zum optimalen Ausbau aufgrund der Kosten. Zusammenfassend wird bei einer negativen Abweichung der angenommenen Stromnachfrage im Jahr 2050 im Modell nachgewiesen, dass weniger erneuerbare Energiequellen gefördert werden müssen.

Allgemein ist bei der Prognose für die Zukunft der Elektrizitätsversorgung der Schweiz eher von einer überdurchschnittlichen als von einer unterdurchschnittlichen Nachfrage auszugehen. Dies folgt aus den Ursachen der erhöhten E-Mobilität und dem zukünftigen Stromverbrauchsanstieg aufgrund von neu betriebenen Wärmepumpen. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass eine untere Schätzung der Nachfrage für die Zukunft der Optimalfall in Bezug auf die Stromversorgung und die Winterstromlücke in der Schweiz ist. Je kleiner die Nachfrage wird, durch die verschiedenen klimabezogenen Ziele und Massnahmen der Energiestrategie, desto weniger muss an erneuerbaren Energien ausgebaut werden.

6.5 Ergebnis: Variation der annuitätischen Investitionskosten

Zur erweiterten Modellbetrachtung werden in folgendem Kapitel die Ergebnisse der behandelten Szenarien mit variierender annuitätischen Investitionskosten für den Ausbau der Technologien präsentiert. Nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse des optimalen Zubaus für die unterschiedlichen annuitätischen Investitionskosten zu den vorangegangenen Szenarien für das Jahr 2050 zusammen.

annuitätische Investitionskosten	Stromnachfrage 75%	Stromnachfrage 100%	Stromnachfrage 125%
Wind: 332'274 CHF/MW Solar: 200'642 CHF/MW	Zubau Wind = 0.0 MW Zubau Solar = 0.0 MW	Zubau Wind = 1333.6 MW Zubau Solar = 0.0 MW	Zubau Wind = 4710.0 MW Zubau Solar = 2505.1 MW
Wind: 289'017 CHF/MW Solar: 160'514 CHF/MW	Zubau Wind = 0.0 MW Zubau Solar = 0.0 MW	Zubau Wind = 3846.4 MW Zubau Solar = 95.6 MW	Zubau Wind = 6422.7 MW Zubau Solar = 4613.8 MW
Wind: 240'848 CHF/MW Solar: 120'385 CHF/MW	Zubau Wind = 1867.6 MW Zubau Solar = 0.0 MW	Zubau Wind = 5197.4 MW Zubau Solar = 2680.3 MW	Zubau Wind = 7462.8 MW Zubau Solar = 9014.9 MW

Tabelle 13: Modellergebnisse zu Variation annuitätische Investitionskosten (Solarratgeber, 2023)

Die Tabelle veranschaulicht die unterschiedlichen Modellergebnisse in Bezug auf variierende annuitätische Investitionskosten. Es ist zu erkennen, dass das Modell Windenergie bevorzugt, obwohl deren Ausbaukosten höher sind als jene von PV. Dies ist auf die saisonale Abhängigkeit der Solarenergie zurückzuführen. Da PV vor allem im Sommer hohe Energieerzeugung aufweist, wo jedoch die Nachfrage deutlich geringer als in den Wintermonaten ausfällt, priorisiert das Modell die Windenergie.

Bei geringerer Stromnachfrage als vom BfE angenommen, resultiert im Modell gar kein Zubau. Dies resultiert daraus, dass ein Import günstiger als der Ausbau der zwei berücksichtigten Technologien ist.

6.6 Diskussion und Güte des Modells

Die Ergebnisse des Modells für den Schweizer Elektrizitätsmarkt im Jahr 2050 bieten interessante Aspekte. Das Modell zeigt, dass im Jahr 2050 hauptsächlich mit den vier definierten Technologien produziert wird. Der zusätzliche Import stellt die letzte Technologie dar, welche laut dem Modellergebnis auch zukünftig hauptsächlich im Winter beansprucht werden soll. Dies wirft Fragen nach der zukünftigen Nachhaltigkeit und Verfügbarkeit der Energiequellen auf. Das Modellergebnis zeigt die Notwendigkeit eines erhöhten Stromimports für die Zukunft auf, insbesondere bei höherer Nachfrage als erwartet. Dies unterzeichnet die Bedeutung die inländischen Produktionskapazitäten weiter auszubauen und die Integration der Schweiz in den europäischen Energiemarkt voranzutreiben.

Zusammenfassend bietet das Modellergebnis eine gute Grundlage zur Prognose des zukünftigen Strommixes der Schweiz. Dennoch benötigt es weitere realistische Beschränkungen und detailliertere Betrachtungen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Politiken und Technologien zu betrachten. Das Modell ist darauf ausgelegt den Schweizer Energiemarkt möglichst effizient zu gestalten. Das Modell und die erzielten Ergebnisse werden im Kapitel sieben mit dem Szenario der Energieperspektiven2050 verglichen und analysiert.

6.7 Zwischenfazit

Das Kapitel dokumentiert die Ergebnisse des Optimierungsmodells für das Jahr 2050 inkl. der unterschiedlich definierten Stromnachfrageszenarien. Die Analyse der erhaltenen Ergebnisse zeigt, dass auf Basis der recherchierten Daten die vier definierten Schlüsseltechnologien dominieren. Die saisonale Analyse der Stromnachfrage verdeutlicht eine Verschiebung in Energienutzung. Im Sommer wird die Schweizer Stromversorgung vollständig mit erneuerbaren Energien abgedeckt. Im Winter werden auch zukünftig Stromimporte benötigt. Ergänzend dazu deuten die vorgestellten Ergebnisse für den Ausbau von Wind- und Solaranlagen darauf hin, dass erhebliche Investitionen in diese beiden Technologien notwendig sind, um die angestrebte Produktionsleistung zu erreichen. Es folgt eine klare Bestätigung für die zunehmende Bedeutung von erneuerbaren Energien in der zukünftigen Stromversorgung der Schweiz. Die Diskussion zur Güte des Modells hat Unsicherheiten und Herausforderungen der Zukunft gezeigt. Insbesondere die zukünftige Notwendigkeit eines erhöhten Stromimports im Winter wirft Fragen nach der Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit auf.

Zusammenfassend liefert das Kapitel wertvolle Ergebnisse und Daten, die zur Weiterentwicklung und Ausarbeitung verschiedener detaillierterer Szenarien in Bezug auf die Energiestrategie2050 und die Schweizer Energiepolitik beitragen können. Auch macht es die Notwendigkeit weiterer Forschung und Analysen deutlich, welche die Auswirkungen von politischen Entscheidungen und technologischen Innovationen für den zukünftigen Energiemix der Schweiz beinhalten, um die Effizienz des Energiemarktes Schweiz zu maximieren und einem zukünftigen Stromdefizit vorzubeugen.

7 Modellvergleich

Im folgenden Kapitel erfolgt ein Vergleich der erzielten Modellergebnisse mit dem Szenario «Energieperspektiven2050+» des Bundesamts für Energie. Eine besondere Betrachtung liegt auf dem Stromimport im Jahr 2050 da er im Kontext der Forschungsarbeit die Winterstromlücke repräsentiert. Durch den Vergleich und die Analyse der Ergebnisse wird die Qualität des Modells bestimmt.

7.1 Zukunftsszenario BfE: «Energieperspektiven2050+»

Die Schweizer Energieexperten des Bundesamts für Energie haben mit «Energieperspektiven2050+» ein Zukunftsszenario für die Schweiz in Aussicht gestellt. In nachfolgender Abbildung wird der Produktionsmix der Energieperspektive2050+ mit den Daten des BfE für das Jahr 2050 visualisiert. Dabei wird im Jahr 2050 die vollständige Ausserbetriebnahme der Kernenergie berücksichtigt.

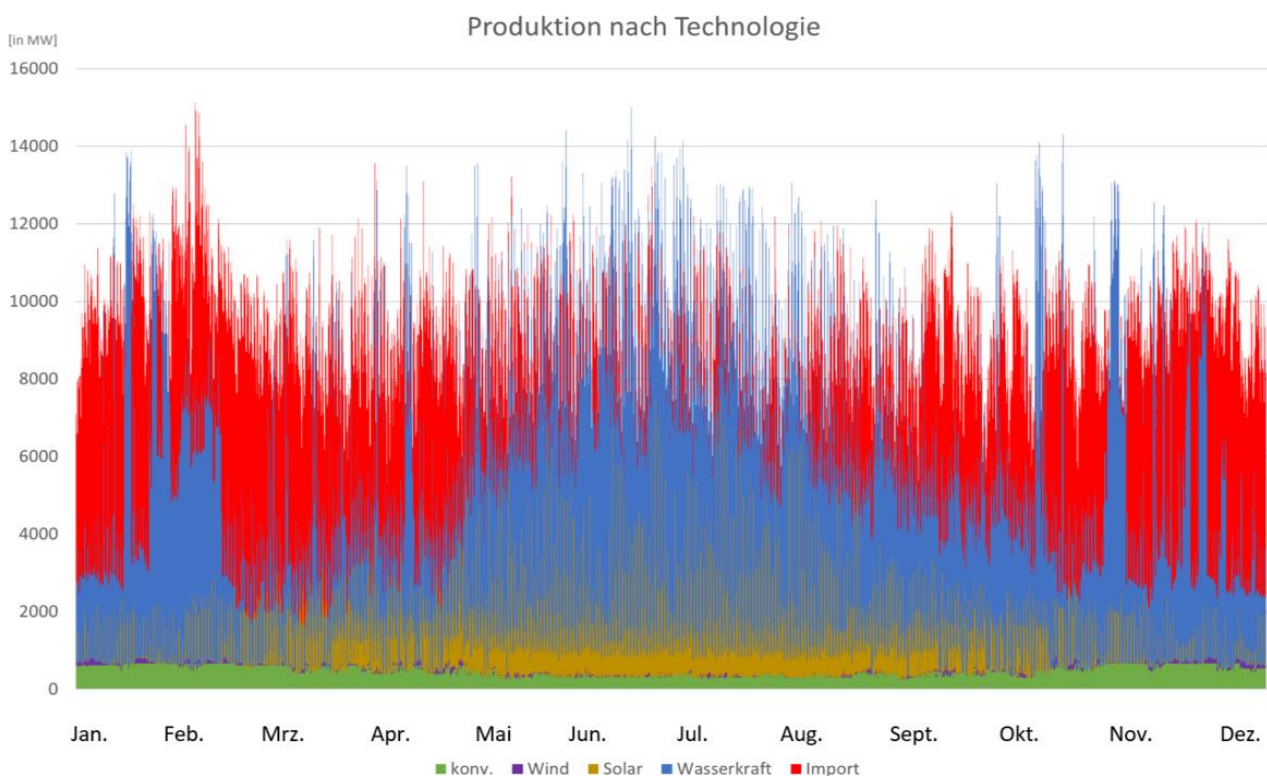


Abbildung 19: Strommix der Energieperspektiven2050+ (BfE, Energieperspektiven2050+, 2023)

Auf der vertikalen Achse sind die Produktionswerte der verschiedenen Energieressourcen dargestellt. Auf der horizontalen Achse wird die Zeit in Monaten abgebildet. Die Daten gliedern sich zur Abdeckung der Nachfrage in fünf Technologien, jede Ressource entspricht einer Farbe. In der Abbildung sind saisonale Schwankungen in der Energieproduktion ersichtlic. Die Kombination von Technologien verändert sich im Laufe des Jahres, um die Nachfrage zu decken und die Effizienz zu maximieren. Die Grafik liefert eine detaillierte Übersicht über die Komplexität und Dynamik des Strommixes auf einer stündlichen Basis der Schweiz im Jahr 2050. Sie unterstreicht die Bedeutung einer diversifizierten Energiequelle und einer effizienten Energiepolitik, um die Nachhaltigkeit der Stromversorgung zu gewährleisten. Insgesamt ist zu erkennen, dass die Energieperspektive des BfE einen sehr hohen Anteil des Strombedarfs mit importierter Elektrizität abdeckt. Der Strommix wird hauptsächlich von der Technologie Wasserkraft und dem Importstrom dominiert (BfE, Energieperspektiven2050+, 2023).

7.2 Ergebnisvergleich: Modellergebnisse vs. Energieperspektiven2050+

In folgendem Kapitel werden die Ergebnisse des Optimierungsmodells mit dem Zukunftsszenario des BfE verglichen. In nachfolgender Tabelle werden die Ergebnisse des Optimierungsmodell dem Zukunftsszenario Energieperspektiven2050+ gegenübergestellt. Es werden die absoluten Werte der Produktionstechnologien für das Jahr 2050 abgebildet.

Energieperspektive2050+	Gesamtenergie des Jahres 2050 (in TWh)	optimales Modellergebnis	Gesamtenergie des Jahres 2050 (in TWh)
∅ Import	24.362	∅ Import	13.338
∅ Wasser	38.944	∅ Wasser	35.874
∅ Solar	11.112	∅ Solar	11.964
∅ Wind	0.354	∅ Wind	3.039
∅ konv.	4.241	∅ konv.	9.412

Tabelle 14: Vergleich der Modellergebnisse (BfE, Energieperspektiven2050+, 2023)

Aus dem Vergleich der Ergebnisse in der Tabelle ist zu erkennen, dass das Optimierungsmodell einen erheblich höheren Anteil für den Zubau an Windenergie aufweist. Auch ist der benötigte Stromimport im Optimierungsmodell erheblich geringer als in der Energieperspektive des BfE angenommen. Die Unterschiede basieren auf diversen Ursachen und Faktoren. Das erstellte lineare Optimierungsmodell berücksichtigt keine geographischen oder gesellschaftliche Gegebenheiten. Auch wurden bei der Modelloptimierung die konventionellen Energien als gesamte Einheit zur Vereinfachung der Projektproblematik verwendet, was dazu führt, dass der Anteil an nicht erneuerbaren konventionellen Energie bis ins Jahr 2050 unverändert bleibt. Insgesamt ist beim Vergleich der beiden Szenarien der Hauptunterschied beim Stromimport und der Windenergiegewinnung zu vermerken.

7.3 Ergebnisvergleich: Vergleich des Stromimports im Jahr 2050

In diesem Kapitel werden die Modellergebnisse des Imports, mit dem vom Bundesamt für Energie verfassten Szenario verglichen. Der absolute Stromimport für das Jahr 2050 ist gemäss Tabelle 14 rund doppelt so hoch wie der benötigte Import im Modellergebnis. In folgender Grafik werden die zwei Zeitreihen für das gesamte Jahr 2050 gegenübergestellt.

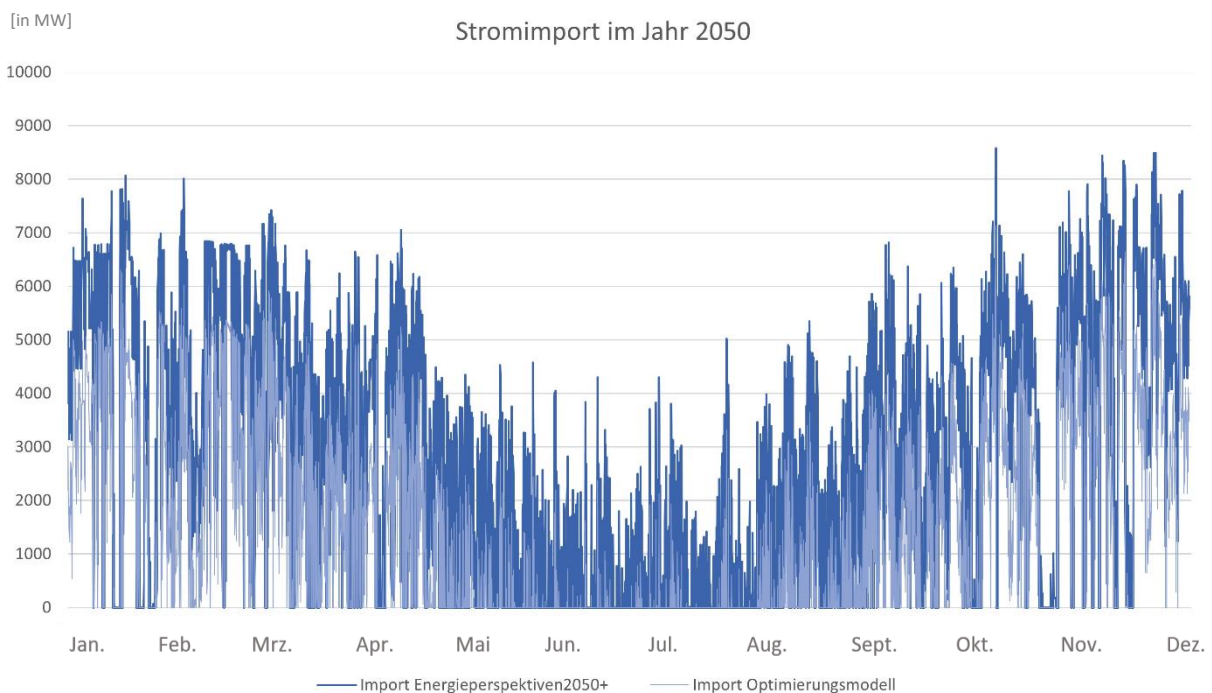


Abbildung 20: Vergleich des Stromimports im Jahr 2050 (BfE, Energieperspektiven2050+, 2023)

Aus der Abbildung sind Trends und eine klare Saisonalität des Stromimports vom Modell sowie auch vom Szenario der Energieperspektive2050+ erkennbar. Allgemein ist bemerkenswert, dass besonders in den Wintermonaten auch in Zukunft Elektrizität importiert werden muss, um den Strombedarf der Schweiz zu decken. Im Gegensatz zu dem Stromimport der Energieperspektive benötigt das Modell mit dem optimalen Zubau über das ganze Jahr eine geringere Importleistung. Dies hängt damit zusammen, dass das Optimierungsmodell den Abbau bzw. den Rückgang nicht nachhaltiger konv. Energien nicht berücksichtigt sowie dank des Zubaus eine erhöhte Nennleistung für Solar- und Windenergie im Jahr 2050 nachgewiesen wird.

7.4 Zwischenfazit

Das vorangegangene Kapitel des Modellvergleichs hat einen detaillierten Vergleich zwischen den Modellergebnissen und der vom Bundesamt für Energie verfassten Energieperspektiven2050+ vollzogen. Beide Szenarien zeigen interessante Aspekte für die potenzielle Entwicklung der Schweizer Energieversorgung.

Das Szenario der Energiestrategie2050+ zeigt, dass eine Diversifizierung der Energiequellen und eine effiziente Energieverwaltung von zentraler Bedeutung ist, um eine nachhaltige Stromversorgung erzielen zu können.

Das Modellergebnis zeigt eine ähnliche Tendenz, wobei der optimale Mix aus Produktionstechnologien jedoch etwas unterschiedlicher zusammensetzt. Insbesondere sieht das Modell einen deutlich stärkeren Ausbau von Windenergie vor, was zu einer geringeren Abhängigkeit von Stromimporten aus dem Ausland führt und somit auch zu einer geringeren Winterstromlücke. Beim Vergleich der Stromimporte ist festzustellen, dass das Modell weniger Importe benötigt. Dies ist auf den höheren Anteil von erneuerbaren Energien im Modell zurückzuführen, welcher zu einer erhöhten Nennleistung der jeweiligen Technologien führt. Die Untersuchung von Szenarien mit einer positiven und negativen Abweichung der erwarteten Stromgesamtnachfrage verdeutlicht, dass es wichtig ist, flexibel auf Veränderungen in der Nachfrage reagieren zu können und zeigt die Dimensionen, welche notwendig wäre bei einer Abweichung des angenommenen Szenarios.

Insgesamt zeigt die Analyse und der Vergleich, dass die zukünftige Gestaltung des schweizerischen Strommixes eine komplexe Herausforderung ist, welche eine sorgfältige Planung und Abwägung der unterschiedlichen Aspekte erfordern. Die Ergebnisse dieser Arbeit können als Basis für weitere Forschungen und Analysen in diesem Bereich dienen. Im Allgemeinen kann schlussfolgernd im Modellvergleich bemerkt werden, dass die Ausserbetriebnahme der Kernenergie das derzeitige Problem der Winterstromlücke verschlechtert und dass erneuerbare Energien erheblich ausgebaut werden müssen, um die Gesamtleistung der Kernenergie möglichst vollständig zu kompensieren.

8 Diskussion

Die Bachelor-Diplomarbeit beschäftigte sich mit der Bestimmung eines Stromproduktionsmixes in Bezug auf den optimalen Ausbau der erneuerbaren Energien bis ins Jahr 2050. Das Ziel bestand darin den Ausbau der erneuerbaren Energien signifikant zu erhöhen, um die Umsetzung der Ziele der Energiestrategie2050 zu simulieren, unter der Berücksichtigung die Schweizer Elektrizitätsnachfrage jederzeit abdecken zu können. Das erstellte Optimierungsmodell, welches auf linearer Optimierung /Programmierung basiert, ermöglicht es unterschiedliche Szenarien zu simulieren. Mit Hilfe dieses Modells, konnte eine optimale Kombination von erneuerbaren Energiequellen ermittelt werden. Die Modellergebnisse liefern wertvolle Erkenntnisse für den zukünftigen Ausbaus der alternativen Energieressourcen. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Integration und der Ausbau erneuerbarer Energien in den Schweizer Strommix technisch und auch wirtschaftlich realisierbar sind, jedoch erhebliche Bemühungen seitens Politik und Bevölkerung in Anspruch nimmt. Ausserdem zeigen die Forschungsergebnisse, dass eine verstärkte Nutzung von Wasser-, Wind-, und Solarenergie die signifikante Reduzierung der CO₂ Emissionen ermöglicht. Es kann insgesamt zusammengefasst werden, dass die Ziele der Energiestrategie2050 realisierbar sind, jedoch laut den errechneten Ergebnissen des Optimierungsmodells und gemäss Energieperspektive2050+ bleibt die Schweiz weiterhin auch in Zukunft Stromimporteur, um den nationalen Strombedarf decken zu können.

Ein wichtiges Ergebnis der Modelloptimierung ist auch die Bedeutung der Wasserkraft in der Schweiz. Sie ist eine bewährte und zuverlässige Energiequelle, welche schon heute einen hohen Anteil an erneuerbarer Stromproduktion ermöglicht. Insgesamt produziert die Schweiz im internationalen Vergleich überdurchschnittlich viel Elektrizität mit Wasserkraft, was auf die vorteilhafte geografische Lage zurückgeführt werden kann. Im Gegensatz zu Wind und Solarenergie, ist die Stromerzeugung mit Wasserkraft deutlich kontrollierbarer und als insgesamt konstant erzeugende Energiequelle zu betrachten.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis die Bedeutung von Windenergie in Bezug auf die Winterstromlücke. Während die Höchstleistungen von PV-Anlagen in den Sommermonaten maximal verfügbar sind, eignet sich die Technologie Windenergie speziell im Winter besser zur Produktion von Elektrizität. Die Ergebnisse des Modells können in einem nächsten Schritt mit einer Kapazitätsverfügbarkeit-Überprüfung der Schweizer Ressourcen abgeglichen werden.

Der Vergleich der Modellergebnisse mit der Energieperspektive2050+ konnte die optimale Nutzung auf Basis der formulierten Zielfunktion und den berücksichtigten Nebenbedingungen von Wind- und Solarenergie aufzeigen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine unterschiedliche Nutzung von erneuerbaren Energien und ein kombinierter Mix für den zukünftigen Ausbau des Energiemixes unterstützend wirkt. Insbesondere die Kombination kann eine bessere Verteilung der Stromerzeugung ermöglichen. In Bezug auf die Winterstromlücke zeigen die Ergebnisse eindeutig, dass die erneuerbare Energiequelle Windenergie besser zur Minimierung des Winterstromdefizit passt.

Wichtig in Bezug auf das Modell sind bestimmte Einschränkungen. Das Optimierungsmodell berücksichtigt Annahmen. Es ist zu bemerken, dass das Modell eine vereinfachte Projektion des Energiemarkts Schweiz darstellt, und es müssen weitere Untersuchungen und Studien durchgeführt werden, um die Robustheit der Modellergebnisse zu überprüfen. Abschliessend kann festgehalten werden, dass das erstellte Modell einen Beitrag zur Entwicklung einer Strategie für den Ausbau der zukünftigen erneuerbaren Energien leisten kann und weiter aufbaufähig ist.

9 Schlussbetrachtung und Ausblick

In folgendem Kapitel werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und die zu Beginn definierten Zielfragen beantwortet. Ausserdem werden die Lessons Learned und eine Handlungsempfehlung für den zukünftigen Forschungsbedarf abgegeben.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel der Bachelor-Diplomarbeit war es herauszufinden, wie die erneuerbaren Energiequellen in Zukunft ausgebaut werden können, um einen optimalen Stromproduktions-Mix für das Jahr 2050 zu erarbeiten. Das Ergebnis der Forschungsarbeit verdeutlicht die Wichtigkeit und das Potenzial der Solar- und Windenergie in Bezug auf das Winterstromproblem. Im Laufe der Arbeit wurde das grösste Potenzial zur Reduktion des Stromdefizits im Winter in der Technologie Windenergie identifiziert, da die Abhängigkeit der Sonne von PV-Anlagen besonders in den Wintermonaten einen negativen Effekt auf die Abdeckung der Schweizer Nachfrage hat, eignet sich die Windenergie für die Stromproduktion im Winter zuverlässiger und besser als Solarenergie. Die Forschungsergebnisse verdeutlichen, dass auch bei optimalen Bedingungen und einem optimalen Ausbau der erneuerbaren Energiequellen zukünftig auch vermehrt Strom im Winter importiert werden muss. Eine komplette Unabhängigkeit der Schweizer Energieversorgung ist nicht das Ziel der Energiepolitik, da in den Grenzregionen auch aus ökologischen sowie verlusttechnischen Gründen ein Handel mit dem Ausland erstrebenswert ist.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit, dass eine Umstellung auf erneuerbare Energien nicht unmöglich ist, jedoch mit neuen Herausforderungen und erheblichen Investitionen zusammenhängt. Besonders in Bezug auf das Winterstromproblem muss die Energiegewinnung durch Windenergie bei einer Ausserbetriebnahme der Kernkraftwerke und den nicht erneuerbaren Energien berücksichtigt und detaillierter in Betracht gezogen werden.

9.2 Lessons Learned

Die Forschungsthematik zeigte die Komplexität und die verschiedenen Aspekte der zukünftigen Energiepolitik der Schweiz. Mit Hilfe der vorhandenen Grundkenntnisse und den während des Studiums erlernten Fähigkeiten, war es mir möglich ein solch komplexes Optimierungsproblem mathematisch zu formulieren und mit Hilfe des Tools Python in einem Softwarecode exemplarisch zu lösen. Ich konnte dabei sehr viel Wissen aus den vorangegangenen Modulen zusammenführen. Die unterschiedlichen Aspekte der Projektproblematik konnte ich mit Hilfe des interdisziplinären Studiums gut nachvollziehen und stellt somit den Abschluss des Wirtschaftsingenieurstudiums dar.

Während der Forschungsarbeit habe ich besonders viel in Bezug auf die Modellierung und die Datenanalyse gelernt. Mit Hilfe der Programmiersprache Python konnte ich Datensätze gut bearbeiten und anschliessend im Modell simulieren.

Eine weiteres wichtiges Learning in Bezug auf die Forschungsaufgabe ist die Bedeutung von Windenergie für die Zukunft. Bei Betrachtung der Winterstromlücke ist zurzeit mit den existierenden Technologien der Windenergieausbau am besten geeignet, um einem Defizit im Winter vorzubeugen. Insgesamt konnte ich während dieses Projekts die verschiedenen interdisziplinären Aspekte meines Studiums abrunden und in der Forschungsaufgabe vertiefen.

9.3 Handlungsempfehlung

Um das Forschungsthema detaillierter zu betrachten, wird empfohlen dem Modell zusätzliche Nebenbedingungen und Einschränkungen in Bezug auf die Ausbaupkapazität der erneuerbaren Energien zu implementieren. Dazu sind weitere Recherchen in Bezug auf potenzielle Energieerzeugungsstandorte für Wind- und Wasserenergie notwendig. Auch können in einem weiteren Schritt die konv. Energien detaillierter im Modell implementiert und stündlich berücksichtigt werden, um die Reduktion von nicht erneuerbarer konventioneller Energie zu simulieren. Weiter können auch mögliche politische Ereignisse im Modell berücksichtigt werden, wie beispielsweise keine Ausserbetriebnahme oder nur eine Teil-Ausserbetriebnahme der Kernenergie. Abschliessend können damit neue Simulationsergebnisse erstellt werden, was zu weiteren genaueren Untersuchung des Energieversorgungsmarkt der Zukunft führt.

9.4 Zukünftiger Forschungsbedarf

In der Bachelor-Diplomarbeit wurde der optimale Ausbau gemäss dem erstellten Optimierungsmodell ermittelt. Da sich für die unterschiedlichen Szenarien in der Energiepolitik auch verschiedene Modelle erarbeiten lassen, sollte für den zukünftigen Forschungsbedarf das Modell mit weiteren Szenarien abgeglichen werden. Weiterhin bestehen jedoch bleibt das Winterstromdefizit, welches auch bei Umsetzung der Ziele der Energiestrategie2050 und gemäss des BfE auch zukünftig bestehen bleibt. Es wäre sinnvoll, wenn man eine geeignete Methode finden könnte, um den überschüssigen Solarstrom vom Sommer für die Winterstromlücke zu speichern. Dazu sind Forschungen im Bereich der Batterietechnologie notwendig, da bis heute (ausser von Pumpspeicherkraftwerken bei Wasserkraft) noch keine geeignete Methode zur längerfristigen Elektrizitätsspeicherung verwendet werden kann.

10 Literaturverzeichnis

- Admin.ch. (11. April 2023). *Strompreise in der Schweiz*. Von <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/> abgerufen
- AvenirSuisse. (01. Mai 2023). *Schweizer Stromnachfrage*. Von <https://www.avenir-suisse.ch/nachfrage-nach-strom-steigt/> abgerufen
- Axpo. (20. Mai 2023). *Lebensdauer Windanlage*. Von <https://www.axpo.com/ch/de/ueber-uns/energiewissen.detail.html/energiewissen/windkraft.html#:~:text=Die%20Lebensdauer%20einer%20Anlage%20liegt,leistungsf%C3%A4higere%2> abgerufen
- Axpo. (03. März 2023). *Strompreis Schweiz*. Von <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/> abgerufen
- Axpo. (02. März 2023). *Zahlen und Fakten zum Schweizer Strommarkt*. Von <https://www.axpo.com/ch/de/ueber-uns/medien-und-politik/strommarkt-schweiz.html> abgerufen
- Bachelorprint.ch. (13. März 2023). *Leitfaden empirische Forschung*. Von <https://www.bachelorprint.ch/methodik/empirische-forschung/> abgerufen
- BfE. (02. Mai 2023). *Energieperspektiven2050+*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html> abgerufen
- BfE. (09. Mai 2023). *Energiestatistiken*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html> abgerufen
- BfE. (22. Februar 2023). *Energiestrategie2050*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html> abgerufen
- BfE. (22. Februar 2023). *Energiestrategie2050*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html> abgerufen
- BfE. (2. April 2023). *Instrumente Energiestrategie*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiepolitik/agenda-2030.html> abgerufen
- BfE. (10. April 2023). *Kosten Windenergie*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/windenergie.html> abgerufen
- BfE. (05. Mai 2023). *Reservekraftwerke*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/stromversorgung/winterreserve.html> abgerufen
- Bigdata-Insider. (11. April 2023). *Python*. Von <https://www.bigdata-insider.de/was-ist-python-a-730480/> abgerufen
- Bürgi, R. (01. März 2023). *www.energie-experten.ch*. Von [www.energie-experten.ch](https://www.energie-experten.ch/de/detail/die-kernelemente-der-energiestrategie-2050.html): <https://www.energie-experten.ch/de/detail/die-kernelemente-der-energiestrategie-2050.html> abgerufen
- Buzer.de. (03. Juni 2023). *Barwertfaktor Windkraftanlagen*. Von <https://www.buzer.de/gesetz/9284/a166518.htm> abgerufen
- EDA. (15. März 2023). *Energie, Fakten und Zahlen*. Von <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/de/home/wirtschaft/energie/energie---fakten-und-zahlen.html> abgerufen
- Enargus. (03. März 2023). *Optimierungsmodell*. Von https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d8265-2/*/*Optimierungsmodell.html?op=Wiki.getwiki abgerufen
- Energie.ch. (2. April 2023). *Herstellungskosten Wasserkraft*. Von <https://energie.ch/wasserkraft/> abgerufen

- Energie360.ch. (07. April 2023). *Winterstromlücke*. Von <https://www.energie360.ch/de/energie-360/wissen/winterstromluecke/> abgerufen
- Energieexperten. (13. März 2023). *Massnahmen der Energiestrategie2050*. Von <https://www.energie-experten.ch/de/detail/die-kernelemente-der-energiestrategie-2050.html> abgerufen
- Energieexperten. (05. April 2023). *Stilllegungsplan Kernkraftwerke*. Von [https://www.energie-experten.ch/de/wissen/detail/kernkraft-in-der-schweiz-abschalten-oder-ausbauen.html#:~:text=Das%20w%C3%BCrde%20bedeuten%2C%20dass%20Bezau,Kernenergie%20auskommen%20\(siehe%20Grafik\).](https://www.energie-experten.ch/de/wissen/detail/kernkraft-in-der-schweiz-abschalten-oder-ausbauen.html#:~:text=Das%20w%C3%BCrde%20bedeuten%2C%20dass%20Bezau,Kernenergie%20auskommen%20(siehe%20Grafik).) abgerufen
- Energie-Lexikon.info. (29. März 2023). *Wirkungsgrad von Pumpspeicherkraftwerken*. Von <https://www.energie-lexikon.info/pumpspeicherkraftwerk.html> abgerufen
- Energieschweiz. (01. März 2023). *Solarenergie*. Von <https://www.energieschweiz.ch/erneuerbare-energien/solarenergie/> abgerufen
- Energiestrategie2050. (22. Februar 2023). *www.bfe.admin.ch*. Von www.bfe.admin.ch: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html> abgerufen
- Epexspot.com. (1. April 2023). *Marktintegration erneuerbarer Energien*. Von <https://www.epexspot.com/en/downloads#market-data> abgerufen
- Epexspot.com. (1. April 2023). *Marktintegration erneuerbarer Energien*. Von https://www.epexspot.com/sites/default/files/download_center_files/202011_Market%20integration%20of%20renewables_DE.pdf abgerufen
- Günther, P. D. (11. März 2023). *Methoden der Datenrecherche*. Von <https://tu-dresden.de/bu/wirtschaft/bwl/brw/ressourcen/dateien/studium/wissenschaftliches-arbeiten/e-learning/Praesentation-Methoden-der-Datenrecherche.pdf?lang=de> abgerufen
- Günther, P. D. (11. März 2023). *Methoden der Datenrecherche*. Von <https://tu-dresden.de/bu/wirtschaft/bwl/brw/ressourcen/dateien/studium/wissenschaftliches-arbeiten/e-learning/Praesentation-Methoden-der-Datenrecherche.pdf?lang=de> abgerufen
- Hans Robert Hansen, J. M. (2019). *Wirtschaftsinformatik*. München: De Gruyter Oldenbourg.
- Imhof, G., & Grüter, U. (2010). *Wissenschaftliches Arbeiten und Schreiben*. Horw: Hochschule Luzern, T&A.
- Ineichen, M. (2010). *Wissenschaftliche Arbeiten konstruieren und gliedern (Eulenskript)*. Luzern: Hochschule Luzern Wirtschaft.
- Kache, D.-I. M. (22. Februar 2023). *Leitfaden Literaturrecherche*. Von www.tu-dresden.de: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibb/sft/ressourcen/dateien/lehre/informationen/Leitfaden_Literaturrecherche.pdf?lang=de abgerufen
- Kache, D.-I. M. (22. Februar 2023). *Leitfaden Literaturrecherche*. Von www.tu-dresden.de: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibb/sft/ressourcen/dateien/lehre/informationen/Leitfaden_Literaturrecherche.pdf?lang=de abgerufen
- Lernprogrammieren.de. (11. März 2023). *NumPy Tutorial*. Von <https://lernprogrammieren.de/numpy-tutorial/#:~:text=Wenn%20du%20im%20wissenschaftlichen%20Bereich,zu%20arbeiten.> abgerufen
- Marketinginstitut. (27. Februar 2023). *Marktanalyse*. Von <https://www.marketinginstitut.biz/blog/marktanalyse/> abgerufen
- Math.Uni-Hamburg. (3. April 2023). *Mathematische Modellierung*. Von <https://www.math.uni-hamburg.de/home/struckmeier/modsim10/Kap1.pdf> abgerufen

- MathWorks. (07. März 2023). *Lineare Programmierung*. Von <https://de.mathworks.com/discovery/linear-programming.html> abgerufen
- Planet-wissen. (23. Februar 2023). *Windenergie*. Von https://www.planet-wissen.de/technik/energie/erneuerbare_energien/windenergie-110.html abgerufen
- Python.org. (03. April 2023). *www.python.org*. Von <https://www.python.org/about/gettingstarted/> abgerufen
- Quaschnig, V. (2021). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*. Berlin: Carl Hanser Verlag.
- Solarratgeber. (15. April 2023). *Kosten Solarenergie*. Von <https://solar-ratgeber.ch/photovoltaik/kosten-preise/> abgerufen
- Statista.com. (01. Mai 2023). *Umsatz SchweizerEnergieversorgung*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/291887/umfrage/umsatz-im-schweizer-energieversorgungssektor/> abgerufen
- Swissgrid. (01. Mai 2023). *Schweizer Übertragungsnetz*. Von <https://www.swissgrid.ch/de/home/operation/power-grid/swiss-power-grid.html> abgerufen
- Swissnuclear. (1. Mai 2023). *Gestehungskosten konv. Energie*. Von https://www.swissnuclear.ch/de/vergleich-der-stromgestehungskosten-_content---1--3023--536.html abgerufen
- Swissnuclear.ch. (1. Mai 2023). *Gestehungskosten Kernenergie*. Von https://www.swissnuclear.ch/de/gestehungskosten-_content---1--3023.html abgerufen
- SwissSolar. (20. Mai 2023). *Lebensdauer Solaranlage*. Von <https://www.swissolar.ch/ueber-solarenergie/haeufig-gestellte-fragen/#:~:text=Welche%20Lebensdauer%20hat%20eine%20Solaranlage,Lebensdauer%20von%20%C3%BCber%2025%2> abgerufen
- VSE. (19. April 2023). *Stromnetz Schweiz*. Von <https://www.strom.ch/de/energiewissen/stromnetze> abgerufen
- VSE. (22. April 2023). *Überblick erneuerbare Energien*. Von [www.strom.ch: https://www.strom.ch/de/energiewissen/erneuerbare-energien](https://www.strom.ch/de/energiewissen/erneuerbare-energien) abgerufen
- VSE. (22. April 2023). *Überblick erneuerbare Energien*. Von [www.strom.ch: https://www.strom.ch/de/energiewissen/erneuerbare-energien](https://www.strom.ch/de/energiewissen/erneuerbare-energien) abgerufen
- Wikipedia. (01. März 2023). *Erneuerbare Energien*. Von https://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare_Energien abgerufen
- Wikipedia. (11. März 2023). *mathematisches Modell*. Von https://de.wikipedia.org/wiki/Mathematisches_Modell#:~:text=Mathematische%20Modelle%20sind%20eine%20vereinfachte,nehmen%20daf%C3%BCr%20Vereinfachungen%20in%20Kauf. abgerufen
- Wirtschaftlexikon. (Juni. 01 2023). *Formel für Barwertfaktor*. Von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/rentenrechnung-42681> abgerufen
- Wirtschaftslexikon. (01. Juni 2023). *Berechnung annuitätische Investitionskosten*. Von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/annuitaet-27107> abgerufen
- Wolfgang Domschke, A. D. (2015). *Einführung in Operations Research*. Berlin: Springer Verlag.

Anhang

Modellcode:

```
1 # Importiere für das Modell notwendige Bibliotheken
2 import os
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import numpy as np
5 import pandas as pd
6 import statistics
7 import pyomo.environ as pyo
8 from pyomo.environ import (Constraint, ConcreteModel)
9 from pyomo.opt.results.results_ import SolverResults
10 from pyomo.core.base.PyomoModel import ConcreteModel
11 from pyomo.environ import *
12 from pyomo.opt import SolverFactory
13 from pandas.core.frame import DataFrame as df
14 from math import isclose
15 from typing import Callable
16
17
18 # Speichere die Ergebnisse des Optimierungsmodell in einer Excel-Datei
19 def save_to_excel(xlsxfname: str, data: dict) -> None:
20     """
21     Save some of the optimisation result to excel for manual analysis
22     :param xlsxfname: Filename of excel
23     :param data: dict of tuple. Each entry corresponds to one sheet
24     :return: None
25     """
26     xlwriter = pd.ExcelWriter(xlsxfname)
27     for sheetname, (Zielvariable, optimal_index) in data.items():
28         Zielvariable.to_excel(xlwriter, sheet_name=sheetname,
29                               startcol=2, header=True, index=False)
30         optimal_index.to_excel(xlwriter, sheet_name=sheetname,
31                                startcol=0, header=True, index=False)
32     # dfZielvariable.to_excel(xlwriter, sheet_name='Produktion',
33     #                          startcol=2, header=True, index=False)
34     # dfZielvariableSpeicherStand.to_excel(xlwriter, sheet_name='SpeicherStand',
35     #                                       startcol=2, header=True, index=False)
36     # dfZielvariableSpeicherEin.to_excel(xlwriter, sheet_name='SpeicherEin',
37     #                                    startcol=2, header=True, index=False)
38     # dfZielvariableSpeicherAus.to_excel(xlwriter, sheet_name='SpeicherAus',
39     #                                    startcol=2, header=True, index=False)
40     #
41     # optimal_index.to_excel(xlwriter, sheet_name='Produktion',
42     #                        startcol=0, header=True, index=False)
43     # optimal_indexSpeicherStand.to_excel(xlwriter, sheet_name='SpeicherStand',
44     #                                     startcol=0, header=True, index=False)
45     # optimal_indexSpeicherEin.to_excel(xlwriter, sheet_name='SpeicherEin',
46     #                                   startcol=0, header=True, index=False)
47     # optimal_indexSpeicherAus.to_excel(xlwriter, sheet_name='SpeicherAus',
48     #                                   startcol=0, header=True, index=False)
49     xlwriter.close()
50     return None
```

```
53 # Definition Pfad einlesen der Daten
54
55 # Importiere Wasserstrom-Produktionsdaten
56 #Laufwasser_input_file = "Wasserkraft2050.xlsx.xlsx"
57 #Laufwasser_df = pd.read_excel(Laufwasser_input_file)
58 #print( Laufwasser_df )
59 #print( '\n' )
60
61 # Importiere Wind- und Solar Produktionsdaten
62 wind_solar_input_file = "Wind_Solar2050.xlsx"
63 wind_solar_df = pd.read_excel(wind_solar_input_file)
64 print(wind_solar_df.columns)
65 print( wind_solar_df )
66 print( '\n' )
67
68 # Importiere Stromnachfrage-Daten (Trainings Data)
69 #ref_path      = 'C:\\Users\\sandr\\PycharmProjects\\BAT\\'
70 ref_filename   = 'Stromnachfrage2050.xlsx'
71 #ref_file_train = ref_path + ref_filename
72 df = pd.read_excel(ref_filename, engine='openpyxl')
73 print(df)
74 print( '\n' )
75 print(df.columns)
76
77
78 # Definition & Erstellung des Modells
79 m = pyo.ConcreteModel()
80 m.Stunde = pyo.RangeSet(0, 8759) # Zeitindex
81
82 m.Technologie = pyo.Set(initialize=["Laufwasser",
83 #
84 #                                     "Kern", "Konv", "Import", "Wind", "Solar"])
85 m.Speicher = pyo.Set(initialize=["Pumpspeicher"])
86
87 # Zubau der erneuerbaren Technologien
88
89 # m.ZubauWind = pyo.Param(initialize=0) # Anfangswert 0
90 # m.ZubauPV = pyo.Param(initialize=0) # Anfangswert 0
91
92 # Parameter - Max. Nennleistung der Produktionstechniken in MW
93
94 # Aufteilung der Stromnachfrage
95 m.nachfrage_waermepumpen_anteil = pyo.Param(initialize=0.1) # z.B. 10%
96 m.nachfrage_elektroautos_anteil = pyo.Param(initialize=0.2) # z.B. 20%
97 m.nachfrage_Rest_Anteil = pyo.Param(initialize=0.7) # z.B. 70%
98
99
```

```
102
103 m.prdktionskap_Laufwasser = pyo.Param(m.Stunde,
104                                     initialize=wind_solar_df['Produktion Wasserkraft'].to_dict())
105
106 m.prdktionskap_Wind = pyo.Param(m.Stunde,
107                                 initialize=wind_solar_df['Wind'].to_dict())
108
109 m.prdktionskap_Solar = pyo.Param(m.Stunde,
110                                 initialize=wind_solar_df['Solar'].to_dict())
111
112 m.prdktionskap = pyo.Param(m.Technologie,
113                             initialize={"Kern": 0,
114                                         "Konv": 2016,
115                                         "Import": 10000,
116                                         })
117
118 m.Elec_demand = pyo.Param(m.Stunde,
119                             initialize=df['MW'].to_dict())
120
121 m.spr_ladung_kap = pyo.Param(m.Speicher,
122                             initialize={"Pumpspeicher": 100})
123
124 m.sprkapazitaet = pyo.Param(m.Speicher,
125                             initialize={"Pumpspeicher": 1000})
126
127 m.spreffizienz = pyo.Param(m.Speicher, initialize={"Pumpspeicher": 0.75})
128
129 m.kosten = pyo.Param(m.Technologie, initialize={"Laufwasser": 2, "Kern": 30, "Konv": 140, "Import": 200, "Wind": 0, "Solar": 0})
130
131
132
133 # Variablen:
134 m.produktion = pyo.Var(m.Stunde, m.Technologie,
135                         domain=pyo.NonNegativeReals)
136 m.sprstand = pyo.Var(m.Stunde, m.Speicher, domain=pyo.NonNegativeReals)
137 m.spr_ein = pyo.Var(m.Stunde, m.Speicher, domain=pyo.NonNegativeReals)
138 m.spr_aus = pyo.Var(m.Stunde, m.Speicher, domain=pyo.NonNegativeReals)
139
140 m.nachfrage_waermepumpen = pyo.Var(m.Stunde, domain=pyo.NonNegativeReals)
141 m.nachfrage_elektroautos = pyo.Var(m.Stunde, domain=pyo.NonNegativeReals)
142 m.restnachfrage = pyo.Var(m.Stunde, domain=pyo.NonNegativeReals)
143
144 m.ZubauWind = pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals)
145 m.ZubauPV = pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals)
146
147
```

```
148 # Nebenbedingungen:
149
150 # Nebenbedingung 1
151 # Last muss gedeckt werden
152 m.Constraint1 = pyo.ConstraintList()
153 for i in m.Stunde:
154     m.Constraint1.add(m.produktion[i, "Laufwasser"]
155                     + m.produktion[i, "Kern"]
156                     + m.produktion[i, "Konv"]
157                     + m.produktion[i, "Import"]
158                     + m.produktion[i, "Wind"]
159                     + m.produktion[i, "Solar"]
160                     + m.spr_aus[i, "Pumpspeicher"]
161                     == m.nachfrage_waermepumpen[i] + m.nachfrage_elektroautos[i] + m.restnachfrage[i]
162                     + m.spr_ein[i, "Pumpspeicher"])
163
164 # Nebenbedingung 2
165 # Kapazitätsbeschränkung Laufwasser
166 m.Constraint2Laufwasser = pyo.ConstraintList()
167 for i in m.Stunde:
168     m.Constraint2Laufwasser.add(m.produktion[i, "Laufwasser"] <= m.prdktionskap_Laufwasser[i])
169
170 # Kapazitätsbeschränkung Wind & Solar
171 m.Constraint2 = pyo.ConstraintList()
172 for j in m.Technologie ^ {"Wind", "Solar", "Laufwasser"}:
173     for i in m.Stunde:
174         m.Constraint2.add(m.produktion[i, j] <= m.prdktionskap[j])
175
176 # Zubau Windenergie
177 m.Constraint2Wind = pyo.ConstraintList()
178 for i in m.Stunde:
179     # m.Constraint2Wind.add(m.produktion[i, "Wind"] <= m.prdktionskap_Wind[i] * (1 + m.ZubauWind))
180     m.Constraint2Wind.add(m.produktion[i, "Wind"] <= m.prdktionskap_Wind[i]
181                         + m.ZubauWind*m.prdktionskap_Wind[i]/max(m.prdktionskap_Wind[i] for i in m.Stunde))
182
183 # Zubau Solarenergie
184 m.Constraint2PV = pyo.ConstraintList()
185 for i in m.Stunde:
186     # m.Constraint2PV.add(m.produktion[i, "Solar"] <= m.prdktionskap_Solar[i] * (1 + m.ZubauPV))
187     m.Constraint2PV.add(m.produktion[i, "Solar"] <= m.prdktionskap_Solar[i]
188                     + m.ZubauPV*m.prdktionskap_Solar[i]/max(m.prdktionskap_Solar[i] for i in m.Stunde))
189
190 # Nebenbedingung 3
191 # Zusammensetzung der Stromnachfrage
192 m.Constraint3 = pyo.ConstraintList()
193 for i in m.Stunde:
194     m.Constraint3.add(m.nachfrage_waermepumpen[i] == m.Elec_demand[i] * m.nachfrage_waermepumpen_anteil)
195     m.Constraint3.add(m.nachfrage_elektroautos[i] == m.Elec_demand[i] * m.nachfrage_elektroautos_anteil)
196     m.Constraint3.add(m.restnachfrage[i] == m.Elec_demand[i] * (1 - m.nachfrage_waermepumpen_anteil - m.nachfrage_elektroautos_anteil))
197
198 # Leistungsbeschränkung auf Speicher-Entladung
199 m.Constraint8 = pyo.ConstraintList()
200 for i in m.Stunde:
201     for j in m.Speicher:
202         m.Constraint8.add(m.spr_aus[i, j] <= m.spr_ladung_kap[j])
203
204 # Leistungsbeschränkung auf Speicher-Beladung
205 m.Constraint9 = pyo.ConstraintList()
206 for i in m.Stunde:
207     for j in m.Speicher:
208         m.Constraint9.add(m.spr_ein[i, j] <= m.spr_ladung_kap[j])
209
210 # Speicherladung im Verhältnis zum vorherigen Zeitschritt
211 m.Constraint10 = pyo.ConstraintList()
212 for i in pyo.RangeSet(0, 8758):
213     for j in m.Speicher:
214         m.Constraint10.add(m.sprstand[i + 1, j] == m.sprstand[i, j]
215                         + m.spr_ein[i, j] * m.spreffizienz[j]
216                         - m.spr_aus[i, j])
```

```
216 # maximale Speicherkapazität
217 m.Constraint11 = pyo.ConstraintList()
218 for i in m.Stunde:
219     for j in m.Speicher:
220         m.Constraint11.add(m.sprstand[i, j] <= m.sprkapazitaet[j])
221
222 def DispatchRule(m):
223     return sum(m.produktion[i, j] * m.kosten[j] for i in m.Stunde for j in m.Technologie) + m.ZubauWind * 229933.3 + m.ZubauPV * 125800
224
225 m.Objective=pyo.Objective(rule=DispatchRule)
226
227
228 # Solve Statement
229 solverpath_exe = 'C:\\Users\\sandr\\Desktop\\winglpk-4.65\\glpk-4.65\\w64\\glpsol.exe'
230
231 opt = pyo.SolverFactory('glpk', executable=solverpath_exe)
232 opt.solve(m, tee=True)
233 #solversuccess: SolverResults = opt.solve(m, tee=False)
234 # Assert if optimal solution could not be found
235 #assert str(solversuccess.solver.termination_condition) == "optimal", \
236 #    "Solver did not find a solution"
237 #m.pprint()
238
239 dfZielvariable = pd.DataFrame([pyo.value(m.produktion[i, j])
240                               for i in m.Stunde
241                               for j in m.Technologie])
242 dfZielvariable.columns = ['Produktion']
243
244
245 dfZielvariableSpeicherStand = pd.DataFrame([pyo.value(m.sprstand[i, j])
246                                             for i in m.Stunde
247                                             for j in m.Speicher])
248 dfZielvariableSpeicherStand.columns = ['Speicherstand']
249
250 dfZielvariableSpeicherEin = pd.DataFrame([pyo.value(m.spr_ein[i, j])
251                                           for i in m.Stunde
252                                           for j in m.Speicher])
253
254 dfZielvariableSpeicherEin.columns = ['SpeicherEin']
255
256 dfZielvariableSpeicherAus = pd.DataFrame([pyo.value(m.spr_aus[i, j])
257                                           for i in m.Stunde
258                                           for j in m.Speicher])
259 dfZielvariableSpeicherAus.columns = ['SpeicherAus']
260
261 optimal_index = pd.DataFrame.from_dict(m.produktion[i,j] for i in m.Stunde for j in m.Technologie)
262 optimal_indexSpeicherStand = pd.DataFrame.from_dict(m.sprstand[i,j] for i in m.Stunde for j in m.Speicher)
263 optimal_indexSpeicherEin = pd.DataFrame.from_dict(m.spr_ein[i, j] for i in m.Stunde for j in m.Speicher)
264 optimal_indexSpeicherAus = pd.DataFrame.from_dict(m.spr_aus[i, j] for i in m.Stunde for j in m.Speicher)
265
266 # optimal_index.columns = ['Stunde', 'Technologie']
267 # optimal_indexSpeicherStand.columns = ['Stunde', 'Speicher']
268 # optimal_indexSpeicherEin.columns = ['Stunde', 'Speicher']
269 # optimal_indexSpeicherAus.columns = ['Stunde', 'Speicher']
270
271
272 # Speichere Ergebnisse des Solvers in Excel-Datei:
273 save_to_excel('30.05.23_Ergebnisse00002.xlsx',
274              {'Produktion': (dfZielvariable,
275                              optimal_index),
276              'Speicherstand': (dfZielvariableSpeicherStand,
277                               optimal_indexSpeicherStand),
278              'SpeicherEin': (dfZielvariableSpeicherEin,
279                             optimal_indexSpeicherEin),
280              'SpeicherAus': (dfZielvariableSpeicherAus,
281                             optimal_indexSpeicherAus)})
282
283
284 print("ZubauPV: ", pyo.value(m.ZubauPV))
285 print("ZubauWind: ", pyo.value(m.ZubauWind))
286
287 # Visualisierung der Ergebnisse:
288 # Plote die Ergebnisse nach Zeit und Produktionsart
289 produktion_df = pd.DataFrame({tech: [pyo.value(m.produktion[i, tech]) for i in m.Stunde] for tech in m.Technologie})
290 produktion_df.index.name = "Stunde"
291 produktion_df.columns.name = "Technologie"
```

```
292
293 # Speichere Ergebnisse in geeigneter Form (Excel)
294 produktion_df.to_excel('C:\\Users\\sandr\\Desktop\\TEST-Results_30.05.2023.xlsx', index=False)
295
296 plt.figure(figsize=(12, 6))
297 plt.stackplot(produktion_df.index, [produktion_df[tech] for tech in m.Technologie], labels=m.Technologie)
298 plt.xlabel("Stunde")
299 plt.ylabel("Produktion (MW)")
300 plt.title("Produktion nach Technologie")
301 plt.legend(loc="upper left")
302 plt.grid()
303 plt.show()
```