



Lehrstuhl für Energieverbundtechnik

Masterarbeit

The background features a large, faint watermark of the University of Leoben seal. The seal is circular and contains a shield with four quadrants: top-left shows crossed hammers, top-right shows a stork, bottom-left shows a rampant lion, and bottom-right shows a staircase. The text 'UNIVERSITAS MONTANA LEOBENSIS' is written around the perimeter of the seal.

Modellierung und Optimierung des
österreichischen Energiesystems

Josef Steinegger, BSc

Mai 2021



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 26.05.2021



Unterschrift Verfasser/in
Josef Steinegger

KURZFASSUNG

In der #mission2030 der Bundesregierung bekennt sich Österreich zu internationalen Klimazielen und zu einer aktiven Klimaschutz- und Energiepolitik. Der österreichische Gesamtstromverbrauch soll bis 2030 zu 100 % bilanziell aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden. Auch soll der Ausbau von erneuerbaren Energieträgern gefördert werden.

Ziel der Arbeit ist ein örtlich und zeitlich aufgelöstes Datenmodell des österreichischen Energiesystems zu erarbeiten, welches als Basis für nachfolgenden Lastflussrechnungen und Optimierungsaufgaben dienen soll. Die Methodik der Datenaufbereitungen und die Integration der aufbereiteten Daten in das vorhandene, energieträgerübergreifende Lastflussberechnungsprogramm HyFlow sollen näher behandelt werden.

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurden Recherchen über örtlich und zeitlich aufgelöste Netzbedatungsmöglichkeiten und über erneuerbare Ausbauziele durchgeführt. Die örtliche Zuordnung der Energiedaten erfolgte über die Einteilung der Gebiete durch einen zellularen Ansatz anhand eines Voronoi Diagramms. Die entstandenen Gebiete wurden anschließend mit zeitlich aufgelösten Residuallasten und Lastprofilen bedatet. HyFlow wurde dahingehend erweitert, dass eine neue Betriebsstrategie, mithilfe eines programmierten, marktorientierten Optimierers integriert wurde, um auf Energiepreisen basierende, energieträgerübergreifende Optimierungen durchführen zu können. Mithilfe der aufbereiteten Energiedaten wurden Beispielregionen mit dem Ansatz der marktorientierten Optimierung simuliert und ausgewertet. Durch diese neu integrierte Betriebsstrategie ist es nun möglich, neben der globalen Optimierung (Optimal Power Flow) im HyFlow, auch lokale Optimierungen durchzuführen.

Ein Ergebnis dieser Arbeit ist ein Abbild des örtlich und zeitlich aufgelösten, österreichischen Energiesystems. Durch die marktorientierte Optimierung konnten die zusätzliche Flexibilitätsoptionen, die von Sektorkopplungen, wie etwa Power to Heat, Gas to Heat and/or Power oder Speichern in einem multiplen Energiesystem ausgehen, demonstriert werden. Um dem steigendem fluktuierendem Erzeuger- und Verbrauchermix entgegenzuwirken, kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf an Flexibilitätsoptionen in Zukunft ebenfalls steigen wird. Ein weiteres Ergebnis dieser Arbeit ist, dass durch die Integration von Sektorkopplungen in Energiesystemen, eine breite Flexibilität erreicht werden kann, welche der fluktuierenden Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen stabilisierend entgegenwirken kann.

ABSTRACT

In the federal government's #mission2030, Austria is committed to international climate goals and an active climate protection and energy policy. Within these climate goals, the total net electricity consumption in Austria is planned to be covered by 100% renewable energy sources by 2030. To achieve this goal, the expansion of renewable energy sources will be essential.

The aim of the work is to develop a spatially and temporally resolved data model of the Austrian energy system, which should serve as the basis for subsequent load flow calculations and optimization tasks. The data processing methodology and the integration of the processed data into the existing, cross-energy load flow calculation program HyFlow, will be dealt with in more detail.

To answer the research questions, research was carried out on spatially and temporally resolved network data options and on renewable expansion targets. The local allocation of the energy data was carried out by dividing the areas using a cellular approach based on a Voronoi diagram. The resulting areas were then calibrated with temporally resolved residual loads and load profiles. HyFlow has been expanded with the addition of a new operating strategy that uses a market-oriented optimizer to carry out cross-energy optimization based on energy prices. With the help of the processed energy data, sample regions were simulated and evaluated using a market-oriented optimization approach. With this newly integrated operating strategy, it is now possible to carry out regional optimizations in addition to global optimization (Optimal Power Flow) in HyFlow.

One result of this work is an image of the spatially and temporally resolved Austrian energy system. The market-oriented optimization made it possible to demonstrate the additional flexibility options that emanate from sector couplings such as power to heat, gas to heat, and/or power or storage in a multiple energy system. To counteract the increasing fluctuating producer and consumer mix, it can be assumed that the need for flexibility options will also increase in the future. Another result of this work is that through the integration of sector couplings in energy systems, a broad flexibility can be achieved, which can counteract the fluctuating energy generation from renewable sources in a stabilizing way.

VORWORT

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht und unterstützt haben.

Unter anderem gilt mein Dank dem Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, an der Montanuniversität Leoben und dessen Mitarbeitern. Hier möchte ich mich besonders bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger und Dipl.-Ing. Matthias Greiml bedanken, die sich bei all meinen Fragen immer Zeit für mich genommen haben und diese bestmöglich beantwortet haben.

Besonders möchte ich mich auch bei meiner Familie bedanken. Dabei gilt ein großer Dank meinen Eltern, Annamaria und Andreas sowie meiner Schwester Lea die mich bei dieser Arbeit aber auch bei meinem Studium immer bestmöglich unterstütz haben.

INHALTSVERZEICHNIS

Nomenklatur	I
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung.....	3
3 Theoretischer Hintergrund – Stand der Technik.....	5
3.1 Energienetze in Österreich	5
3.1.1 Stromnetz.....	5
3.1.2 Gasnetz.....	9
3.1.3 Wärmenetz.....	9
3.2 Energie in Österreich	10
3.3 Knotenoptimierung.....	13
3.3.1 Mathematischer Hintergrund	15
3.4 Räumliche Zuordnung.....	16
3.4.1 Räumliche Zuordnung – Infrastrukturkarten	16
3.4.2 Räumliche Zuordnung – Voronoi Diagramme.....	20
4 Aufbau, Modifikationen und Datenaufbereitung in und für HyFlow	24
4.1 HyFlow – Status quo	24
4.2 Datenaufbereitung.....	25
4.2.1 Jahresenergiemengen je USW-Bezirk	28
4.2.2 Residuallast je USW-Bezirk.....	32
4.2.3 Generatoren je USW-Bezirk	37
4.2.4 Speicher je USW-Bezirk.....	39
4.2.5 Hybridelemente je USW-Bezirk.....	39
4.3 Implementierung Flexibilitätsband.....	40
4.3.1 Berechnung Flexibilitätsband	43

Inhaltsverzeichnis

4.3.2	Marktorientierte Optimierung	48
5	Szenarien	59
5.1	Optimierung USW-Bezirk: Aspern	59
5.2	Optimierung USW-Bezirk: Stadtteil Wien	70
6	Diskussion.....	80
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	82
8	Literaturverzeichnis	84
9	Anhang	91
9.1	Marktorientierte Optimierung – Matrix M.....	91

NOMENKLATUR

Abkürzungen

AGGM	Austrian Gas Grid Managment
EAG	Erneuerbaren Energie Ausbaugesetz
DSM	Demand Side Management
GuD	Gas und Dampf
GtH	Gas to Heat
GtPH	Gas to Power and Heat
PtH	Power to Heat
HtP	Heat to Power
PtGH	Power to Gas and Heat
PV	Photovoltaik
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
WKA	Windkraftanlagen
KWKW	Kleinwasserkraftwerke
USW	Umspannwerk
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
SLP	Standardlastprofil
FG	Flexibilitätsgenerator
UG	Untergrenze
OG	Obergrenze
RL	Residuallast
FlexOptHe	Eigenschaften Hybridelemente (Flexibilitätsband)
H_storage	Eigenschaften Wärmespeicher (Flexibilitätsband)

Nomenklatur

G_storage	Eigenschaften Gasspeicher (Flexibilitätsband)
H_DSM	Eigenschaften Wärme-DSM (Flexibilitätsband)
G_DSM	Eigenschaften Gas-DSM (Flexibilitätsband)
ops	Optimierer Eigenschaften
GNetConnect	Gasnetzanschluss
HNetConnect	Wärmenetzanschluss
AB	Anfangsbestand
Opt_P_RL_Set	Vorgegebene Residuallast von HyFlow (Optimierer)
Opt_Converter	Eigenschaften Hybridelemente (Optimierer)
Opt_P_Storage	Eigenschaften Stromspeicher (Optimierer)
Opt_H_Storage	Eigenschaften Wärmespeicher (Optimierer)
Opt_G_Storage	Eigenschaften Gasspeicher (Optimierer)
Opt_P_DSM	Eigenschaften Strom-DSM (Optimierer)
Opt_H_DSM	Eigenschaften Wärme-DSM (Optimierer)
Opt_G_DSM	Eigenschaften Gas-DSM (Optimierer)
Opt_P_Price	Preisentwicklung Strom (Optimierer)
Opt_H_Price	Preisentwicklung Wärme (Optimierer)
Opt_G_Price	Preisentwicklung Gas (Optimierer)
Opt_P_RL	Residuallast Strom (Optimierer)
Opt_H_RL	Residuallast Wärme (Optimierer)
Opt_G_RL	Residuallast Gas (Optimierer)
R	Rampenparameter
SV	Speicherverlust
n	Anzahl der Perioden
M	Matrix (Optimierer)

Nomenklatur

x	Basisvariable (Optimierer)
y	Speicher Hilfsvariable (Optimierer)
z	Energieverkaufsvariable (Optimierer)
RL_Energy	Residuallast Energieträger (Optimierer)
RL_Konverter	Residuallast Hybridelemente (Optimierer)
P_RL_Storage	Residuallast Stromspeicher (Optimierer)
H_RL_Storage	Residuallast Wärmespeicher (Optimierer)
G_RL_Storage	Residuallast Gasspeicher (Optimierer)
P_RL_DSM	Residuallast Strom DSM (Optimierer)
H_RL_DSM	Residuallast Wärme DSM (Optimierer)
G_RL_DSM	Residuallast Gas DSM (Optimierer)
SE	Speicherselbstentladung
E	Erzeugung
Verbrauch	

Formelzeichen

P	Leistung
E	Energie
θ	Konvertereigenschaften
i	Periode
η	Wirkungsgrad
A	Graph
K	Kante
N	Knoten
Ψ	Knotenparameter-Matrix
ψ	Knotenkategorie

Nomenklatur

φ	Längengrad
λ	Breitengrad
m	Steigung der Gerade (SigLinDe)
b	Schnittpunkt der geraden bei 0°C
A	Heizverbrauch bei sehr niedriger Temperatur
B	Start der Heizphase
C	Steigungsgrad der Funktion innerhalb der Heizphase
D	Anteil der Warmwasserversorgung
ϑ	Allokationstemperatur (°C)
h	Profilfunktionswert
Q	Verbrauch
KW	Kundenwert
F_{WT}	Wochentagfaktor
OPF	Optimal Power Flow
LFR	Lastflussrechnung
t	Zeit
EP	Energiepreis

Indizes

ch	Laden des Speichers
dis	Entladen des Speichers
in	Input
out	Output
B	Gebäude
S	Straße
N	Zeitraum des Verbrauches

Nomenklatur

s	Stromsektor
w	Wärmesektor
g	Gassektor
nf	Negatives Flexibilitätsband
pf	Positives Flexibilitätsband
ss	Speicherstand
sm	Maximale Speicherkapazität
DSMe	DSM Energieerzeugung
DSMv	DSM Energieverbrauch
so	Maximaler Systemoutput
si	Maximaler Systeminput
fg	Flexibilitätsgenerator
hee	Erzeugung durch Hybridelemente
hev	Verbrauch durch Hybridelemente
DSM	DSM Prozess allgemein
RL	Residuelllast
V	Vorperiode
netz	Netzseitiger Speicheranschluss
sp	Speicherseitiger Speicheranschluss
et	Energieträger
€	Verkauf

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Netzebenen [6]	5
Abbildung 2: Netztopologien [5, 8]	6
Abbildung 3: Maschennetz [5]	7
Abbildung 4: Ringnetz (Trennstelle offen) [5]	7
Abbildung 5: Strahlennetz [5].....	8
Abbildung 6: Österreichisches Übertragungsnetz [9]	8
Abbildung 7: Aufbau des österreichischen Gasnetzes [10].....	9
Abbildung 8: Wärmeversorgungsunternehmen [11]	10
Abbildung 9: Primärenergieerzeugung Österreich [3]	10
Abbildung 10: Österreichischer Endenergieverbrauch [3].....	11
Abbildung 11: Erneuerbare Energieerzeugung in Österreich [3]	11
Abbildung 12: Ausbau Erneuerbare Energien [4].....	12
Abbildung 13: Gegenüberstellung Exergieverbrauch und Potential [13]	12
Abbildung 14: Übergeordnetes System [14]	13
Abbildung 15: Hybrides System (beispielhaft) [15].....	14
Abbildung 16: Konverter [15, 17]	15
Abbildung 17: Zuordnung Gebäude zu Transformatoren [20].....	17
Abbildung 18: Graphen [21]	18
Abbildung 19: Verbindung von A^B und A^S [21]	19
Abbildung 20: Dijkstra Algorithmus [22, 23]	19
Abbildung 21: Voronoi Diagramm [25]	21
Abbildung 22: Voronoi Diagramm – Sonderfall [24]	21
Abbildung 23: Voronoi Diagramm – Kanten [24]	21
Abbildung 24: Voronoi Diagramm – Grad 3 Knoten [24]	22
Abbildung 25: Voronoi Diagramm – Theoretischer Kreis [24]	22
Abbildung 26: Voronoi Diagramm – Konvexe Hülle [24].....	22
Abbildung 27: HyFlow – Knotenerstellung [26]	24
Abbildung 28: Voronoi Diagramm – Österreich	27
Abbildung 29: Überregionales System [26].....	27
Abbildung 30: Aufbau USW-Bezirk [26]	28
Abbildung 31: Voronoi Diagramm – Gemeindemittelpunkte und USW-Bezirke	29
Abbildung 32: Voronoi Diagramm Gasleistungen [34].....	31
Abbildung 33: Residuallast Industrie [36]	32
Abbildung 34: SigLinDe – Profil [43]	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 35: SigLinDe – Formel [43]	35
Abbildung 36: Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses (USW-Bezirk Wien Südost).....	37
Abbildung 37: HyFlow – Flussdiagramm Teil 1.....	40
Abbildung 38: HyFlow – Flussdiagramm Teil 2.....	41
Abbildung 39: Flexibilitätsband – USW-Bezirk	44
Abbildung 40: Marktorientierter Optimierer – Eingabeparameter	49
Abbildung 41: Marktorientierter Optimierer – Berechnung Opt_P_RL_Set.....	50
Abbildung 42: Marktorientierter Optimierer – Speicherflüsse	54
Abbildung 43: Marktorientierter Optimierer – Ausgabeparameter	56
Abbildung 44: Marktorientierter Optimierer – Hybridelement Bezugsleistung	56
Abbildung 45: Marktorientierter Optimierer – Speicheranschlüsse.....	57
Abbildung 46: Szenario 1 – USW-Bezirk Aspern 2019 2030.....	60
Abbildung 47: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse: Aspern 2019	64
Abbildung 48: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse: Aspern 2030	67
Abbildung 49: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse (Strom): Aspern 2019 2030.....	68
Abbildung 50: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse (Wärme): Aspern 2019 2030	69
Abbildung 51: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse (Gas): Aspern 2019 2030	69
Abbildung 52: Szenario 2 – USW-Bezirk Stadtteil Wien 2019 2030	70
Abbildung 53: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse: Stadtteil Wien 2019.....	74
Abbildung 54: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse: Stadtteil Wien 2030.....	76
Abbildung 55: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse (Strom): Stadtteil Wien 2019 2030.....	77
Abbildung 56: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse (Wärme): Stadtteil Wien 2019 2030.....	78
Abbildung 57: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse (Gas): Stadtteil Wien 2019 2030.....	78
Abbildung 58: Marktorientierter Optimierer – Matrix M	91

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Gegenüberstellung Endenergieverbrauch [13, 32, 33, 35].....	32
Tabelle 2: Industriesektoren zusammengefasst.....	33
Tabelle 3: Zuordnung Wärmeverbrauch SigLinDe	37
Tabelle 4: Messpunkte kleine Flüsse [52, 54]	38
Tabelle 5: Flexibilitätsband – Indizes (Teil 1).....	44
Tabelle 6: Flexibilitätsband – Indizes (Teil 2).....	45
Tabelle 7: Flexibilitätsband – Eingabeparameter (Teil 1).....	45
Tabelle 8: Flexibilitätsband – Eingabeparameter (Teil 2).....	46
Tabelle 9: Marktorientierter Optimierer – Eingabeparameter	49
Tabelle 10: Marktorientierter Optimierer – Ausgabeparameter	55
Tabelle 11: Szenario 1 – Preisentwicklung [67–69].....	61
Tabelle 12: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Aspern 2019	62
Tabelle 13: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Aspern 2019	63
Tabelle 14: Szenario 1 – Optimierer Residuallast: Aspern 2019	63
Tabelle 15: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Aspern 2030	65
Tabelle 16: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Aspern 2030	65
Tabelle 17: Szenario 1 – Optimierer Residuallast: Aspern 2030	66
Tabelle 18: Szenario 2 – Preisentwicklung [67–69].....	71
Tabelle 19: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Stadtteil Wien 2019.....	72
Tabelle 20: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Stadtteil Wien 2019.....	72
Tabelle 21: Szenario 2 – Optimierer Residuallast: Stadtteil Wien.....	73
Tabelle 22: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Stadtteil Wien 2030	74
Tabelle 23: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Stadtteil Wien 2030.....	75
Tabelle 24: Szenario 2 – Optimierer Residuallast: Stadtteil Wien 2030.....	75

1 EINLEITUNG

Von der europäischen Kommission wird ein klimaneutrales Europa bis spätestens zum Jahr 2050 gefordert. Um dies zu erreichen, haben die EU-Staaten im Jahr 2007 Ziele festgelegt, die sie sich bis zum Jahr 2030 annähern sollten. Diese zentralen Ziele beinhalten die Senkung der Treibhausgase (um mind. 40 %), die Erhöhung des Anteils aus Erneuerbaren Energiequellen (auf mind. 32 %) und die Steigerung der Energieeffizienz (um mind. 32,5 %) verglichen mit dem Jahr 1990. Im Rahmen des Grünen Deals im Jahr 2020, hat die europäische Kommission diese Ziele noch einmal verschärft. Das derzeitige Ziel ist eine Senkung der Treibhausgase um 55 % im Vergleich zum Jahr 1990. Inwiefern sich das auf die zuvor genannten zentralen Ziele auswirkt, ist zum derzeitigen Stand noch nicht bekannt. Die europäische Kommission wird diesbezüglich bis zum Juni 2021 Vorschläge vorlegen. [1]

Im Rahmen dieser Ziele hat sich auch die Österreich Bundesregierung, eigene nationale Ziele, für Österreich in der #mission2030 gesetzt. Eines dieser Ziele ist, den österreichischen Stromverbrauch bis 2030 zu 100 % bilanziell aus erneuerbaren Quellen zu decken. [2] Mit diesem Ziel muss ein starker Ausbau von Erneuerbaren Energiequellen einhergehen. Vor allem der Ausbau an PV Anlagen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Basierend auf den Daten der Jahre 2005 bis 2019 nahm die PV-Leistung um 35,6 % p.a. zu. Auch der Ausbau von Windenergie (+10,1 % p.a) und Wärmepumpen (+6,0 % p.a) wurde vorangetrieben. [3] Ziel der derzeitigen Bundesregierung, laut dem neustem Entwurf des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes [4] vom 16. März 2021 ist, die Energieerzeugung aus Wasserkraft um 5 TWh, aus Windkraft um 10 TWh, aus Photovoltaik um 11 TWh und aus Biomasse um 1 TWh bis zum Jahr 2030 zu erhöhen.

Vor allem die Energie aus Photovoltaik und Windkraft ist stark fluktuierend und weist daher Erzeugungsspitzen auf. Diese Art der Stromerzeugung kann daher zu einem kurzfristigen Überangebot an Strom im Stromnetz führen, wodurch Stromleitungen an ihre Kapazitätsgrenzen kommen könnten. Um diese stark schwankende Energieerzeugung auszugleichen und das Netz stabilisieren zu können, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Eines dieser Ansätze ist das Smart-Grid, dass im Zusammenhang mit Demand Side Management Prozessen, in Echtzeit, lokale Überproduktion aus erneuerbarer Energie durch zuschalten von Industrieprozessen zu senken versucht. Die Erzeugung folgt in diesem Fall nicht mehr dem Verbraucher, sondern der Verbraucher folgt dem Erzeuger. Eine weitere Möglichkeit stellt das Abregeln der erneuerbaren Energien bei Stromüberschuss dar. Diese Methode ist jedoch nicht im Sinne der europäischen bzw. österreichischen Ziele, da die Produktion aus Erneuerbaren gefördert und nicht abgeregelt werden soll. Der Ausbau von

Speichern bietet eine gute Möglichkeit, um eine kurzfristige Überproduktion durch Einspeicherung der Energie entgegenzuwirken. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Sektorkopplungen. Dies sind Elemente, die dazu genutzt werden können eine oder mehrere Energieformen in eine andere umzuformen, um die Vorteile anderer Energieträger nutzbar zu machen. Die Verwendung dieser Technologien hat in den letzten Jahren stark zugenommen (siehe Wärmepumpen).

Es gibt, wie angeführt, eine Vielzahl von Lösungen. Um möglichst flexibel auf unterschiedliche Situationen reagieren zu können, sollte eine kombinierte Verwendung der Technologien angestrebt werden.

2 AUFGABENSTELLUNG

Das Ziel dieser Arbeit ein örtlich und zeitlich aufgelöstes Modell des österreichischen Energiesystems zu erstellen. Dieses Modell bildet die Basis für zukünftige Simulationen und Optimierungen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen folgende Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

- Auf Basis von teilweise vorhandenen Daten soll ein sowohl örtlich als auch zeitlich aufgelöstes Abbild des österreichischen Energiesystems erstellt werden. Für fehlende Daten sind geeignete Datenquellen zu recherchieren.
- HyFlow soll um eine Betriebsstrategie zur Implementierung von Flexibilitätsoptionen (Sektorkopplungen und Speicher) erweitert werden, die lokale Optimierungen in Kombination mit globalen Optimierungen ermöglicht. Bei der Betriebsstrategie soll ein marktorientierter Optimierer zur Optimierung von lokalen Energiesystemen integriert werden.
- Anhand des neu programmierten Optimierers sollen Szenarien optimiert, ausgewertet und analysiert werden. Anhand dieser Optimierungen sollen die Fähigkeiten des Optimierers Flexibilität bereitzustellen und zu nutzen demonstriert werden.

Die Masterarbeit ist in drei Teile aufgebaut. Im ersten Teil werden theoretische Grundlagen, wie der allgemeine Aufbau der österreichischen Energienetze, die Ziele der Bundesregierung hinsichtlich Erneuerbaren Energien, Optimierungsmöglichkeiten von Energiesystemen und die Möglichkeit der räumlichen Zuordnung von Energiedaten, recherchiert. Der zweite Teil beschäftigt sich, aufbauend auf die Recherche im ersten Kapitel, mit der Datenbeschaffung, der örtlichen und zeitlichen Zuordnung des österreichischen Energiesystems und der Entwicklung einer neuen Betriebsstrategie für das energieträgerübergreifende Simulationstool HyFlow. Im dritten Teil ist die Funktionalität der marktorientierten Optimierung anhand von österreichischen Beispielregionen für das Jahr 2019 und 2030 dargestellt. Die in diesem Teil erhaltenen Ergebnissen liefern einen Einblick auf die Flexibilitätsmöglichkeiten von Sektorkopplungen und Speichern.

Um die genannten Themenstellungen zu erarbeiten wurde in der Arbeit wie folgt vorgegangen:

- Literaturrecherche zu bestehenden Methoden von örtlich und zeitlich aufgelöster Netzbedatung und zur Optimierung von energieträgerübergreifenden, lokalen Energiesystemen.
- Die Anpassung und Vereinfachung der bestehenden Netzmodelle über geeignete Gebietseinteilung angepasst an die Aufgabenstellung.

- Recherche und Datengenerierung zu derzeitigen Verbrauchs- und Erzeugungsverhalten, sowie zu Ausbauzielen von erneuerbaren Energien und deren lokalen Potentiale.
- Methodische Zuordnung von Erzeuger und Verbraucher zu den zuvor erstellten Gebieten.
- Die Programmierung eines Flexibilitätsbandes für HyFlow um einen marktorientierten Optimierer in das Simulationstool zu integrieren.
- Simulation, Auswertung, Bewertung und Darstellung beispielhafter Netzgebiete, mithilfe des erstellten marktorientierten Optimierers, zur Darstellung möglicher Flexibilitätpotentiale von Sektorkopplungen und Speicher.

3 THEORETISCHER HINTERGRUND – STAND DER TECHNIK

Im folgendem Abschnitt wird der Aufbau des österreichischen Energiesystems näher beschrieben. Es wird auf das Strom-, Gas- und Wärmenetz eingegangen und deren Istzustand sowie zukünftige Ausbauziele diskutiert. Es werden die theoretischen Grundlagen zur optimalen Nutzung der Flexibilitätsoptionen von Sektorkopplungen und Speichern mithilfe von Optimierung in energieträgerübergreifenden Systemen näher diskutiert. Die möglichen Strategien zur örtlichen und zeitlichen Abbildung von bestehenden Energiesystemen werden näher erläutert.

3.1 Energienetze in Österreich

Die Energieträger Strom und Gas besitzen größere zusammenhängende Leitungen die zu einem Netz zusammengefasst werden können. Wärmenetze in Österreich beschränken sich, zum Zeitpunkt dieser Arbeit, auf kleine nicht überregionale Netze. Diese Netze, bezogen auf die österreichische Struktur, werden in diesem Kapitel näher beleuchten.

3.1.1 Stromnetz

Das Stromnetz dient dem Transport von elektrischem Strom und kann in unterschiedliche Netzebenen eingeteilt werden. Die Unterteilung erfolgt, wie in Abbildung 1 gezeigt, nach dem Spannungsniveau und der damit verbundenen Aufgabe. [5]

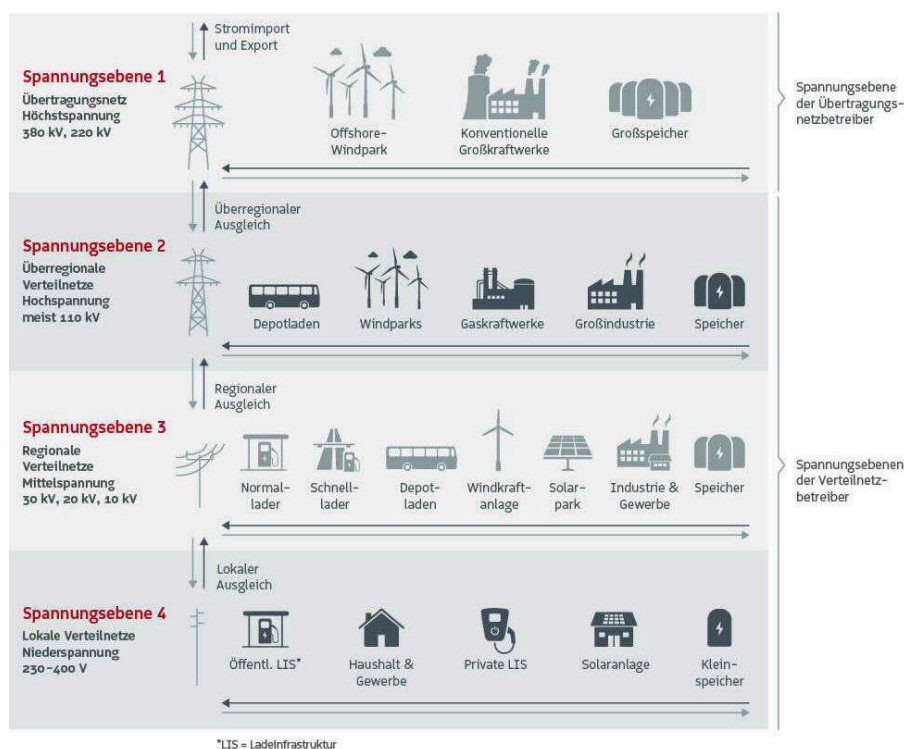


Abbildung 1: Netzebenen [6]

Es gibt insgesamt sieben Netzebenen. Wie in der vorhergehenden Abbildung gezeigt, lässt sich das Stromnetz allgemein in ein Übertragungsnetz und in ein Verteilnetz unterteilen. Das Übertragungsnetz oder auch Höchstspannungsnetz genannt, arbeitet mit von 220 kV oder 380 kV, ist für die überregionale Übertragung zuständig und leistungsstarke Kraftwerke können direkt angeschlossen werden. Das Verteilnetz lässt sich in ein Hochspannungsnetz (60 kV bis 110 kV), ein Mittelspannungsnetz (6 kV bis 30 kV) und in ein Niederspannungsnetz (230 V oder 400 V) unterteilen. Jede Spannungsebene aus Abbildung 1 und die jeweiligen Umspannungstransformatoren bilden je eine Netzebene. [5, 7]

Netztopologie

Die Topologie kann sich je nach Netzebene und Bedarf unterscheiden. Strahlennetze, Ringnetze und Maschennetze sind die typischen drei Netztopologien. Abbildung 2 zeigt die Anwendung der unterschiedlichen Netztopologien in den unterschiedlichen Netzebenen. Bei Höchstspannungs- und Hochspannungsnetzen kommt vorwiegend ein Maschennetz, in der Mittelspannungsebene ein Ringnetz und in der Niederspannungsebene ein Strahlennetz zum Einsatz. [5, 7]

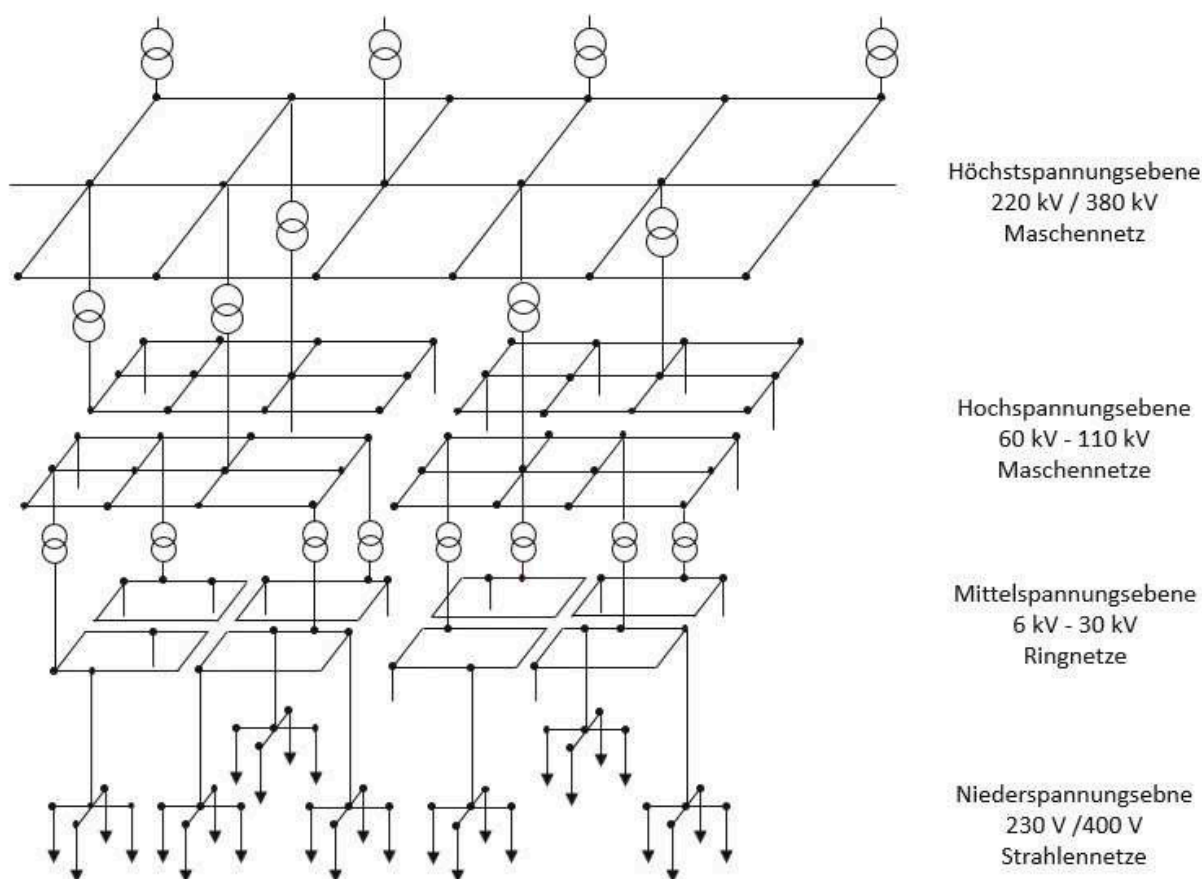


Abbildung 2: Netztopologien [5, 8]

Das Maschennetz (Abbildung 1) bietet eine hohe Betriebssicherheit, da es immer mindestens zwei Wege vom Einspeisepunkt zum Lastpunkt gibt. Diese Eigenschaft wird auch n-1 Sicherheit genannt, damit ist gemeint, dass wenn eine Leitung ausfällt, die Versorgung des Lastpunktes noch immer durch eine andere Leitung sichergestellt werden kann. [5, 7]

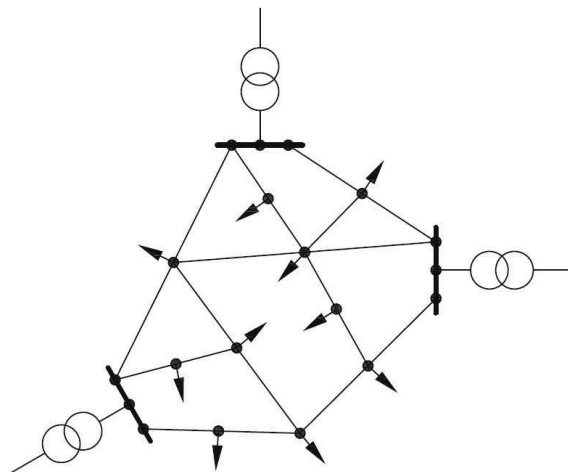


Abbildung 3: Maschennetz [5]

Ein Ringnetz (Abbildung 4) weist ebenfalls eine verbesserte Betriebssicherheit gegenüber dem Strahlennetz auf. Auch hier kann ein jeder Lastpunkt von zwei Seiten gespeist werden. Fällt eine Versorgungsleitung aus, so wird die Trennstelle des Ringes geschlossen und der Verbraucher kann von der anderen Seite des Ringes gespeist werden. Die Leitungen müssen jedoch ausreichend groß dimensioniert sein, damit im Fehlerfall jeder Lastpunkt versorgt werden kann. [5, 7]

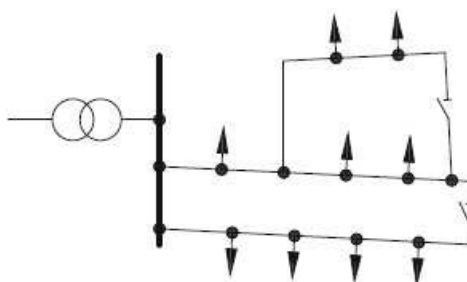


Abbildung 4: Ringnetz (Trennstelle offen) [5]

Strahlennetze (Abbildung 5) bieten die geringste Betriebssicherheit, da ein Lastpunkt nur von einer Seite versorgt werden kann. Bei einem Fehlerfall kommt es daher zu einem Betriebsausfall. Ebenfalls ist es schwierig die Spannung bis zum Ende längerer Stränge aufrechtzuerhalten. Daher können bei hohen Lastdichten (städtischer Bereich) nur kurze und bei geringen Lastdichten (ländlicher Bereich) längere Stränge zum Einsatz kommen. Ein Vorteil ist, dass Strahlennetze kostengünstig sind. Daher werden sie auch in der Niederspannungsebene eingesetzt. [5, 7]

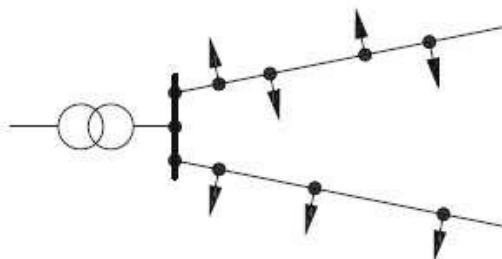


Abbildung 5: Strahlennetz [5]

Österreichisches Übertragungsnetz

In Abbildung 6 ist das österreichische Stromnetz in der 220 kV und 380 kV Ebene dargestellt. Ebenfalls sind die wichtigsten zehn Ausbauziele in dieser Grafik abgebildet. Ein wichtiger Punkt ist der angestrebte 380 kV Ring, um auch zukünftig weiterhin hohe Versorgungssicherheit gewährleisten zu können.

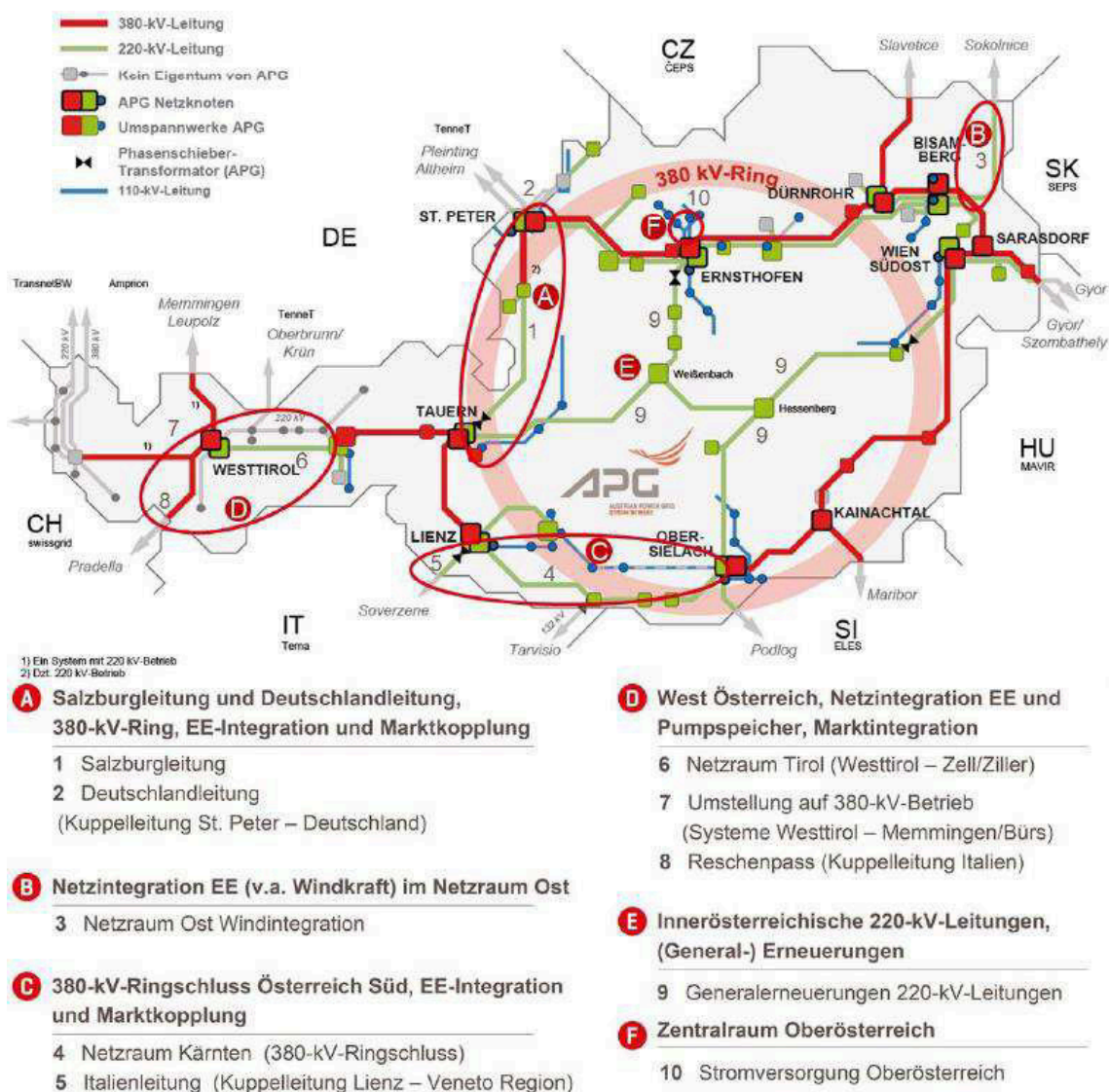


Abbildung 6: Österreichisches Übertragungsnetz [9]

Ein Ziel ist es, West-Österreich verstärkt an den Rest von Österreich anzubinden, indem die Leitungen in Westtirol auf 380 kV ausgebaut werden sollen. Durch die aufgezeigten Maßnahmen soll vor allem ein sicherer und verbesserter Nord \leftrightarrow Süd und Ost \leftrightarrow West Lastfluss gewährleistet werden. Das soll die Integrierung von erneuerbaren Energien erleichtern, da durch die verstärkte Vernetzung in Österreich verstärkt leistungsfähige Pumpspeicher (vorwiegend im Westen Österreichs) genutzt werden können und somit Leistungsspitzen von zum Beispiel Windenergie und Photovoltaikenergie (vermehrt im Osten Österreichs anzufinden) besser gespeichert bzw. ausgeglichen werden können. [9]

3.1.2 Gasnetz

Abbildung 7 zeigt das österreichische Gasnetz, wobei die roten Linien die Netzebene 1, die Gelben die Netzebene 2 und die Grauen die Fernleitungen darstellen. Die eingefärbten Bereiche zeigen den Verteilnetzbereich. Die grünen Punkte stellen Biogasanlagen dar. Eines der Ausbauziele laut Austrian Gas Grid Management AG (AGGM) ist es, das Gasnetz dahingehend auszubauen, dass möglichst alle gasproduzierenden Anlagen ans Netz angeschlossen werden können. [10]

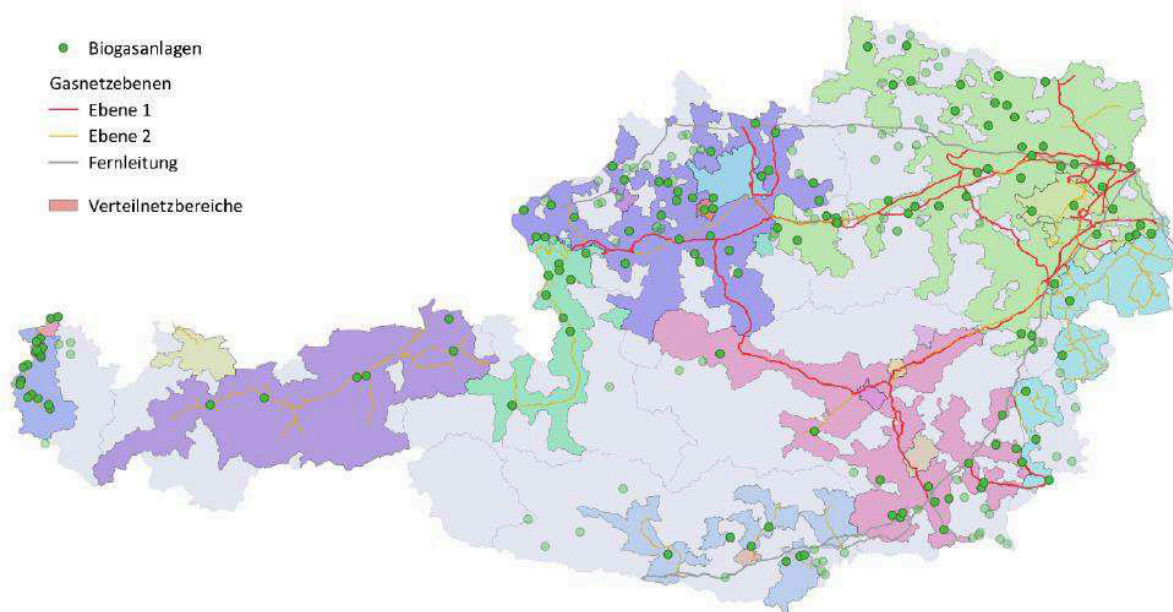


Abbildung 7: Aufbau des österreichischen Gasnetzes [10]

3.1.3 Wärmenetz

Abbildung 8 zeigt Wärmeversorgungsunternehmen und deren Standorte die Kunden in Österreich mittels Fernwärme versorgen.

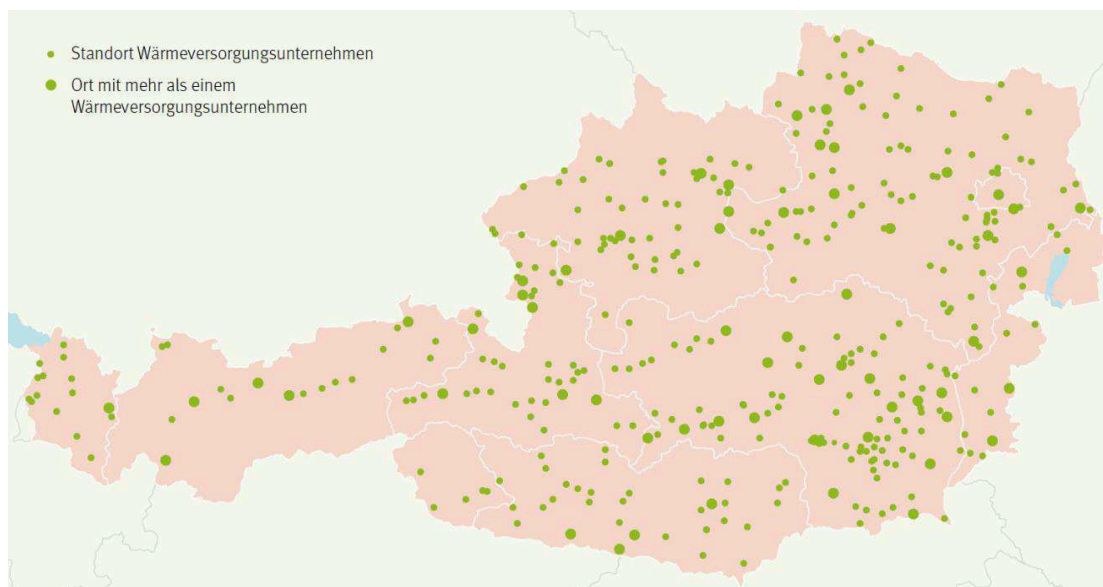


Abbildung 8: Wärmeversorgungsunternehmen [11]

Die größeren grünen Punkte stellen dabei Gebiete dar, die mehr als ein Versorgungsunternehmen beinhalten. In Summe gibt es in Österreich über 600 Unternehmen die Fernwärme produzieren. Im Unterschied zum Strom- und Gasnetz gibt es in Österreich kein Fernwärmeübertragungsnetz, das lokale Verteilnetze verbindet. Hauptsächlich sind Fernwärmenetze regional ausgeprägt und übersteigen nur selten eine Länge von 10 km. [11]

Ein zukünftiges Ziel des Fernwärmenetz Ausbaus ist es, längere, überregionale Netze zur Verbindung bereits vorhandener kleinerer Netze zu errichten. In dem Forschungsprojekt „Heat Highway“ wird zum Beispiel an der Integration eines Übertragungsnetzes für Fernwärme in Steiermark und in Oberösterreich geforscht. [12]

3.2 Energie in Österreich

Die österreichische Primärenergieerzeugung fußt hauptsächlich auf biogene Energien und Wasserkraft wie es in Abbildung 9 gezeigt ist. [3]

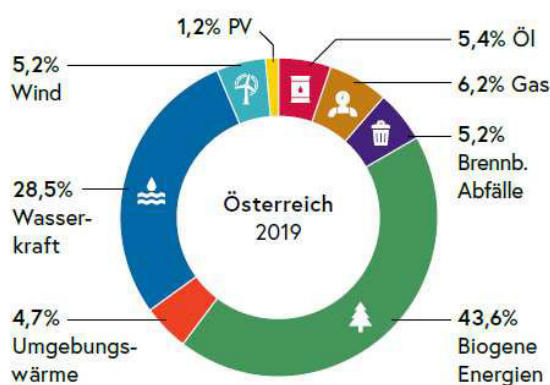


Abbildung 9: Primärenergieerzeugung Österreich [3]

Der größte energetische Endverbraucher ist der Sektor „Verkehr“. Mit einem Anteil von 28,3 % ist der „Produzierende Bereich“ der zweitgrößte Endverbraucher. Wie Abbildung 10 zeigt, tragen neben den bereits erwähnten Sektoren, die Sektoren „Dienstleistung“, „Private Haushalte“ und „Landwirtschaft“ ebenfalls einen wesentlichen Anteil am Endenergieverbrauch bei. Der energetische Endenergieverbrauch hat in den Jahren von 2005 bis 2019 durchschnittlich um 0,2 % p.a. zugenommen, was eine annähernde Stabilisierung darstellt. [3]

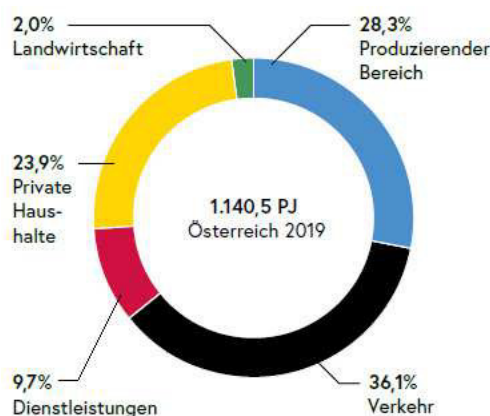


Abbildung 10: Österreichischer Endenergieverbrauch [3]

Im Jahr 2019 betrug die gesamte österreichische erneuerbarer Energieerzeugung 430 PJ. Wie bereits zuvor beschrieben, basiert der größte Teil der Energieerzeugung auf Wasserkraft und Biogenen Material (Abbildung 11). [3]

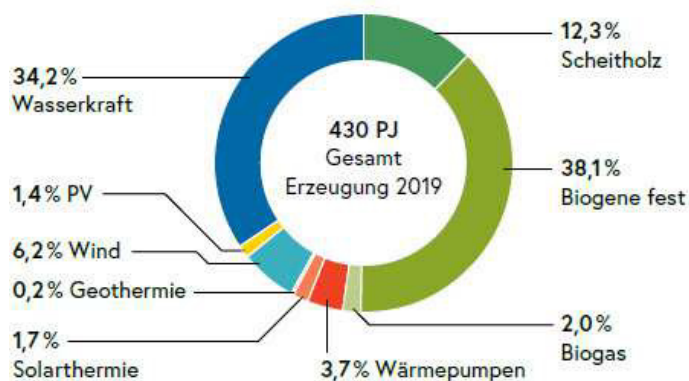


Abbildung 11: Erneuerbare Energieerzeugung in Österreich [3]

Vor allem der Ausbau an PV Anlagen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Basierend auf den Daten der Jahre 2005 bis 2019 nahm die PV-Leistung um 35,6 % p.a. zu. Auch der Ausbau von Windenergie (+10,1 % p.a) und Wärmepumpen (+6,0 % p.a) wurde vorangetrieben. In dem Zeitraum von 2005 bis 2019 nahm der Strom aus erneuerbaren Energien jährlich um durchschnittlich 1,9 % p.a. zu. [3] Ziel der derzeitigen Bundesregierung, laut dem neuem Entwurf des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (EAG) vom 16. März 2021 ist,

wie in Abbildung 12 gezeigt, die Energieerzeugung aus Wasserkraft um 5 TWh, aus Windkraft um 10 TWh, aus PV um 11 TWh und aus Biomasse um 1 TWh bis zum Jahr 2030 zu erhöhen. [4]

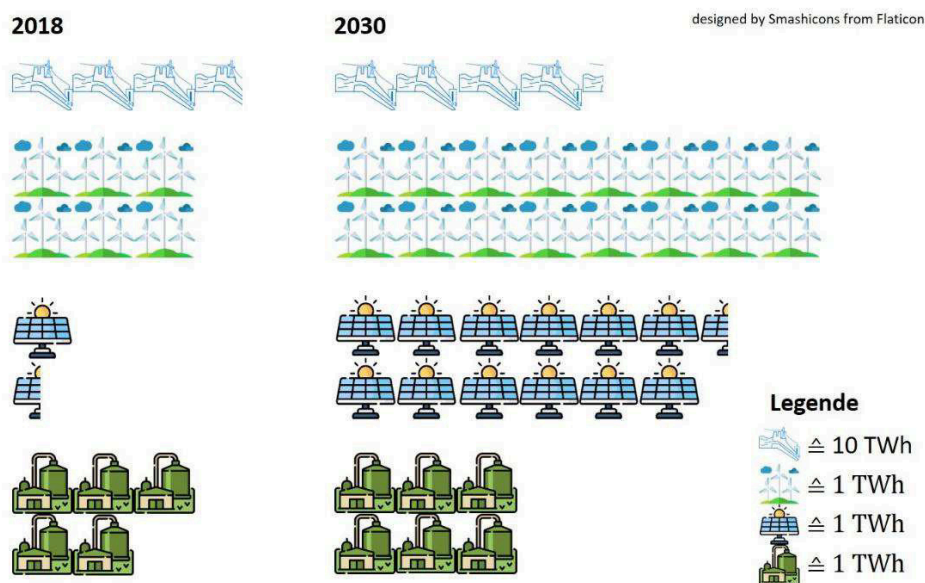


Abbildung 12: Ausbau Erneuerbare Energien [4]

Bei dem Vergleich des derzeitigen Exergieverbrauchs und dem Gesamtpotential der österreichischen erneuerbaren Energien (Wasser, Wind, PV und Biomasse) stellt sich heraus, dass sich Österreich nicht rein aus erneuerbaren Quellen selbstversorgen kann. Jedoch ist eine Selbstversorgung möglich, wenn die Prozesse effizienter gestaltet werden würden. Abbildung 13 zeigt diese Gegenüberstellung. Der gesamte Energieverbrauch in Österreich beträgt 370 TWh/a. Das theoretische mögliche Potential erneuerbarer Energie liegt bei 266 TWh/a.

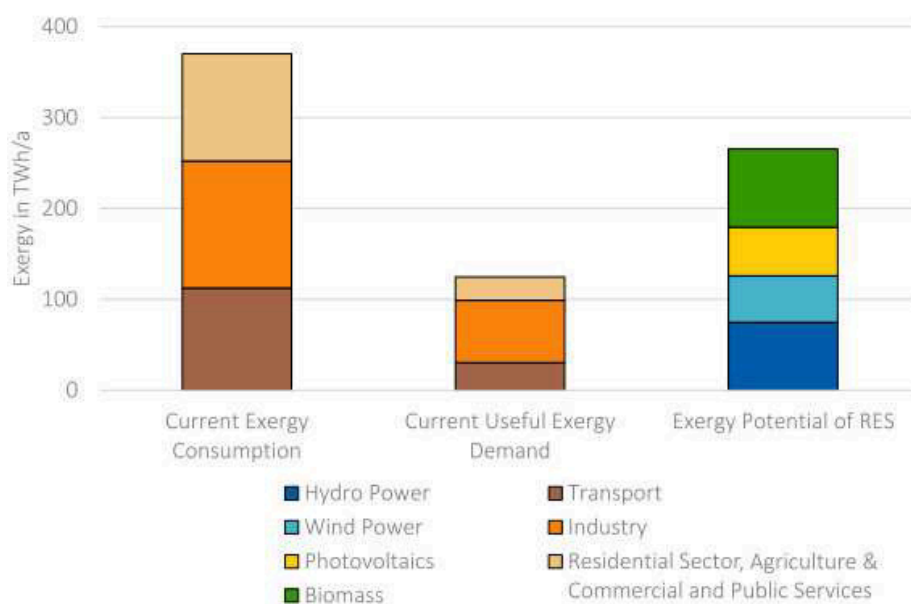


Abbildung 13: Gegenüberstellung Exergieverbrauch und Potential [13]

3.3 Knotenoptimierung

Abbildung 14 zeigt einen vereinfachten Aufbau eines überregionalen Energiesystems. Die in der Grafik gezeigten „Hub“ sind Knoten die unabhängig zu einer Lastflussrechnung des Gesamtsystems optimiert werden können. Der „Hub“ und die umgebenden Einflüsse bilden dabei jeweils ein hybrides System ab. [14]

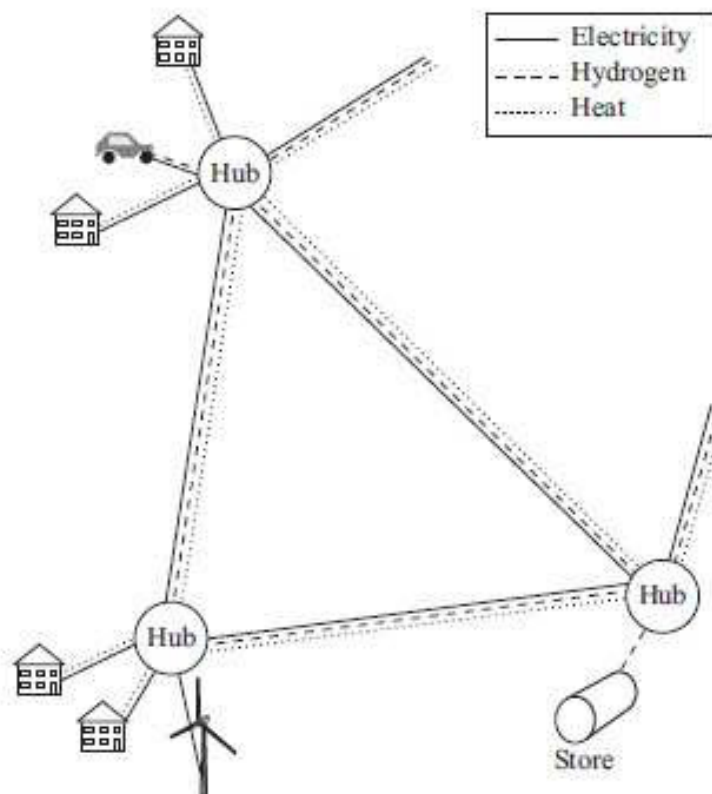


Abbildung 14: Übergeordnetes System [14]

Um in der Energieerzeugung womöglich weniger CO₂ zu erzeugen und effizienter Energie zu nutzen, ist es möglich hybride Energiesysteme mit Sektorkopplungen zu integrieren. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Sektorkopplungen als Hybridelemente (HE) oder Konverter betitelt. Diese sind dazu in der Lage einen Energieträger in einen anderen Energieträger umzuwandeln. Erneuerbare Energieträger und neue Technologien, wie zum Beispiel Windkraftanlagen oder Elektromobilität, können aufgrund ihres fluktuierenden Erzeugungs- bzw. Verbrauchsprofils hohe Erzeugungsspitzen im Stromnetz verursachen. Diese Verbrauchs- und Erzeugungsspitzen müssen, um ein stabiles Energienetz gewährleisten zu können, geglättet werden. Hybridelemente können diesbezüglich einen großen Beitrag leisten, da sie Energie aus einer Energieform in eine andere umwandeln können und diese daher bei zum Beispiel hohen Erzeugungsspitzen, die Energie aus überlasteten Netzen nutzen können. Es bieten sich diesbezüglich unterschiedlichste

Technologien und Kombinationen, wie etwa Power to Heat (PtH), Power to Gas (PtG), Heat to Power (HtP), Gas to Heat and/or Power (GtH / GtPH), Speicher (S) und Demand Side Management Prozesse (DSM) an. [15] Diese Technologien können als Optimierungsaufgabe formuliert werden und auf ein Optimierungsziel hin optimiert werden. Dies erfordert komplexe Mathematik und systematische Zusammenhänge. Abbildung 15 zeigt ein beispielhaftes offenes hybrides Energiesystem. [15, 16]

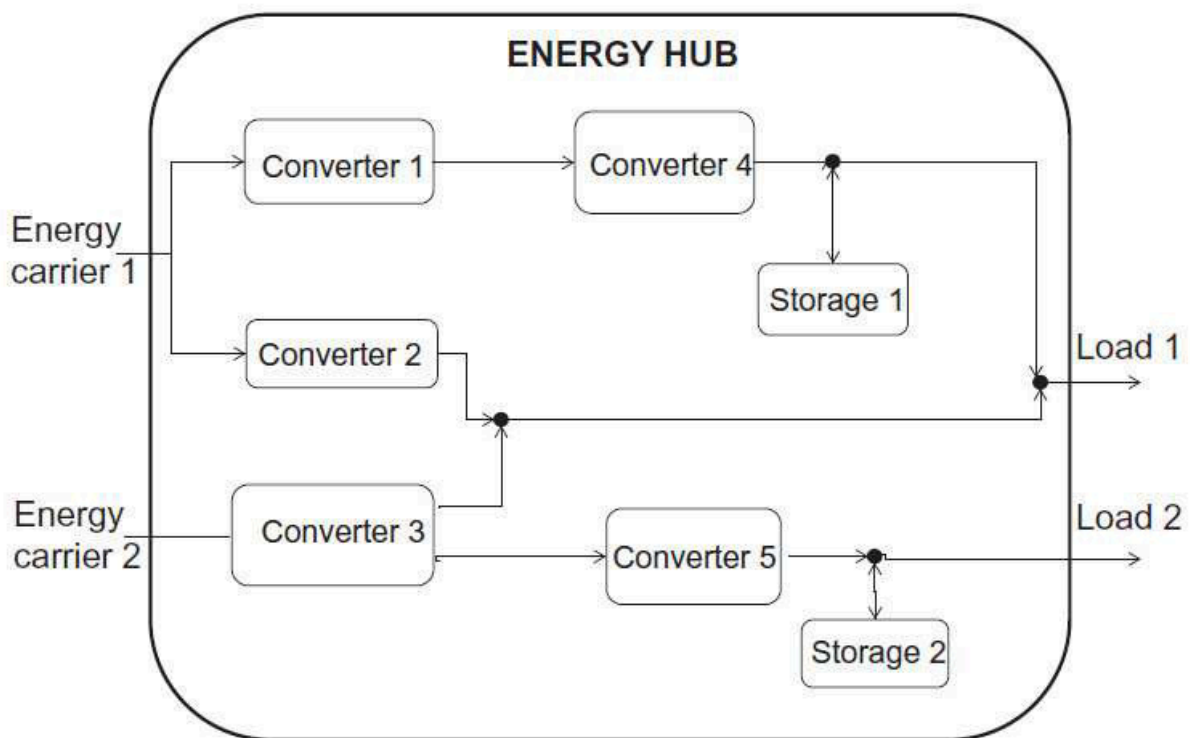


Abbildung 15: Hybrides System (beispielhaft) [15]

In diesem Energiesystem gibt es zwei Input Energieträger (zum Beispiel Strom, Wärme, Gas), fünf Konverter (Hybridelemente), zwei Speicher und zwei Output Energieträger (zum Beispiel Strom, Wärme, Gas). Konverter können zum Beispiel Elektrolyseure, Transformatoren, Gas und Dampf (GuD) Anlagen, Gasöfen, Brennstoffzellen und so weiter sein. Um ein solches System optimal nutzen zu können, muss ein allgemeines Optimierungsziel für die eingesetzten Elemente definiert werden. Eine bewehrte Methode ist es, die Strategie so zu wählen, dass in Summe die Energiekosten minimal werden und gleichzeitig der Verbrauch gedeckt wird (marktorientierte Optimierung). Um dies zu erreichen, muss das System zukünftige Zeitschritte berücksichtigen, um geeignete Entscheidungen für den betrachteten Zeitschritt zu treffen. Um sowohl die speziellen Eigenschaften der einzelnen Elemente im hybriden System, die zukünftige Residuallast und die Energiepreise berücksichtigen zu können, muss das Energiesystem optimiert werden. Dazu bietet sich bevorzugt eine lineare Optimierung an, da diese am einfachsten zu lösen ist. [15, 17]

3.3.1 Mathematischer Hintergrund

Wie bereits im vorangegangenen Teil beschrieben, dienen Konverter dazu, Energieträger in andere Energieträger umzuwandeln. Um diese Elemente in die Optimierung integrieren zu können, müssen die Konverter, wie in Abbildung 16 gezeigt, mathematisch dargestellt werden. Die Input Variablen geben die in das System eingebrachten Energieträger an. Im Bereich der Konversion werden die Eigenschaften der im System betrachteten Konverter festgelegt. Diese können zum Beispiel Leistungsob- und Untergrenzen, Wirkungsgrade oder Rampenparameter sein. Die Output-Variablen geben an, in welchen Energieträger die eingebrachte Energie umgewandelt wird. [15–17]

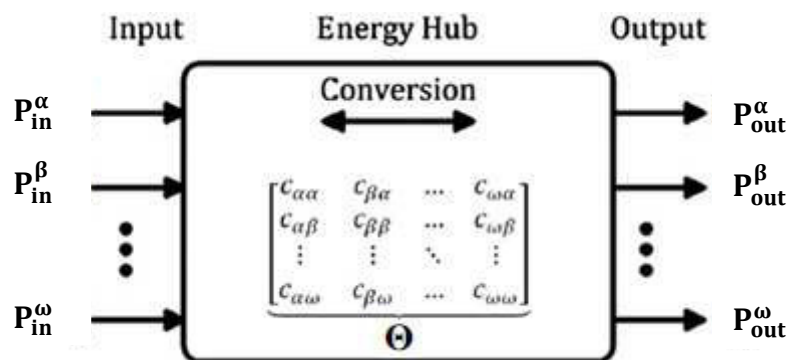


Abbildung 16: Konverter [15, 17]

Um diesen Zusammenhang mathematisch darzustellen, bieten sich Matrizen an. In der Matrix (3–1) dargestellt, ist der Output Leistungsfluss (P_{out}) dem Input Leistungsfluss (P_{in}) und den Konverter Eigenschaften (Θ) gegenübergestellt. [15–17]

$$\begin{bmatrix} P_{out}^{\alpha} \\ \vdots \\ P_{out}^{\omega} \end{bmatrix} = \Theta \begin{bmatrix} P_{in}^{\alpha} \\ \vdots \\ P_{in}^{\omega} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Die Konverter Eigenschaften sind als konstant anzunehmen. Das heißt, der Wirkungsgrad und andere Parameter ändern sich nicht in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflüssen [17]. Sind die Konverter Eigenschaften in der Matrix als Null deklariert, wird damit impliziert, dass ein solcher Konverter in dem betrachteten System nicht existiert. [15]

Ebenfalls müssen Speicher in das System integriert und berücksichtigt werden. Diese Integration bietet dahingehend eine Herausforderung, weil die Energiemenge E im Speicher in Abhängigkeit der Ladeleistung P_{ch} , der Entladeleistung P_{dis} und des kalendarischen Energieverlustes E_{dis} berechnet werden muss. Auch muss der Wirkungsgrad des Ladestroms η_{ch} und des Entladestroms η_{dis} berücksichtigt werden. Folglich wird im Zeitschritt i der

Speicherstand für den Zeitschritt $i+1$ berechnet. Daraus ergibt sich die in (3–2) dargestellte Gleichung. [15]

$$E(i + 1) = E(i) + \eta_{ch}P_{ch}(i) - \eta_{dis}P_{dis}(i) - E_{dis} \quad (3-2)$$

Basierend auf den Konverter- und Speicherdaten kann das ganze System dargestellt und modelliert werden. Hierzu müssen sowohl Leistungsflüsse der Konverter als auch jene der Speicher berücksichtigt werden. Formel (3–3) zeigt diese Berücksichtigung als Mathematisches Konstrukt. [15]

$$P_{out}(i) = \theta P_{in}(i) - P_{ch}(i) + P_{dis}(i) \quad (3-3)$$

Bei dem Vergleich der vorhandenen Literatur zu dem Thema Knotenoptimierung findet sich immer eine ähnliche Struktur der Optimierung. Der Grundaufbau eines „Energy Hub“ (Abbildung 14) ist immer derselbe, lediglich der Aufbau der Matrizen und die Ausprogrammierung weist bei detaillierter Betrachtung Unterschiede auf. Daher bieten manche Optimierer mehr Freiheiten der integrierbaren Elemente. Andere sind eingeschränkt in der Möglichkeit, der Integration möglicher Konverter und derer Eigenschaften.

3.4 Räumliche Zuordnung

Um Überregionale Systeme zu bedaten ist es sachdienlich diese in kleinere Gebiete (Zellen) zu unterteilen. Charakteristisch zum Ermitteln solcher Regionen ist, dass sie immer einen zentralen Punkt haben. Je nachdem ob überregionale Systeme, wie etwa auf Länderebene, oder ob regionale Systeme, wie kleinere Regionen, optimiert werden sollen, wird dafür meist entweder ein Umspannwerk oder ein Ortsnetztransformator verwendet. Der erste Ansatz, der im Kapitel 3.4.1 beschrieben wird, entspricht jenem, der vorwiegend für Strukturen in kleineren Regionen genutzt werden kann. Der zweite Ansatz (Kapitel 3.4.2) wird vorwiegend für größere Regionen genutzt. [18, 19]

3.4.1 Räumliche Zuordnung – Infrastrukturkarten

Die Ermittlung der zu den zentralen Punkten gehörenden Elementen erfolgt bei dieser Methode über Infrastrukturkarten und einem Ortsnetztransformator als zentralen Punkt. In diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass Transportleitungen für den Energietransport entlang von Straßen errichtet bzw. verlegt sind. Mit Hilfe der Graphentheorie kann anhand der vorhandenen Infrastruktur zu allen Gebäuden (Verbrauchern / Erzeugern) in der Umgebung eine Verbindung hergestellt werden. Sind in einem vordefinierten Bereich mehrere Ortsnetztransformatoren als zentrale Punkte gegeben, kann über bestimmte

Bedingungen jedem Verbraucher ein Transformator zugeteilt werden. Diese Bedingungen können zum Beispiel, Kapazitätsgrenzen von Leitungen, die Länge von Leitungen und/oder die Transportkosten sein. Nach diesen Rahmenbedingungen entscheidet dann der jeweilige verwendete Algorithmus, welche Gebäude welchem zentralen Punkt zugeordnet werden können. Das daraus resultierende Ergebnis kann dann wie in Abbildung 17 aussehen. Die Linien in der Abbildung stellen die vorhandene Infrastruktur (Straßen etc.) dar. Die beiden schwarzen Kreise sind Transformatoren. Die kleinen Punkte stellen Verbraucher/Erzeuger (Gebäude) mit unterschiedlichen Residuallasten dar. Auf Basis der gewählten Bedingungen kann mit Hilfe der Graphentheorie, der jeweilige zentrale Punkt den Gebäuden zugeteilt werden, wie es in der Abbildung in Gelb und Blau dargestellt ist. [18, 20, 21]

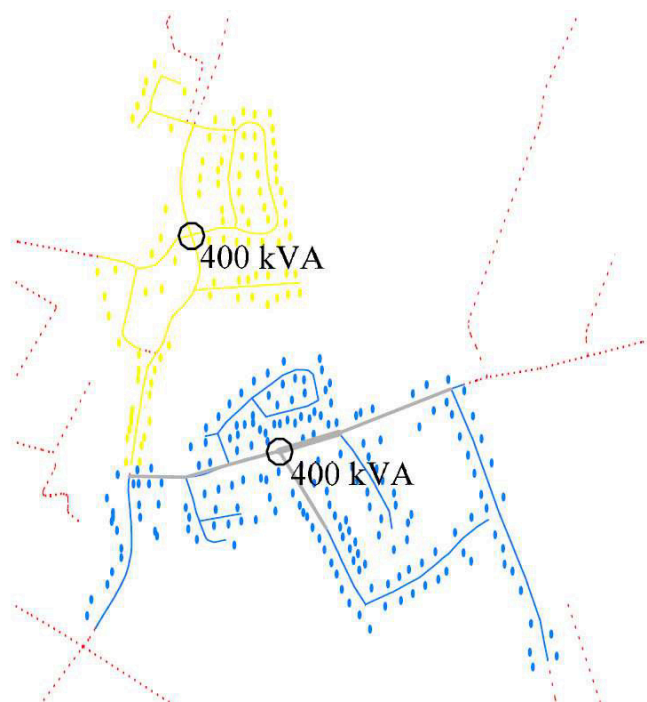


Abbildung 17: Zuordnung Gebäude zu Transformatoren [20]

Im weiteren Teil dieses Kapitels ist die Graphentheorie im Zusammenhang mit der zuvor beschriebenen Methodik näher beschrieben. Ein Graph A wird durch die Kanten K und den Knoten N bestimmt (siehe (3–4)). [21]

$$A = (N, K) \tag{3-4}$$

Dieser Graph wird durch die Menge an Kanten und die Menge an Knoten definiert (siehe (3–5)). [21]

$$K \subseteq [N, N] \tag{3-5}$$

Die Kanten repräsentieren die direkte Verbindung zwischen zwei Knoten mit der Gesamtanzahl an Knoten n (siehe (3–6)). [21]

$$N = \{n_1, \dots, n_n\} \quad (3-6)$$

Der Graph dient als Inputparameter für das Zielnetzwerk. Die Matrix Ψ (siehe (3–7)) beinhaltet die Zuordnung der geographischen Daten (Längengrad ϕ , Breitengrad λ) zu den Knoten und sagt aus um welchen Knotenkategorie ψ es sich handelt. [21]

$$\Psi = \{N, \phi, \lambda, \psi\} \quad (3-7)$$

Abhängig von der Knotenkategorie kann der Graph in zwei Untergraphen unterteilt werden. Hierbei handelt es sich um den Graphen für Gebäude A^B (siehe (3–8)) und den Graphen für Straßen A^S (siehe (3–9)). [21]

$$A^B = (N^B, K^B) \quad (3-8)$$

$$A^S = (N^S, K^S) \quad (3-9)$$

Bei der grafischen Darstellung der Graphen, ergibt sich eine Karte mit Gebäudeumrisse (A^B) und Straßen (A^S), wie es in Abbildung 18 zu sehen ist. [21]

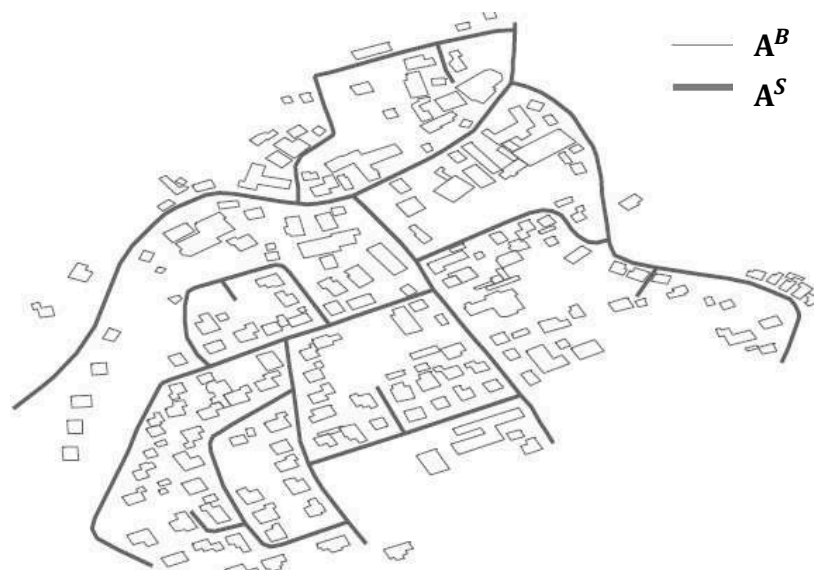


Abbildung 18: Graphen [21]

Der Gebäude Graph A^B wird dazu benötigt, um den Gebäudemittelpunkt zu bestimmen. Dieser wird dann mit den nächstgelegenen Straßenkanten, wie in Abbildung 19 gezeigt verbunden. [21]



Abbildung 19: Verbindung von A^B und A^S [21]

Sind die beiden Untergraphen untereinander verbunden, können die möglichen Wege mit Hilfe des Dijkstra Algorithmus zu den unterschiedlichen Transformatoren ermittelt werden und unter den ausgewählten Bedingungen den jeweiligen, geeignetsten, zentralen Punkten zugeordnet werden (siehe Abbildung 17).

Dijkstra Algorithmus

Der Dijkstra Algorithmus dient dazu den kürzesten Weg von einem Startpunkt aus, über Kanten und Knoten, zu einem Zielpunkt zu finden. Dieser Vorgang ist in Abbildung 20 beispielhaft gezeigt.

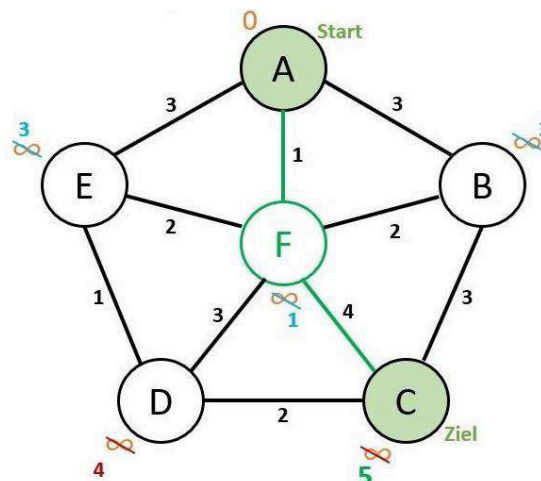


Abbildung 20: Dijkstra Algorithmus [22, 23]

Den Kanten können dabei Werte zugeordnet werden. Diese Werte können sich von Längenangaben unterscheiden. Es können auch Kostenangaben oder je nach Gebrauch

andere Parameter verwendet werden. Die Vorgehensweise dabei ist, dass jedem benachbarten Knoten des Ausgangsknotens ein Wert zugeteilt wird, der benötigt wird, um zu den Nachbarknoten zu gelangen. Der Algorithmus prüft nun das System solange, bis es am Zielknoten angekommen ist. Während diesem Prozess der Zielfindung schließt der Algorithmus systematisch die Wege, die aufwendiger sind als andere aus, sodass zum Schluss nur noch der günstigste Weg übrigbleibt. [22, 23]

Ein wesentlicher Vorteil bei der Nutzung von Infrastrukturdaten für das Zuordnen von Gebieten zu zentralen Punkten ist, dass diese Methode ländliche Gegenden gut abbilden kann, da in abgelegenen Orten, Netze fast immer entlang von Straßen verlegt werden. [18, 20, 21]

Jedoch bietet diese Methodik auch einige Nachteile: [18, 20, 21]

- Es können nur ideale Verteilernetzstrukturen gefunden werden.
- Es können zusätzlich vorhandene, aber nicht benötigte Leitungen nicht nachgebildet werden, da nur der ideale Weg nachverfolgt wird aber nicht historisch gewachsene Netzsysteme.
- Die ermittelte Netzlänge wird in der Regel immer kleiner oder gleich groß sein, wie die tatsächliche vorhandene Netzlänge.
- Signifikante Unterschiede zum realen Netz können in Gegenden mit Wohnblock-Gebäuden entstehen.
- Das System ist für die Niederspannungsebene und nicht für Mittelspannungsnetze und höhere liegende Netzebenen gedacht.
- Die Methodik benötigt eine hohe Rechenleistung aufgrund komplexer Berechnungen.
- Es werden hochaufgelöste Infrastrukturkarten für die Berechnungen benötigt.

3.4.2 Räumliche Zuordnung – Voronoi Diagramme

Im vorhergehenden Abschnitt wurde eine Methodik zur Zuordnung von Gebieten zu zentralen Punkten beschrieben, die vor allem in Niederspannungsnetze und hoch aufgelösten kleineren Regionen angewandt wird. Die Methode, die in diesem Abschnitt bearbeitet wird, ist für Anwendungen gedacht, bei denen größere Gebiete in Regionen eingeteilt werden sollen. Als zentrale Punkte (rote Punkte in Abbildung 21), dienen daher Umspannwerke und nicht Ortsnetztransformatoren, wie es in dem Kapitel davor der Fall ist. Ein Voronoi Diagramm erstellt ausgehend von zentralen Punkten, Polygone (violett umgrenzte Linien in Abbildung 21), welche die Ebene in Bereiche gleicher nächster Nachbarn einteilt. [19, 24]

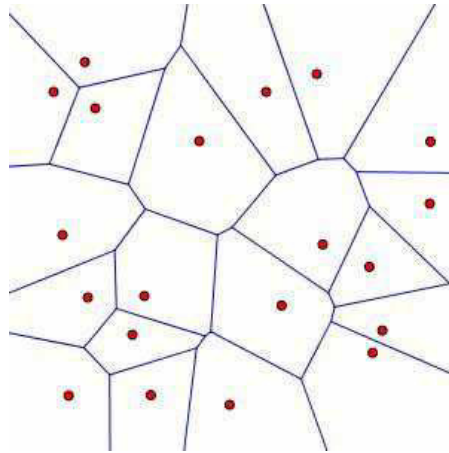


Abbildung 21: Voronoi Diagramm [25]

Die Eigenschaften eines Voronoi Diagramms sind vielfältig. Im Allgemeinen gilt, dass ein solches Diagramm, bestehend aus einer Punktmenge, zusammenhängend ist und aus Liniensegmenten und Halbgeraden besteht. Ein Sonderfall besteht, wenn Punkte kollinear auftreten, wie es in Abbildung 22 gezeigt ist. [24]

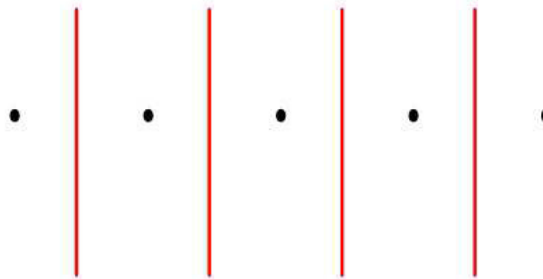


Abbildung 22: Voronoi Diagramm – Sonderfall [24]

Sobald die Punkte nicht kollinear auftreten (Abbildung 23), können die entstehenden Kanten nicht parallel sein. [24]

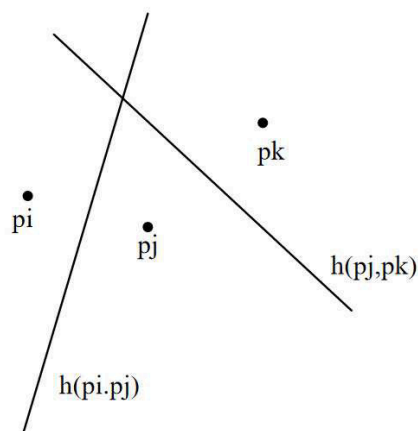


Abbildung 23: Voronoi Diagramm – Kanten [24]

Jede Ecke eines Polygons in einem Voronoi Diagramm ist so aufgebaut, dass sie einem Grad drei Knoten entspricht, wie es in Abbildung 24 gezeigt ist. [24]

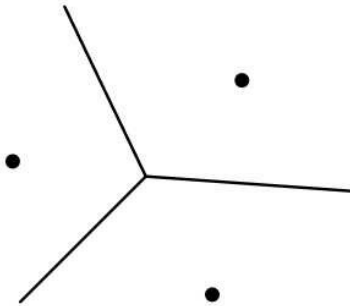


Abbildung 24: Voronoi Diagramm – Grad 3 Knoten [24]

Ein theoretischer Kreis (Abbildung 25), der um eine beliebige, vom Voronoi Diagramm erzeugte Ecke gelegt werden kann, beinhaltet keinen weiteren Punkt. Es ist also nicht möglich, dass sich ein Punkt (roter Punkt in der Abbildung) in dem Kreis befindet. [24]

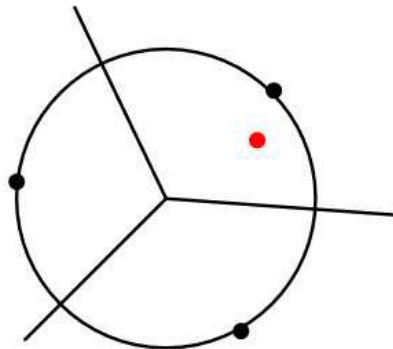


Abbildung 25: Voronoi Diagramm – Theoretischer Kreis [24]

Jede Kante im Voronoi Diagramm wird vom nächsten Nachbar eines Punktes definiert. Wenn der Punkt auf der konvexen Hülle der Punktmenge liegt, ist diese Region des Voronoi Diagramms unbeschränkt genau (Abbildung 26). [24]

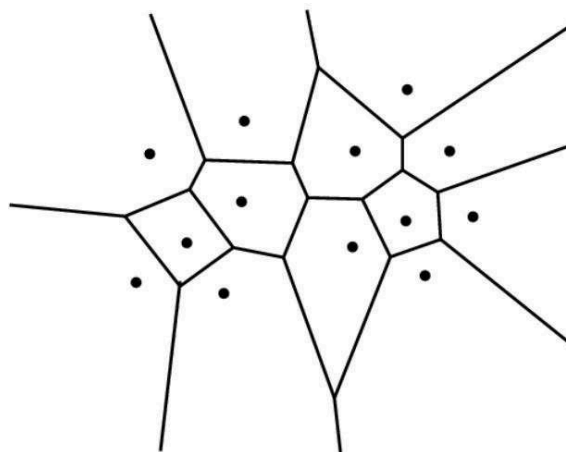


Abbildung 26: Voronoi Diagramm – Konvexe Hülle [24]

Sind die Standorte aller Elemente auf einer Ebene bekannt, könne diese dann den jeweiligen zentralen Punkten zugeteilt werden und als eigenständige Region fungieren und optimiert werden. [19]

Ein Vorteil dieser Methode ist, dass bei vorhandenen Daten, das Voronoi Diagramm computerunterstützt einfach erstellt werden kann und diese einfach den jeweiligen Regionen zugeteilt werden können. [19]

Ein Nachteil ist, dass diese Methode nur bedingt genaue Ergebnisse liefert, da keine geografischen Gegebenheiten, wie Flüsse oder Berge berücksichtigt werden. Daher wird diese Methode auch bevorzugt zur großflächigen Datenbestimmung herangezogen. [19]

Die beiden vorgestellten Methoden können zur Gebietsdefinition kombiniert verwendet werden, um genauere Ergebnisse zu erzielen. [19]

4 AUFBAU, MODIFIKATIONEN UND DATENAUFBEREITUNG IN UND FÜR HYFLOW

In diesem Kapitel wird der prinzipielle Aufbau von HyFlow, die vorgenommenen Modifikationen am Programm und die Datenaufbereitung näher beschrieben. Bei den Erneuerungen handelt es sich um die Integration und Ausprogrammierung eines Flexibilitätsbandes und den Einbau und Anpassung eines marktorientierten Optimierers für multiples Energiesystem, basierend auf Kapitel 3.3.

4.1 HyFlow – Status quo

HyFlow wurde auf der Montanuniversität Leoben entwickelt und basiert auf MATLAB®. Es dient dazu um Lastflussaufgaben von multiple Energiesysteme durchzuführen. Es kann die Energieträger Gas, Wärme und Strom abbilden. Die Abbildung des Bilanzgebietes in HyFlow erfolgt über einen zellularen Ansatz. Das heißt, dass Erzeuger, Verbraucher, Speicher, DSM Prozesse und Hybridelemente (Konverter) in einem Bereich ermittelt und einem Knoten zugeordnet werden (Abbildung 27). Die Stromlastflussberechnung für Blind- und Wirkleistung erfolgt mittels Matpower. Je nach Bedarf und Betriebsstrategie kann Matpower die Lastflusskalkulation entweder als Optimal Power Flow (OPF) oder Lastflussrechnung (LFR) ausführen. Bei der Berechnung der Lastflüsse im Gas- und Wärmenetz wird ein modifiziertes Potentialknotenverfahren verwendet. [26, 27]

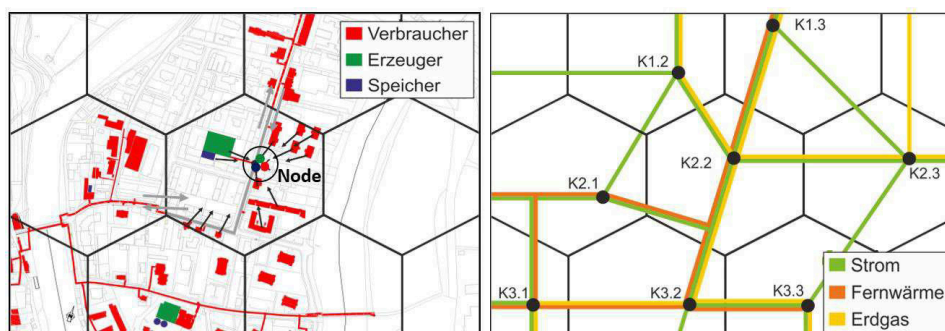


Abbildung 27: HyFlow – Knotenerstellung [26]

Der Entwicklungsstand von HyFlow vor dieser Arbeit entspricht der Masterarbeit „Stromnetzentlastung mittels Sektorkopplung in Gebieten mit hoher projektierte PV-Einspeisung am Fallbeispiel der Südsteiermark“ [27]. In dieser Arbeit wurden sogenannte RL Objekte erstellt und in Matpower eingebunden. Bei den RL Objekten handelt es sich um Objekte die sich in einer Zelle (definiertes Gebiet) befinden. Die Umsetzung dieser Objekte erfolgt in MATLAB® mittels Klassen. Das RL Objekt (RL) ist die Oberklasse und besitzt folgende Unterklassen, an denen es seine Merkmale vererbt: [27]

- Residuallast
- Hybridelemente (HE)
- Speicher (S)
- Demand Side Management (DSM)
- Power Station (PS)

Zu den jeweiligen Klassen wurden Betriebsstrategien ausgearbeitet und integriert. Folgende Funktionen wurden durch die Integration von Matpower im Sektor Strom in HyFlow implementiert und/oder weiterentwickelt: [27]

- **Optimal power flow (OPF)** – Dadurch wird eine von den Erzeugungskosten abhängige optimierte Lastflussrechnung für Wirk- und Blindleistung möglich.
- **Nodal Pricing** – Ist ein Verfahren zur Knotenbepreisung.
- **Preisabhängige Verbraucher** – Preisabhängige Lasten als Generatoren mit negativer Wirkleistung.
- **Lastkennlinie des Generators** – Ermöglicht bestimmte Betriebsbereiche für Generatoren für den Wirk- und Blindleistungssektor.

HyFlow bietet großes Potential zur Erweiterung und zur Präzisierung der Berechnungen durch Implementierung unterschiedlicher Betriebsstrategien. Um marktorientierte Ergebnisse zu erhalten, wurde im Zuge dieser Arbeit zusätzlich zu den bereits bestehenden Elementen ein Flexibilitätsband und eine marktorientierte Betriebsstrategie mittels eines energieträgerübergreifenden Optimierers integriert (siehe Kapitel 4.3).

4.2 Datenaufbereitung

Um ein großes Gebiet, wie Österreich, im HyFlow simulieren zu können, ist es nötig eine geeignete Datenbasis zu schaffen. Diese Basis muss alle relevanten Elemente einer Zelle enthalten. Diese sind wie folgt:

- Zellen-Residuallasten
 - Wirkleistung
 - Blindleistung
 - Wärme
 - Gas
- Leistungsgrenzen und Eigenschaften von Generatoren
 - Wasserkraftwerke (> 10 MW)
 - Kleinwasserkraftwerke (< 10 MW) (KWKW)
 - Photovoltaikanlagen (PV)

- Kraft-Wärme-Kopplungs Anlagen (KWK)
- Biogasanlagen
- Windkraftanlagen (WKA)
- Leistungsgrenzen und Eigenschaften von Hybridelemente
 - Power to Gas and Heat (PtGH): Elektrolyse
 - Power to Heat (PtH): Wärmepumpen
 - Heat to Power (HtP): Organic Rankine Cycle Prozess (ORC)
 - Gas to Heat (GtH): Gaskessel
 - Gas to Power and Heat (GtPH): Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk (GuD)
- Leistungsgrenzen, Kapazitäten und Eigenschaften von Speicher
 - Stromspeicher
 - Pumpspeicherkraftwerk
 - Akkumulator
 - Wärmespeicher
 - Gasspeicher

Um diese Elemente den richtigen Zellen zuordnen zu können, ist es nötig die Knoten und die damit verbundenen Gebiete für Österreich zu definieren. Die Gebietsdefinition erfolgte über die im Kapitel 3.4 beschriebene Methode. Um ein Voronoi Diagramm zu erstellen werden zentrale Punkte benötigt. Dabei bieten sich bei einer überregionalen Simulation, die in Österreich vorhandenen Umspannwerke (USW) an. Die Standorte der USW wurden bereits vorab in einer Arbeit von Theresa Schlömicher, am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, an der Montanuniversität Leoben bestimmt [28]. Aufgrund von einer Anhäufung von USW in größeren Städten, wie zum Beispiel in Wien, Graz, Linz, Salzburg und weiteren Städten mussten manche Umspannwerke manuell ausgeblendet werden, um Voronoi Gebiete zu erhalten, welche eine sinnvolle Basis darstellen. Die Anhäufung stellt dahingehend ein Problem dar, dass sich bei der Berechnung des Voronoi Diagramms teilweise sehr kleine Polygone bilden würden, welchen keine sinnvolle Datenbasis zuordenbar wäre. Auf Basis dieser Daten wurde in QGIS®, mithilfe eines integrierten Tools, automatisch ein österreichweites Voronoi Diagramm erstellt. Dieses ist in Abbildung 28 gezeigt. Die blauen Punkte zeigen die Umspannwerke. Jeder Punkt hat einen eigenen definierten Bereich, der mithilfe der Voronoi Berechnung ermittelt wurde und in der Abbildung durch die schwarzen Linien definiert wird. Diese Bereiche stellen jene Zellen dar, denen allen relevanten Daten zugeordnet werden mussten. Die allgemeine Benennung eines solchen Bereiches ist in dieser Arbeit als USW-Bezirk definiert. Diese USW-Bezirke kennzeichnen das Gebiet, das vom jeweiligen Umspannwerk versorgt wird.

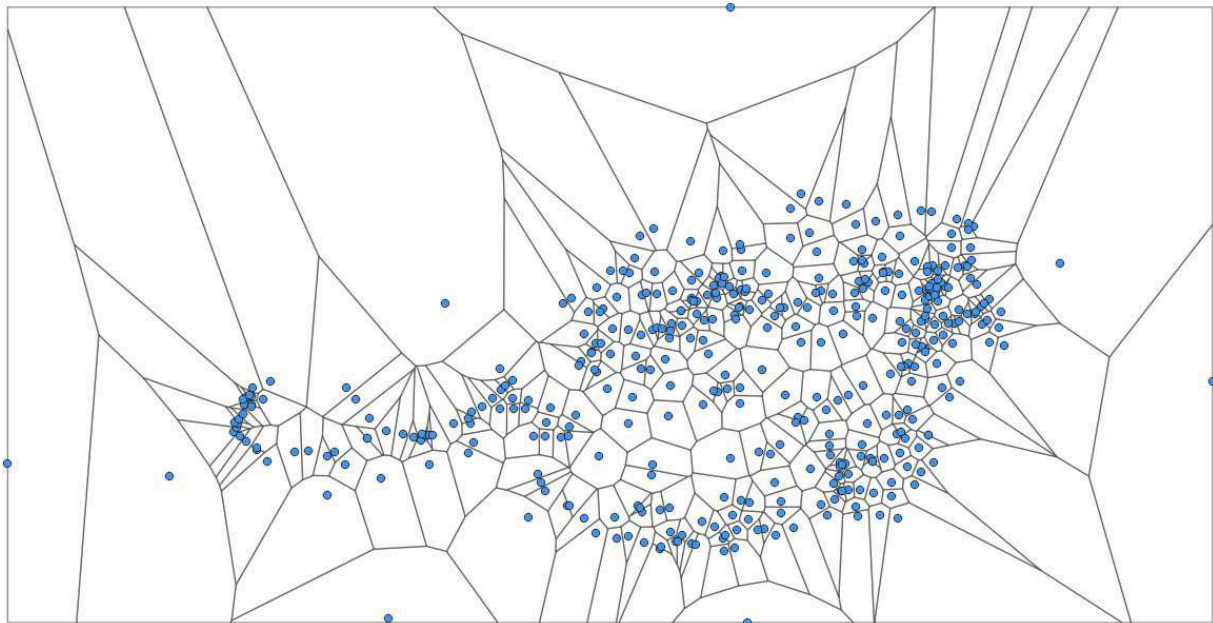


Abbildung 28: Voronoi Diagramm – Österreich

Abbildung 29 zeigt die allgemeinen möglichen Zusammenhänge zwischen den USW-Bezirken in einem multiplen Energiesystem. Die „Level 1 cell“ entspricht in einem solchen System den USW-Bezirk, welche mit anderen USW-Bezirken über Leitungen der unterschiedlichen Energieträger verbunden sein können.

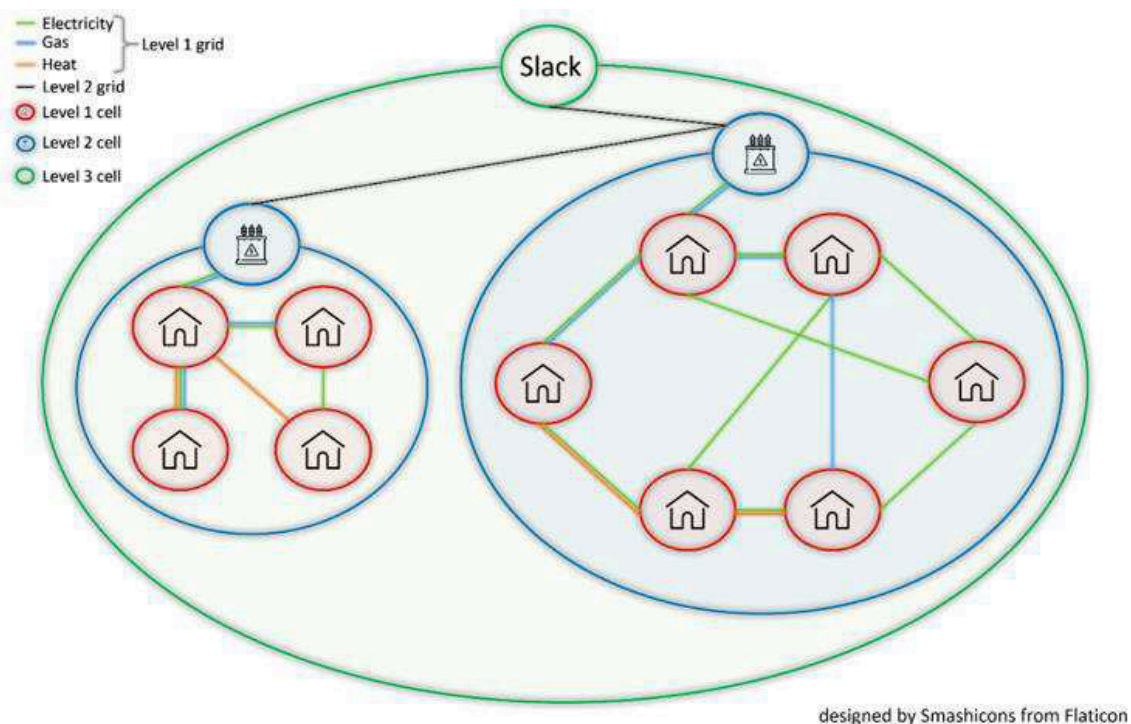


Abbildung 29: Überregionales System [26]

Ein USW-Bezirk ist wie in Abbildung 30 aufgebaut. Dieser kann Strom, Gas-, Wärmleitungen, Hybridelemente, wie GtH, GtPH, PtGH, PtH und HtP, Speicher, DSM Prozesse, Generatoren

Potentiale für Windkraft, PV oder Wasserkraft. Diese Daten stammen von Christoph Sejkora et al. [13] und wurden auf die jeweiligen zugehörigen USW-Bezirke aufsummiert. Abbildung 31 zeigt die Aufteilung der Gemeinden in Vorarlberg und Tirol auf die USW-Bezirke.

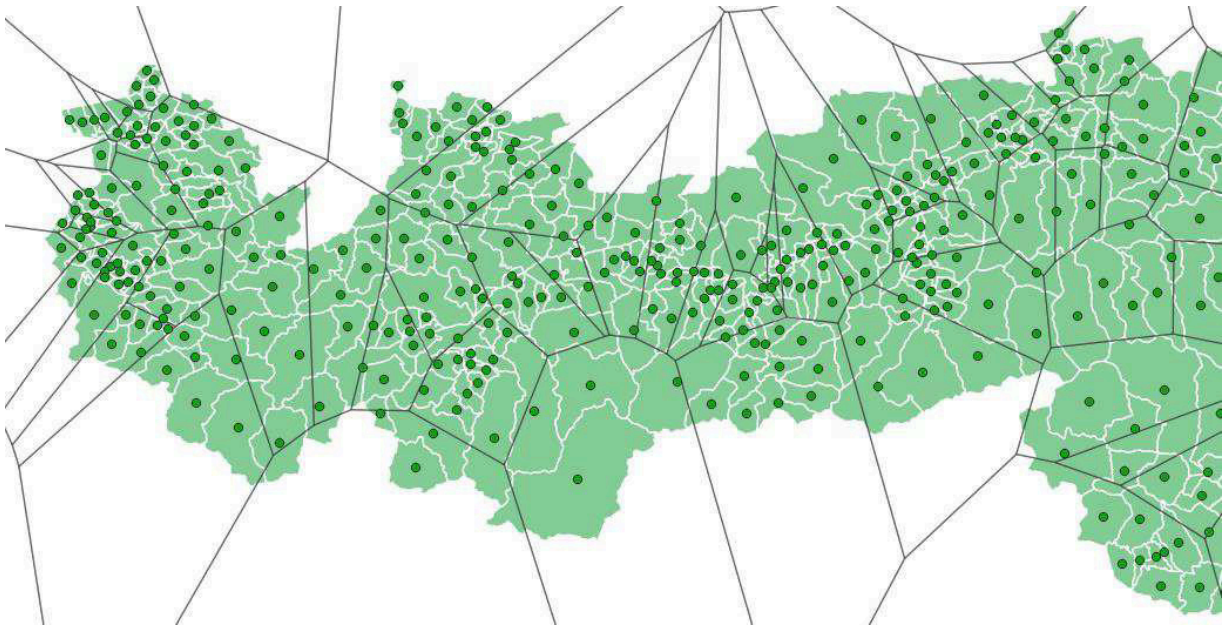


Abbildung 31: Voronoi Diagramm – Gemeindemittelpunkte und USW-Bezirke

Die grün gefärbten Punkte stellen die Gemeindemittelpunkte dar. Aus vorangegangenen Arbeiten von Christoph Sejkora am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik an der Montanuniversität Leoben, gibt es bereits räumlich aufgelöste Verbräuche für Gas und Elektrizität aus dem Jahr 2016 für alle politische Bezirke in Österreich [13]. Die Aufschlüsselung der Energiemengen für Elektrizität und Gas unterteilen sich jeweils in folgende Bereiche: [13]

- Industrie
 - Eisen und Stahlerzeugung
 - Chemie und Petrochemie
 - Nicht Eisen Metalle
 - Steine und Erden Glas
 - Fahrzeugbau
 - Maschinenbau
 - Bergbau
 - Nahrungs- und Genussmittel / Tabak
 - Papier und Druck
 - Holzverarbeitung
 - Bau
 - Textil und Leder

- Sonstiger produzierender Bereich
 - Öffentliche und private Dienstleistungen
 - Private Haushalte
 - Landwirtschaft

Da die Energiemengen auf Bezirksebene aggregiert sind, müssen die Daten folglich auf Gemeindeebene runtergebrochen werden, damit sie anschließend auf USW-Bezirke hochgerechnet werden können. Die Verbräuche in den Sektoren, Landwirtschaft, öffentliche und Private Dienstleistungen und Industrie wurden aufgeschlüsselt, indem die Anzahl der Beschäftigten der jeweiligen Gemeinden und Sektoren, im Verhältnis zu der Summe der Beschäftigten der zugehörigen Bezirke, angelehnt an [13], ermittelt wurden. Um die Daten der Gemeindeebene zuordnen zu können, wurden Informationen von Statistik Austria [29] genutzt. Die privaten Haushalte wurden nach demselben Schema aufgeteilt, mit dem Unterschied, dass dazu die Anzahl der Haushalte in den jeweiligen Gemeinden bezogen auf die Summe der Haushalte in den jeweiligen Bezirken genutzt wurden. Nachdem die Daten auf die Gemeinden aufgeschlüsselt wurden, wurden sie auf die zugehörigen USW-Bezirke hochgerechnet. Dies erfolgte, indem jeder Gemeindemittelpunkt, wie in Abbildung 31 gezeigt, den jeweiligen USW-Bezirken zugeteilt und aufsummiert wurde. Der Bahnstromverbrauch wurde auf Basis von Verbrauchsdaten und Standorten von Bahnstromumformern, den jeweiligen USW-Bezirken zugeordnet [30, 31]. Um den Wärmeverbrauch je USW-Bezirk zu ermitteln, wurden Daten von „Austrian Heat Map“ verwendet [32]. Diese Daten beziehen sich auf das Jahr 2012. Da sich der Wärmeverbrauch bis zum Jahr 2019 nicht wesentlich verändert hat [33], wurden diese Daten aufgrund ihrer guten örtlichen Zuordenbarkeit (politische bezirksaufgelöste Daten) als Datengrundlage herangezogen. Die Daten wurden den jeweiligen zugehörigen Gemeinden zugeteilt, analog zu den Gas- und Elektrizitätsdatenzuordnung, zu den USW-Bezirken. Mit Hilfe der Daten von Statistik Austria [33], konnte der Wärmeverbrauch, auf die Energieträger welche zur Wärmeerzeugung genutzt werden, zugeordnet werden: [33]

- Steinkohle
- Braunkohle
- Koks
- Petrolkoks
- Heizöl
- Gasöl für Heizzwecke
- Diesel
- Benzin

- Petroleum
- Flüssiggas
- Erdgas
- Elektrische Energie
- Fernwärme
- Scheitholz
- Biogene Brenn- und Treibstoffe
- Brennbare Abfälle
- Sonstige ET

Um Überschneidungen mit dem Gas- und Elektrizitätsverbrauch zu vermeiden, wurde der benötigte Gas- und Elektrizitätsanteil für den Wärmeverbrauch vom Gas- und Stromverbrauch abgezogen. Um zu ermitteln, ob ein USW-Bezirk einen Gasanschluss besitzt, wurden Daten von einer Projektarbeit herangezogen. [34] In dieser Arbeit wurden die österreichischen Gasleitungen der Netzebene 1 und 2 in QGIS® abgebildet (Abbildung 32). Die Gasleitungen wurden mit den USW-Bezirken geschnitten, wodurch ermittelt werden kann, welche Bereiche mit Gas versorgt sind.

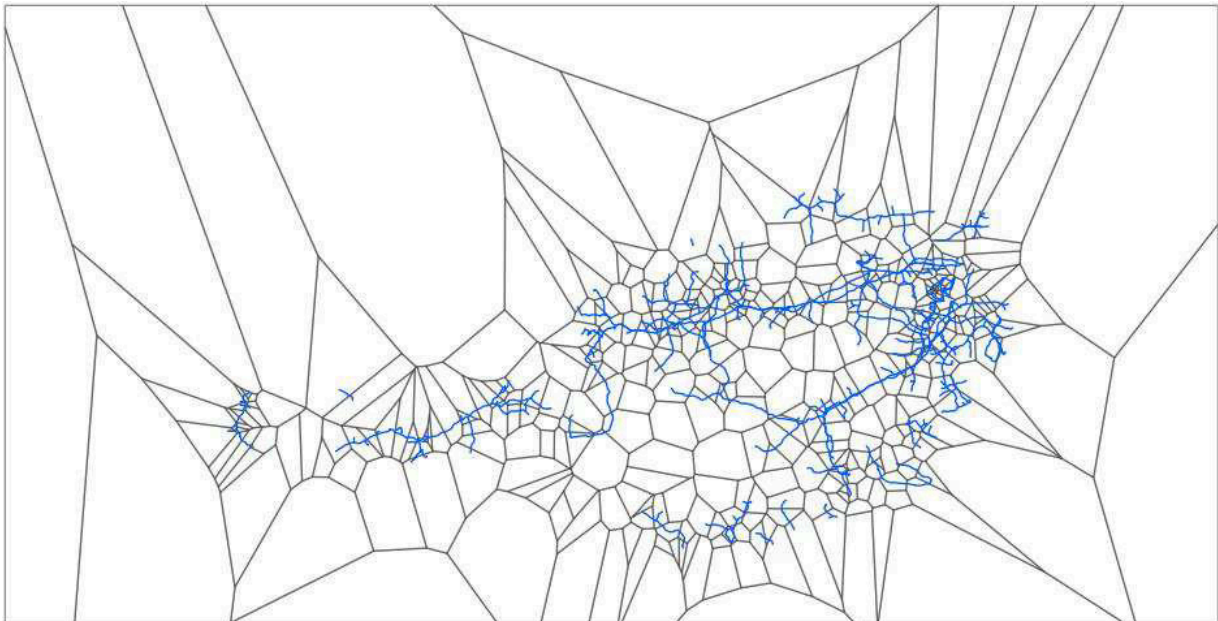


Abbildung 32: Voronoi Diagramm Gasleistungen [34]

Die Gasverbräuche sind in dieselben Bereichen (Industrie, Öffentliche und private Dienstleistungen, Private Haushalte, Landwirtschaft) eingeteilt, wie die Daten der elektrischen Energie [13].

Die umgelegten Endenergieverbräuche wurden im Anschluss auf ihre Richtigkeit überprüft. In Summe ergab sich ein Stromverbrauch von 47,148 TWh (Jahr 2016), ein Wärmeverbrauch von

88,986 TWh (Jahr 2012) und ein Gasverbrauch von 31,639 TWh (Jahr 2016). Diese Daten wurden mit den Daten von Statistik Austria [33, 35] von 2016 bzw. 2012 verglichen. Bei dem Vergleich ist darauf zu achten, dass dem Strom- und Gassektor jene Energiemenge abgezogen wurde, welche zur Deckung des Wärmeverbrauchs herangezogen wurden um keine Überlappung in den darauf aufgebauten Simulationen zu erhalten und eventuelle Energiemengen (E) doppelt zu rechnen. Dies entsprach 23,753 TWh für Gas und 6,480 TWh für Strom. Tabelle 1 zeigt diesen Vergleich, ohne die vorgenommenen Veränderungen im Strom und Gassektors bezüglich des Wärmeverbrauchs.

Tabelle 1: Gegenüberstellung Endenergieverbrauch [13, 32, 33, 35]

Sektor	E Datenaufbereitung [TWh]	E Statistik Austria [TWh]
Strom 2016	53,628	63,138
Wärme 2012	88,986	88,720
Gas 2016	55,392	54,990

Der Unterschied im Endenergieverbrauch von Strom ergibt sich daraus, dass bei den aufbereiteten Daten die Transportverluste (3,339 TWh) und die unternehmenseigene Anlagen (7,845 TWh) nicht berücksichtigt wurden [35]. Die Unterschiede im Sektor Wärme und Gas fallen vernachlässigbar gering aus und basieren auf der Methodik [13, 32].

4.2.2 Residuallast je USW-Bezirk

Die den USW-Bezirken zugeordneten Jahresenergieverbräuche, müssen zeitlich aufgelöst sein, um sie in HyFlow verwenden zu können. Dazu werden Lastprofile benötigt, mit denen die Jahresenergiemengen zeitlich aufgelöst dargestellt werden können. Der Lastgang für die Elektrizität wurde für den Industriesektor aus der Abbildung 33 [36] abgeleitet.

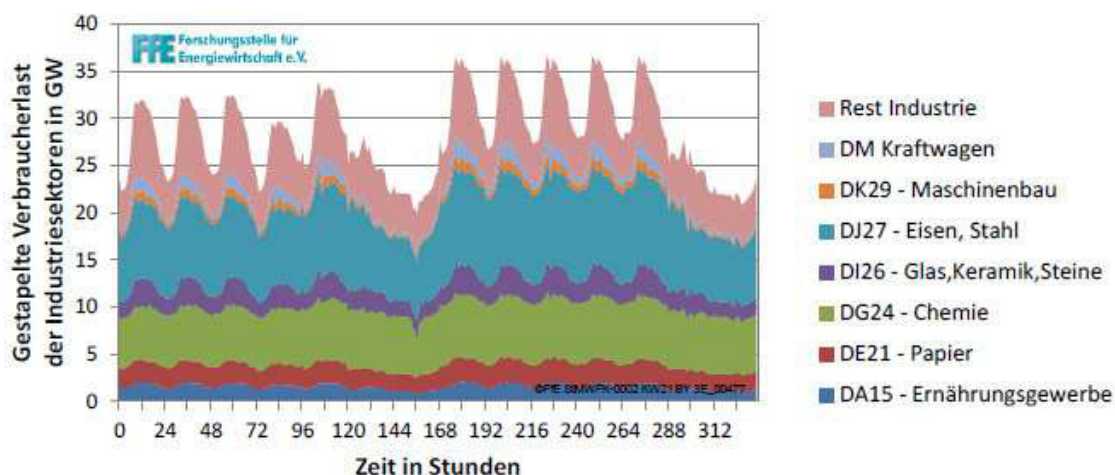


Abbildung 33: Residuallast Industrie [36]

In der Grafik wird das Lastprofil von unterschiedlichen Teilbereichen der Industrie gezeigt. Die y-Achse zeigt die aufsummierte Verbrauchsleistung in GW. Die x-Achse gibt die Zeit in Stunden wieder, dabei handelt es sich in Summe um 2 Wochen. Um die Jahresenergiemengen für die erstellte Lastkurve nutzen zu können, mussten die Industriesektoren aus Kapitel 4.2.1, auf die in der der Abbildung 33 gezeigten Bereiche [36, 37] zusammengefasst werden.

Die Kategorisierung der Bereiche erfolgte wie in Tabelle 2 gezeigt [36]. In der rechten Spalte der Tabelle stehen die Bereiche, welche aus der Datenaufbereitung hervorgehen. Diese Bereiche werden auf die diejenigen auf der linken Seite zusammengefasst.

Tabelle 2: Industriesektoren zusammengefasst

Zusammenfassung	Datenaufbereitung
	Bergbau
	Holzverarbeitung
Rest Industrie	Bau
	Textil und Leder
	Sonstiger produzierender Bereich
DM Kraftwagen	Fahrzeugbau
DK29 Maschinenbau	Maschinenbau
DJ27 Eisen, Stahl	Eisen und Stahlerzeugung
	Steine und Erden Glas
DI26 Glas, Keramik, Steine	Nicht Eisen Metalle
	Chemie und Petrochemie
DG24 Chemie	
DE21 Papier	Papier und Druck
DA15 Ernährungsgewerbe	Nahrungs- und Genussmittel / Tabak

Zur Berechnung des zeitlich aufgelösten Verbrauchs der Sektoren Haushalt, Dienstleistung und Landwirtschaft wurden die Standardlastprofile (SLP) H0, G0 und L0 genutzt [38]. Um für jeden USW-Bezirk, für Wirk- und Blindleistung, jeweils nur ein Lastgang zu erhalten, wurden die jeweiligen Sektoren aufsummiert.

Um den Energietransfer zu den Nachbarstaaten zu berücksichtigen, wurde der Im- und Export von Strom, mittels Daten von European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) ermittelt. [39] Dazu wurden die Lastflüsse zwischen Österreich und folgenden Ländern für das Jahr 2019 herangezogen:

- Deutschland
- Italien

- Schweiz
- Slowenien
- Tschechien
- Ungarn

Mit den anderen Nachbarstaaten fand laut ENTSO-E kein Stromaustausch im Jahr 2019 statt. [39]

Um die Blindleistung auf Basis der Wirkleistung berechnen zu können, kann der Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ genutzt werden. Dieser wurde mit 0,98, auf Basis diverser Literatur [40–42] und von vorhandenen Daten am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik gewählt. Mit dem gewählten $\cos(\varphi)$ lässt sich die Blindleistung wie in Formel (4–1) und (4–2) berechnen.

$$\varphi = \cos^{-1}(0,98) \quad (4-1)$$

$$Q = -P \tan(\varphi) \quad (4-2)$$

Um einen zeitlich aufgelösten Gasverbrauch zu erhalten, wurde für die jeweiligen Sektoren unterschiedliche Methoden angewendet. Da in der untersuchten Literatur, keine geeigneten Lastprofile für den Gasverbrauch in der Industrie auffindbar war, wurde dasselbe Lastprofil (Abbildung 33) für die einzelnen Sektoren herangezogen, wie für die Berechnung des zeitlich aufgelösten Stromverbrauchs. Da der Stromverbrauch ein wesentlicher Indikator für die aktiven Zeiten in der Industrie ist. Um den zeitlichen Gasverbrauch in den Sektoren privater Haushalt, Dienstleistungen und Land- und Forstwirtschaft zu ermitteln, wurde die SigLinDe-Funktion verwendet. Die Berechnung dieser ist im folgenden Teil näher erklärt. Diese Funktion wird dazu verwendet, um den Gasverbrauch und somit indirekt auch den Wärmeverbrauch, in Abhängigkeit der Außentemperatur, zu berechnen. Dadurch kann für jeden Zeitschritt, bei bekannter Temperatur, der Verbrauch bestimmt werden. Der linke Teil der Abbildung 34 zeigt die SigLinDe bei geringem Heizgasanteil und hohem Prozessgasanteil. Die rechte Seite zeigt die Funktion bei hohem Prozessgasanteil und geringem Heizgasanteil. Über die Temperatur, welche auf der x-Achse abgebildet ist, kann der Profilk Funktionswert $h(\vartheta)$ (y-Achse) abgelesen werden. Wie aus der Abbildung, durch die unterschiedlichen Funktionsverläufe hervorgeht, bietet die SigLinDe-Funktion für unterschiedliche Sektoren unterschiedlich angepasste Funktionen an. Die Berechnung dieses Wertes wird in den nächsten Seiten näher erklärt. [43]

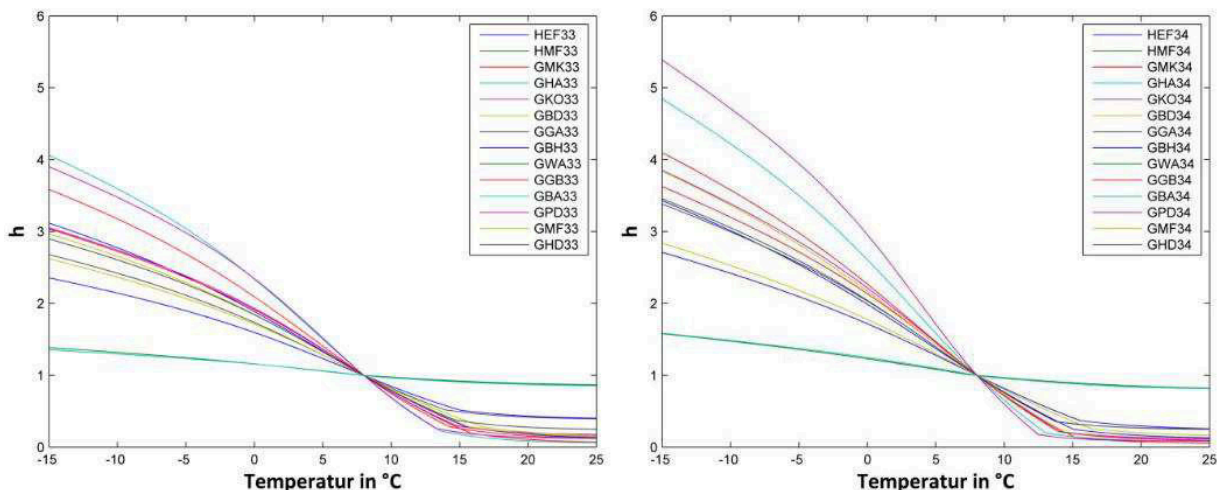


Abbildung 34: SigLinDe – Profil [43]

Zur Berechnung des zeitlich aufgelösten Verbrauches müssen mehrere Werte ermittelt werden. Abbildung 35 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Berechnung. Der F_{WT} -Wert wird Wochentagfaktor genannt und ist abhängig vom Wochentag und dem Sektor, für den der Verbrauch ermittelt werden soll. [43]

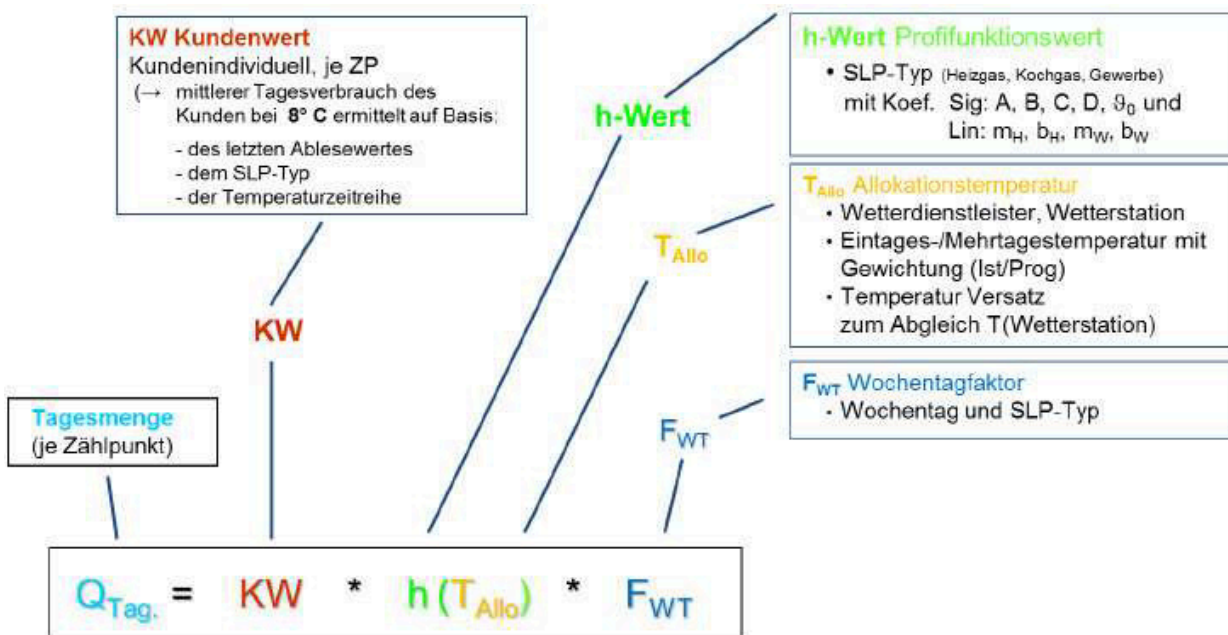


Abbildung 35: SigLinDe – Formel [43]

Der Profifunktionswert $h(\theta)$ ist abhängig von der Umgebungstemperatur und errechnet sich wie in (4–3) dargestellt. Die unterschiedlichen Koeffizienten sind Sektor spezifisch. [43]

$$h(\vartheta) = \underbrace{\left[\left(\frac{A}{1 + \left(\frac{B}{\vartheta - \vartheta_0} \right)^C} + D \right) \right]}_{\text{Anteil - Sigmoid}} + \underbrace{\left[\max \left\{ \begin{array}{l} m_H \cdot \vartheta + b_H \\ m_W \cdot \vartheta + b_W \end{array} \right\} \right]}_{\text{Anteil - Linear}} \quad (4-3)$$

Die Koeffizienten des Sigmoid-Teils sind wie folgt definiert: [43]

- A – Heizverbrauch bei sehr niedriger Temperatur
- B – Start der Heizphase
- C – Steigungsgrad der Funktion innerhalb der Heizphase
- D – Anteil der Warmwasserversorgung
- ϑ – Allokationstemperatur (°C)
- ϑ_0 – Bei der Abbildung hoher Temperaturen, zeigt die Funktion ein asymptotisches Verhalten, Festlegung dieses Parameters auf $\vartheta_0 = 40,0$ °C

Der Kundenwert KW, eine individuelle und zeitraumbezogene Größe, wie in Abbildung 35 gezeigt, wird dafür benötigt, um den Energieverbrauch Q zu ermitteln. Dieser errechnet sich, wie in (4-4) gezeigt, aus dem Verbrauchswert Q für den betrachteten Zeitraum N, dem Wochentagfaktor F und dem Profilk Funktionswert h. [43]

$$KW = \frac{Q_N}{\sum_{i=1}^N h(\vartheta_{D_i}) \cdot F_{WT}(D_i)} \quad (4-4)$$

Die benötigten Daten für ein zeitlich aufgelöstes Temperaturprofil je USW-Bezirk, wurden von der Internetplattform „renewables.ninja“ für das Jahr 2019 heruntergeladen. [44–46] Da der Gasanteil des Wärmeverbrauchs im Vorfeld vom Gasverbrauch abgezogen wurde, enthält der Gasverbrauch keinen Heizgasanteil. Daher wurde der Gasverbrauch abzüglich des Heizgases für die Bereiche privater Haushalt, Dienstleistungen und Land- und Forstwirtschaft mit den Kennzahlen des Sektors „Kochgas“ berechnet, da dieser Sektor für Berechnungen ohne Wärmeverbrauch angedacht ist. Die Ergebnisse aller Sektoren wurden wie bei der Wirk- und Blindleistung je Zeitschritt aufsummiert, um einen einzelnen Lastgang für den Gasverbrauch je USW-Bezirk zu erhalten. [43]

Jedem Umspannwerk musste ein Wärmeverbrauch zugeordnet werden. Die Erstellung der zeitlich aufgelösten Lastgänge, für die einzelnen Sektoren, erfolgte über die unterschiedlichen SigLinDe-Funktionen, die in der Tabelle 3 den Sektoren gegenübergestellt sind. Da es sich rein um den Wärmeverbrauch handelt, muss darauf geachtet werden, dass die Zuordnung des Sektors Industrie sich nicht auf den eigentlichen Herstellungsprozess bezieht (ist im Gasverbrauch berücksichtigt), sondern auf das Heizen der Gebäude.

Tabelle 3: Zuordnung Wärmeverbrauch SigLinDe

Sektor	SigLinde-Funktion
Privater Haushalt	Einfamilienhaushalt
Dienstleistungen	Sonst. betr. Dienstleistungen
Land- und Forstwirtschaft	Haushaltsähnliche Gewerbebetriebe
Industrie	Summenlastprofil Gewerbe, Handel, Dienstleistung

Abbildung 36 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Berechnung des Wärmeverbrauchs über ein Jahr mittels der SigLinDe-Funktion. Auf der x-Achse sind die Zeitschritte in 15 Minutenwerte aufgetragen. Die y-Achse gibt die Leistung in Megawatt an. Es handelt sich in diesem Beispiel um den aufsummierten Verbrauch der privaten Haushalte des USW-Bezirks Wien Südost.

Wärmelastgang absieren auf der Siglinde-Funktion

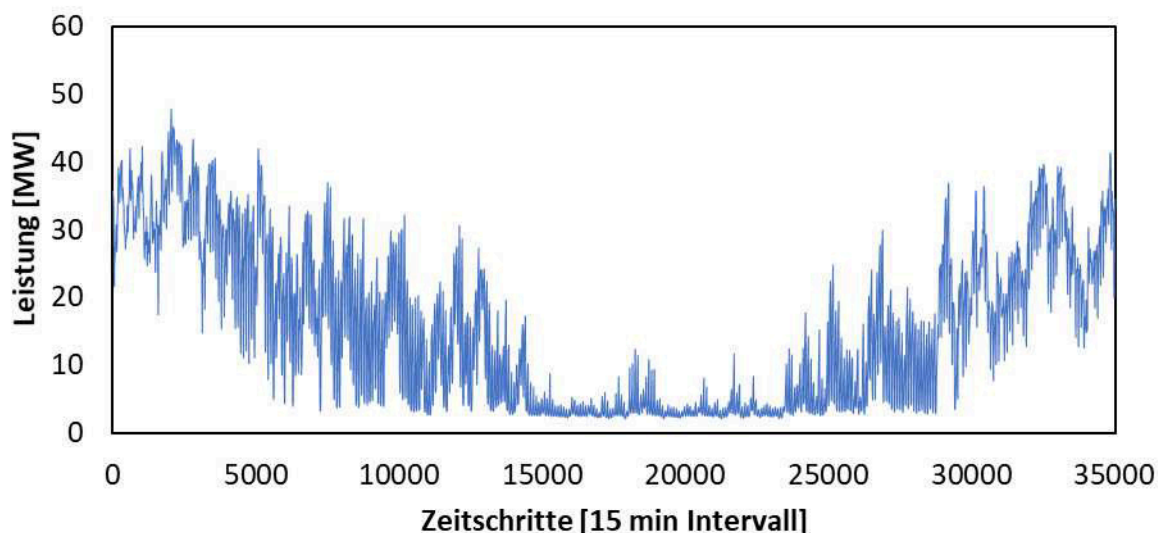


Abbildung 36: Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses (USW-Bezirk Wien Südost)

Wie bei den anderen Energieträgern wurde zuerst der Verbrauch für jeden jeweiligen Sektor berechnet und anschließend aufsummiert.

4.2.3 Generatoren je USW-Bezirk

Neben den Residuallasten mussten auch die jeweiligen Generatoren (Kraftwerke), in den einzelnen USW-Bezirken bestimmt werden. Im nachfolgenden Teil ist die Datenerhebung zur Bestimmung der Kraftwerke in den jeweiligen USW-Bezirken näher beschrieben. Die Leistung je USW-Bezirk wurde für die Kraftwerke Biogas bzw. Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Photovoltaik (PV), Windkraftanlagen (WKA) und Kleinwasserkraftwerke (KWKW) (<10 MW) bestimmt.

Für die Datengenerierung der Leistungen von Biogas- [47] bzw. KWK-Anlagen [48] wurde auf einen QGIS Layer zurückgegriffen der von Mitarbeitern am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik auf der Montanuniversität erstellt wurde. In diesem Layer sind sowohl die Standorte als auch Leistungen der jeweiligen Anlagen verzeichnet. Dieser wurde mit dem USW-Bezirk Layer geschnitten, wodurch diese mit den jeweiligen Anlagendaten verknüpft werden. Auch bei der Generatorleistung musste, wie bei den Residuallasten für die einzelnen Energieträger, ein zeitlicher Verlauf erstellt werden. Laut SLP E0 [38] für KWK- und Biogasanlagen kann angenommen werden, dass die Energiebereitstellung im Bandlastbetrieb stattfindet. Daher wurde zur Berechnung des zeitlichen Verlaufes, konstant der maximale Umwandlungsfaktor, in den jeweiligen Energieträger, angenommen.

Um die PV Leistungen je USW-Bezirk zu bestimmen wurden die PV Leistungen je Bundesland ermittelt [49] und diese über die Gemeinde Potentiale [13] auf die USW-Bezirke umgelegt. Anschließend musste ein zeitlicher Erzeugungsverlauf erstellt werden. Dazu wurden stundenaufgelöste, relative PV-Leistungsdaten, für das Jahr 2019 von der Internetplattform „Renewables.ninja“ [44] genutzt.

Auf der Basis der Leistungsdaten von Kleinwasserkraftwerke (< 10 MW) je Bundesland [50, 51] wurden die Leistungen für KWKW je USW-Bezirk, über die Umlegung der Gemeinde Potentiale [13], erarbeitet. Um ein zeitlich aufgelöstes Profil für diesen Erzeugertyp zu erhalten, wurde ein Lastgang über die Gletscherschmelze erstellt [52, 53]. Tabelle 4 zeigt die Messpunkte die für diesen Lastgang genutzt wurden. Das Kriterium für die Messstellen sind, dass sie möglichst hoch gelegen sind, um ein realistisches Abflussverhalten zu erhalten. [54]

Tabelle 4: Messpunkte kleine Flüsse [52, 54]

Name des Messpunktes	Messnummer	Höhe [m]
Gepatschalm	230300	1895
Vent	201350	1891
Obergurgl	201376	1878
Neukaser	201996	1786
Innerg Schloss	212068	1686
Kees	203893	2040

Die Wasserkraftwerke über 10 MW benötigten eine eigene Programmierung, zur Implementierung in HyFlow. Sowohl diese Programmierung als auch die Datenrecherche dazu wurde parallel zu dieser Arbeit von Mitarbeitern des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik, an der Montanuniversität Leoben, erstellt und wird daher in dieser Arbeit nicht näher diskutiert.

Die Anzahl, sowie die maximalen Leistungen vorhandener Windkraftanlagen je Gemeinde, wurde am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, in einer Projektarbeit ermittelt und aufbereitet [55]. Diese Leistungen wurden den jeweiligen USW-Bezirken zugeteilt und aufsummiert. Der zeitliche Verlauf, der relativen, stundenaufgelösten, Windkraftleistungen wurde, wie bei den PV Anlagen bestimmt.

4.2.4 Speicher je USW-Bezirk

Damit alle Speicher in den jeweiligen USW-Bezirken richtig abgebildet sind, wurden sowohl Daten von Wärmespeichern, Gasspeichern, als auch Pumpspeicherkraftwerken aufbereitet und zugeordnet.

Die Speicherkapazitäten der Wärmespeicher wurden anhand der Anzahl der Haushalte je USW-Bezirk mit einem Multiplikator von 100 kWh berechnet. Ein Wärmespeicher wurde in den jeweiligen Bezirken erstellt, wenn zum Beispiel im selbigen Gebiet Biogasanlagen, KWK-Anlagen und/oder Wärmepumpen installiert sind.

Die vorhandenen Gasspeicher wurden der Projektarbeit [34] von Florian Fritz entnommen und den dementsprechenden USW-Bezirken zugeordnet.

Die in Österreich vorhandenen Pumpspeicherkraftwerke wurden am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik auf der Montanuniversität Leoben ermittelt [55] und anschließend für die Integration in HyFlow vorbereitet [54].

4.2.5 Hybridelemente je USW-Bezirk

Neben den Generatoren und Speicher wurde auch der derzeitige Stand der in Österreich eingesetzten Hybridelemente erfasst.

Um die installierte Leistung von Wärmepumpen je USW-Bezirk zu erfassen wurden die Energiemengen der Kategorie „elektrische Energie“, von dem Wärmeverbrauchsdaten aus dem Kapitel 4.2.1 verwendet. Wie in 4.2.1 beschrieben, ist der Wärmeverbrauch in unterschiedliche Kategorien unterteilt. Der Anteil an elektrischer Energie wurde als Referenz für die installierte Leistung genutzt.

Die installierte Leistung von Gasheizungen wurde gleich wie bei den Wärmepumpen, mit dem Unterschied, dass anstatt der Kategorie „elektrischer Energie“ die Kategorie „Gas“ zur Berechnung verwendet wurde.

Die technischen Daten der Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) wurden bereits in einer Projektarbeit am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, an der Montanuniversität [34] aufbereitet und anschließend im Zuge dieser Arbeit aktualisiert. [56]

4.3 Implementierung Flexibilitätsband

Der Entwicklungsstand von HyFlow vor dieser Arbeit ist in Kapitel 4.1 näher beschrieben. In dieser Version von HyFlow gibt es bereits die Möglichkeit Hybridelemente, Speicher und DSM-Prozesse in HyFlow zu integrieren. Im Zuge dieser Arbeit wurde zu den bereits vorhandenen Betriebsstrategien dieser Elemente, eine weitere Strategie hinzugefügt. Bei dieser Betriebsstrategie handelt es sich um eine marktorientierte Optimierung von den genannten Elementen. Für die Implementierung dieser neuen Funktion in HyFlow muss ein Flexibilitätsband und ein energieträgerübergreifender Optimierer integriert werden. Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen den prinzipiellen Programmablauf im HyFlow.

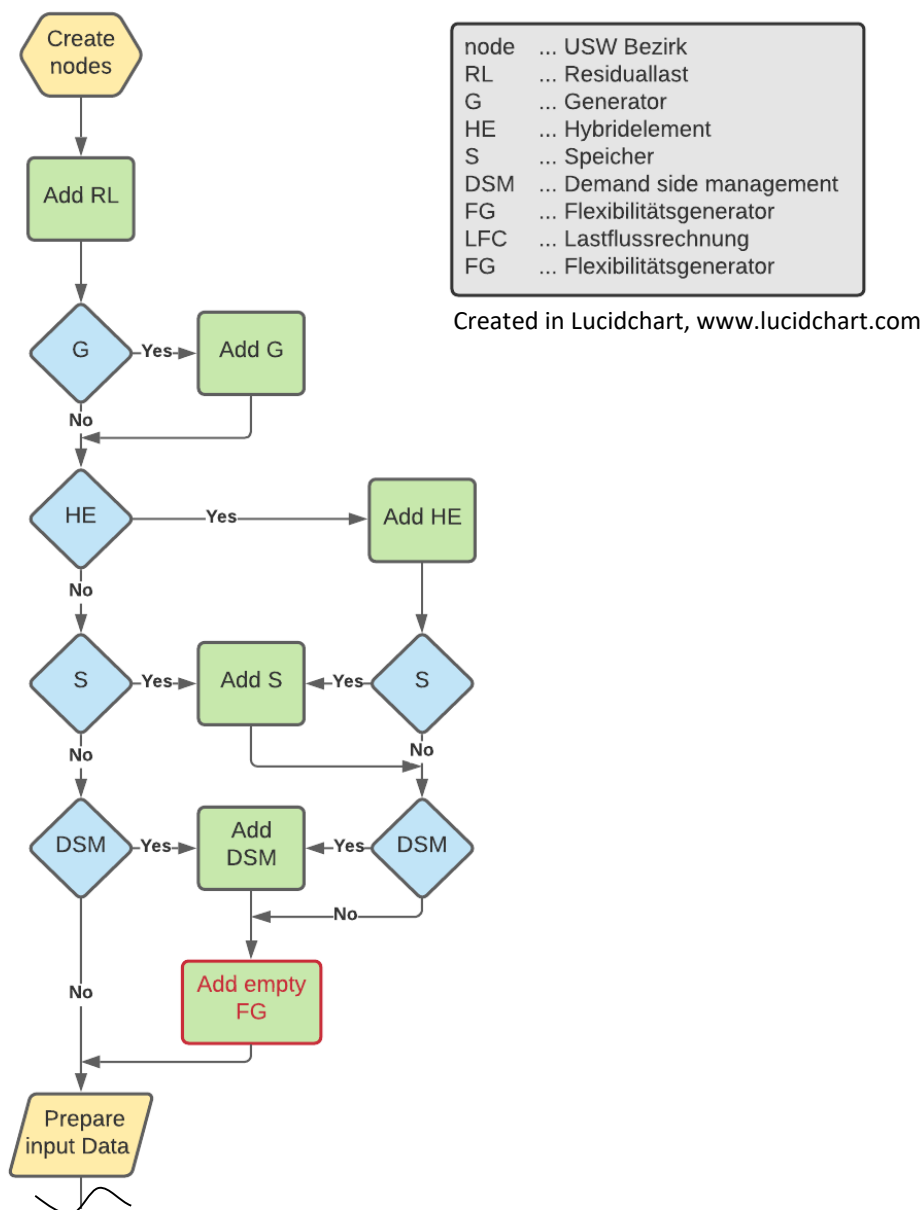


Abbildung 37: HyFlow – Flussdiagramm Teil 1

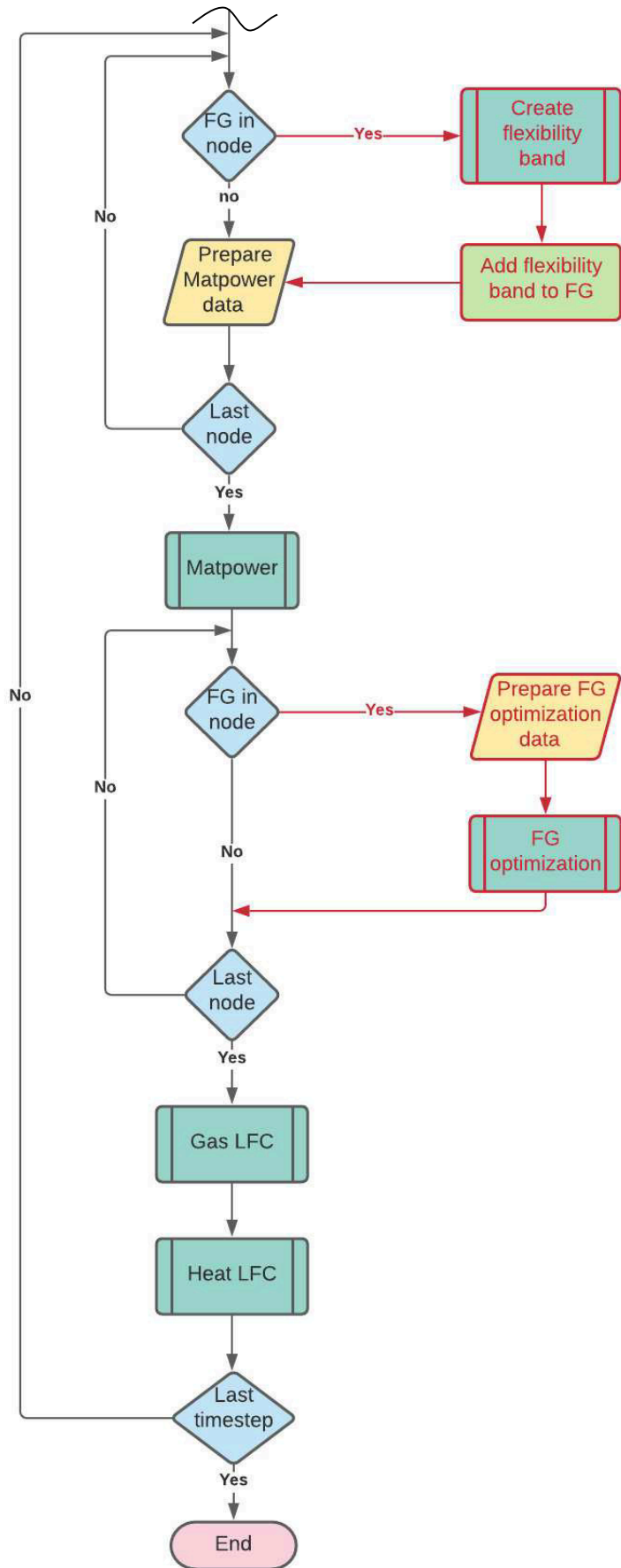


Abbildung 38: HyFlow – Flussdiagramm Teil 2

Die rot eingefärbten Elemente, sind jene die zur Erstellung der neuen Betriebsstrategie hinzugefügt und teilweise neu programmiert werden mussten. Die Schritte zwischen dem Punkt „Create nodes“ und „Prepare input Data“ dienen zum Einlesen der im Kapitel 4.2 aufbereiteten Daten. Das beinhaltet das Erstellen aller USW-Bezirke, die Zuordnung der jeweiligen Residuallasten, Generatoren, Hybridelementen, Speicher und DSM Prozessen zu den Bezirken. Neu bei diesem Einlesevorgang ist, dass bei Erfüllung bestimmter Kriterien, ein Flexibilitätsgenerator (FG) erstellt und in den USW-Bezirk integriert wird. Die Definition eines FG und die genannten Kriterien werden in diesem Kapitel noch näher erläutert. Ziel des Flexibilitätsbandes ist, die maximale positive und negative Flexibilität im Stromsektor für den jeweiligen USW-Bezirk zu berechnen. Auf Basis dieser Berechnungen baut die marktorientierte Optimierung in den nachfolgenden Schritten auf. Der Grundgedanke für die Implementierung eines marktorientierten Optimierers ist, dass zusätzlich zur örtlichen Optimierung zwischen den USW-Bezirken, mittels der OPF Funktion von Matpower, auch eine zeitliche Optimierung innerhalb der jeweiligen USW-Bezirke, wie in Abbildung 30 gezeigt, durchgeführt wird. Die zeitliche Komponente der Optimierung wird im Kapitel 4.3.2 näher beschrieben und hat den Vorteil, dass die im USW-Bezirk enthaltenen Elemente, für den betrachteten Zeitschritt, marktorientierte Entscheidungen auf Basis von zukünftigen Energieträgerpreisen trifft. Neben den positiven wirtschaftlichen Effekten kann sich diese Optimierung auch positiv auf das Netz auswirken. Bei einem hohen Anteil an erneuerbarer Energie im Netz, kann es zu negativen Residuallasten und somit auch zu den Überlastungen im Netz kommen. Am freiem Markt wird der Strompreis durch Angebot und Nachfrage gebildet [57]. Bei einem hohen Anteil von Strom aus erneuerbaren Energiequellen sind die Stromkosten, basierend auf der Preisbildung über die Grenzkosten in der Merit Order [57], gering. Da der marktorientierte Optimierer immer versucht die Gesamtenergiekosten im jeweiligen USW-Bezirk zu minimieren, bezieht dieser vor allem bei niedrigen Energiekosten möglichst viel Energie (unter der Berücksichtigung das diese Energie in späteren Zeitschritten gewinnbringend verkauft oder verbraucht werden kann) aus dem jeweiligen Netz, mit den geringen Energiepreisen. Dadurch wird das Netz entlastet, wodurch die im Optimierer optimierten Objekte eine stabilisierende Wirkung auf das Netz haben. Durch die Flexibilitätsoptionen wird also die Flexibilität in den jeweiligen Netzen erhöht. Um den jeweiligen USW-Bezirken mit Flexibilitätsoptionen, wie in Abbildung 37 gezeigt, einen Flexibilitätsgenerator zuzuweisen, muss vorab bestimmt werden, welche Elemente Flexibilitätsoptionen aufweisen. Eine Flexibilität wird in dieser Arbeit dahingehend definiert, dass ein installiertes Element die Energie eines Energieträgers erzeugen oder verbrauchen kann, ohne dass dieses Element einen bestimmten vorgegebenen Fahrplan folgen muss. Darunter fallen Hybridelemente, Speicher und DSM-Prozesse. Jeden dieser genannten

Elemente wurde bei der Datenaufbereitung eine bestimmte Betriebsstrategie in Form einer Zahl zugeordnet. Die Programmierung prüft ein jedes Element, das der Zelle zugeordnet wird, auf diese Zahl und sobald ein solches Flexibilitätselement im USW-Bezirk erkannt wird, wird ein Flexibilitätsgenerator, vorerst ohne Inhalt, erstellt. Die Leistungsgrenzen dieser Generatoren werden bei der Berechnung des Flexibilitätsbandes ermittelt und anschließend den FG wie in Abbildung 38 gezeigt zugeordnet.

4.3.1 Berechnung Flexibilitätsband

In den ersten beiden roten Blöcken, in der Abbildung 38, wird das Flexibilitätsband berechnet und anschließend dem jeweiligen Flexibilitätsgenerator zugeordnet. Zu Beginn wird überprüft ob ein Flexibilitätsgenerator im USW-Bezirk existiert. Ist das nicht der Fall, wird die Flexibilitätsoption nicht in Anspruch genommen und das Programm läuft wie gewohnt ab. Detektiert das Programm einen FG, muss das Flexibilitätsband berechnet werden. Hierbei wird zwischen einer positiven und negativen Bandbreite unterschieden. Die Produktion von Strom erhöht das negative Flexibilitätsband, der Verbrauch erhöht das Positive. Folgende Elemente können entweder als Stromverbraucher oder als Erzeuger dienen:

- Stromspeicher
- DSM

Folgende erhöhen das Positive Flexibilitätsband:

- PtGH
- PtH

Die negative Flexibilität wird durch folgende Elemente erhöht:

- HtP
- GtPH

Je nachdem ob der USW-Bezirk einen Wärme- und/oder Gasnetzanschluss besitzt und davon abhängig welche unterschiedlichen Elemente im System vorhanden sind, kann das Flexibilitätsband unterschiedlich ausprägt sein. Um alle unterschiedlichen Situationen zu berücksichtigen, wird die Bandbreite der Flexibilität der Hybridelemente durch zwei Optimierungsschritte bestimmt. Eine Optimierung für das negative Flexibilitätsband und eine für das Positive. Die Optimierung ist auf die Leistungsgrenzen der jeweiligen Elemente bzw. wenn kein Gas- oder Wärmenetzanschluss existiert, auf die Systemgrenzen der verwendeten Energieträger begrenzt. So darf zum Beispiel, bei einem nicht vorahnden Wärmenetz, nicht mehr Wärme aus dem System verbraucht werden, wie vorhanden oder durch andere Elemente aufgebracht werden kann. In Abbildung 39 ist der allgemeine Aufbau und die

möglichen Leistungsflüsse eines USW-Bezirk dargestellt. Ist einem Energieträger eine Übergabestation bzw. ein Transformator zugeordnet, bedeutet das, dass der Energieträger einen Netzanschluss besitzt.

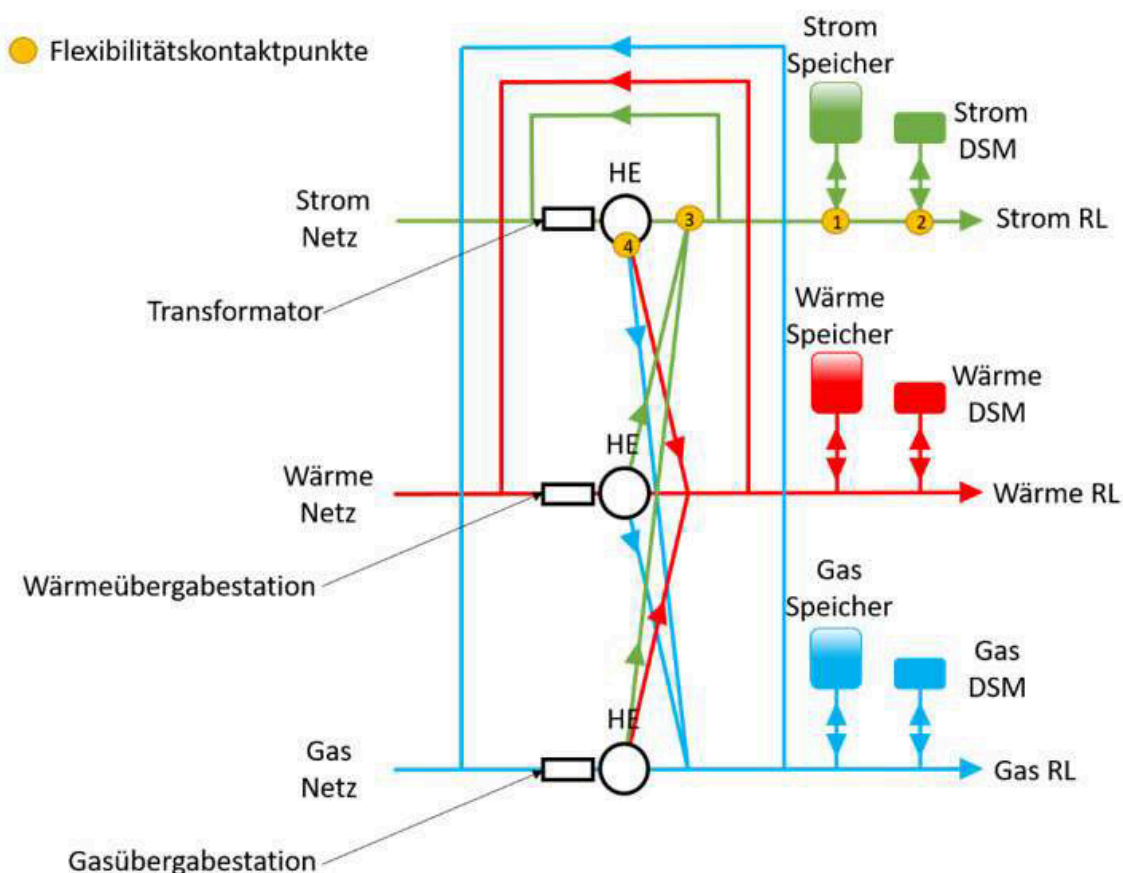


Abbildung 39: Flexibilitätsband – USW-Bezirk

Die Hybridelemente in der Grafik, benannt als HE, ermöglichen die Umwandlung eines Energieträgers in einen anderen Energieträger. Die jeweilige Farbe in der Abbildung spiegelt den Energieträger (Strom – grün, Wärme – rot, Gas – blau) wieder. Die gelben Punkte zeigen die direkten Kontaktpunkte, die für das Flexibilitätsband entscheidend sind.

Im folgenden Abschnitt wird die Berechnung des Flexibilitätsbandes näher beschrieben. Die in diesem Kapitel genutzten Indizes sind in der Tabelle 5 und Tabelle 6 definiert. In den folgenden Formeln steht der Buchstabe P für einen Leistungsfluss in Watt, E für eine Energiemenge in Wattstunden und t für eine Zeit in Stunden.

Tabelle 5: Flexibilitätsband – Indizes (Teil 1)

Index	Definition
s	Stromsektor
w	Wärmesektor

Tabelle 6: Flexibilitätsband – Indizes (Teil 2)

Index	Definition
g	Gassektor
nf	Negatives Flexibilitätsband
pf	Positives Flexibilitätsband
dis	Speicher Entladung
ch	Speicher Aufladung
ss	Speicherstand
sm	Maximale Speicherkapazität
DSMe	DSM Energieerzeugung
DSMv	DSM Energieverbrauch
so	Maximaler Systemoutput
si	Maximaler Systeminput

Die Berechnung des Flexibilitätsbandes erfolgt in zwei Teilschritten. Im ersten Schritt werden die Leistungsgrenzen, der im Stromsektor vorhandenen Energiespeicher und DSM-Prozessen (Flexibilitätskontaktpunkt 1 und 2) ermittelt und aufsummiert. Dies berechnet sich wie in Formel (4–5) und (4–6) gezeigt.

$$P_{nf} = \min\left(P_{sdis}, \frac{E_{s_{ss}} \cdot \eta_{dis}}{t}\right) + P_{s_{DSMe}} \quad (4-5)$$

$$P_{pf} = \min\left(P_{sch}, \frac{E_{s_{sm}} - E_{s_{ss}}}{t \cdot \eta_{ch}}\right) + P_{s_{DSMv}} \quad (4-6)$$

Im zweiten Teilschritt werden die möglichen maximalen Leistungen der Hybridelemente bestimmt. Je nachdem wie das System des betrachteten Energieträgers aufgebaut ist, können unterschiedliche Kombinationen und somit Flexibilitätsbänder entstehen. Um alle Fälle abdecken zu können musste eine Optimierung integriert werden. Der Optimierungscode in MATLAB® wurde mithilfe von Yalmip [58] erstellt. Die Optimierung erfolgte mit dem Optimierer Gruobi™ [59]. Die Eingabeparameter für die Optimierung sind in Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 7: Flexibilitätsband – Eingabeparameter (Teil 1)

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Einheit
FlexOptHe	Eigenschaften Hybridelemente	
H_storage	Eigenschaften Wärmespeicher	

Tabelle 8: Flexibilitätsband – Eingabeparameter (Teil 2)

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Einheit
G_storage	Eigenschaften Gasspeicher	
H_DSM	Eigenschaften Wärme-DSM	
G_DSM	Eigenschaften Gas-DSM	
H_DSM	Eigenschaften Wärme-DSM	
RL	Residuallast Energieträger	Watt
t	Zeitschritt	Stunden
ops	Optimierer Eigenschaften	
GNetConnect	Gasnetzanschluss = 1 Kein Gasnetzanschluss = 0	
HNetConnect	Wärmenetzanschluss = 1 Kein Wärmenetzanschluss = 0	

FlexOptHe übergibt die Hybridelemente und deren Eigenschaften an den Optimierer. Jede Zeile in (4–7) steht für ein HE, daher entspricht die Anzahl der Zeilen der Anzahl der HE.

$$FlexOptHe = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & \eta & 0 & \eta & 0 & \eta & UG & OG \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

Die erste, zweite und dritte Spalte gibt in derselben Reihenfolge darüber Auskunft, ob Strom, Wärme oder Gas bezogen wird. Dabei bedeutet 1, dass dieser Energieträger genutzt wird und 0, dass dieser nicht bezogen wird. In der vierten, fünften und sechsten Spalte wird festgelegt, ob Energie in Strom, Wärme oder Gas umgewandelt (η) wird oder nicht (0). Das Symbol η entspricht dem Umwandlungswirkungsgrad. In der siebten Spalte kann die minimal übertragbare Leistung (UG) in Watt angegeben werden. Hier ist zu beachten, dass diese nie kleiner als Null sein darf. Die achte Spalte gibt die Obergrenze (OG) der übertragbaren Leistung in Watt an. Somit wird mit diesen beiden Spalten der Leistungsbereich der Konverter bestimmt. Der Eingabedaten für den Wärmespeicher (H_storage) und den Gasspeicher (G_storage) sind gleich aufgebaut, daher wird stellvertretend für beide Eingabeparameter der Parameter H_storage in (4–8) beschrieben. Jede Zeile steht für einen Wärmespeicher. Die Anzahl der Zeilen gibt die Anzahl der Speicher an.

$$H_storage = \begin{bmatrix} OG & AB & OG & OG & \eta & \eta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Die erste Spalte gibt die maximale Speicherkapazität (OG) des jeweiligen Speichers in Wattstunden an. Die zweite Spalte gibt den Anfangsbestand (AB) des Speichers in Wattstunden an. Die dritte Spalte gibt die maximale Einspeiseleistung (OG) in Watt an und die Vierte die maximale Ausspeiseleistung (OG) in Watt an. Die Fünfte dient dazu den Einspeisewirkungsgrad (η) an den Optimierer weiterzugeben. Die letzte Spalte gibt den

Ausspeisewirkungsgrad (η) an H_DSM und G_DSM sind gleich aufgebaut und unterscheiden sich nur im Energieträger. In (4–9) wird deshalb stellvertretend für die beiden Datensätze, der Datensatz H_DSM näher erklärt.

$$Opt_P_DSM = \begin{bmatrix} UG & OG \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

UG beschreibt die minimale einspeisbare Leistungsmenge in einen externen Verbraucher oder die maximale ausspeisbare Menge eines externen Erzeugers. OG beschreibt die maximale einspeisbare Menge in einen externen Verbraucher oder die minimale ausspeisbare Energiemenge eines externen Erzeugers. Ist der eingegebene Wert positiv, so kann Energie aus dem System in einen systemfremden Verbraucher eingespeist werden. Umgekehrt gilt, dass wenn der Wert negativ ist, Energie vom DSM produziert wird und in das System fließt. Je nachdem ob das System einen Wärme- bzw. Gasnetzanschluss besitzt, sind die Grenzen unterschiedlich definiert. Sind beide Energieträger (Wärme und Gas) an das Netz angeschlossen, wird die Optimierung nur durch die minimale und maximale Hybridelementleistung begrenzt. Ist einer oder sind beide Energieträger nicht ans Netz angeschlossen, wird die Optimierung zusätzlich zu den Leistungsgrenzen der HE, durch die Systemkapazitäten der jeweiligen Energieträger ohne Netzanschluss begrenzt. Die Berechnung der Systemgrenzen erfolgt wie in (4–10) und (4–11) gezeigt. Da sich die Grenzen für Wärme und Gas gleich berechnen, wird in folgenden Formeln kein Energieträger im Index angegeben. Die Systemgrenzen lassen sich durch die maximale aufbringbare Leistung, die aus dem System fließen kann (P_{so}) berechnen bzw. durch jene maximale Leistung, die das System (P_{si}) aufnehmen kann.

$$P_{si} = \min\left(P_{ch}, \frac{E_{sm} - E_{ss}}{t \cdot \eta_{ch}}\right) + P_{DSMv} \quad (4-10)$$

$$P_{so} = \min\left(P_{dis}, \frac{E_{ss} \cdot \eta_{dis}}{t}\right) + P_{DSMe} \quad (4-11)$$

Zusätzlich zu den Systemgrenzen müssen die möglichen Zu- und Abflüsse durch die Hybridelemente und die RL des Systems berücksichtigt werden. Aus den genannten Umständen ergeben sich die Optimierungsgrenzen. Optimiert wird bei dem positiven Flexibilitätsband nach der maximalen Residuallast, die sich aus dem Flexibilitätspunkt 4 minus dem Flexibilitätspunkt 3 aus der Abbildung 39 ergibt. Im Gegensatz dazu optimiert der Optimierer beim negativen Flexibilitätsband nach der maximalen Residuallast, die sich aus dem Flexibilitätspunkt 3 minus dem Flexibilitätspunkt 4 ergibt. Das gesamte positive Flexibilitätsband des Optimierers ergibt sich durch das Aufsummieren des positiven

Flexibilitätsbands aus dem ersten und zweitem Teilschritt. Dementsprechend ergibt sich aus den beiden Teilschritten auch die negative Flexibilität.

Eine Ausnahme zur Berechnung der Flexibilität stellen Pumpspeicher dar. Da bei diesen Elementen über den Wasserstand in den Speicherseen bzw. über die Pumpen- und Turbinenleistung die verfügbare Leistung berechnet werden muss. Zur Berechnung der Speichermenge dieser Elemente wurde durch Mitarbeiter des Lehrstuhls für Energieverbundtechnik ein eigenständiger MATLAB Code erstellt. Dieser Code musste in Folge dieser Arbeit integriert werden. Die maximale mögliche Pumpenleistung stellt einen zusätzlichen Anteil des positiven Flexibilitätsbandes dar und die Turbinenleistung einen zusätzlichen Teil des negativen Bandes.

Die Ergebnisse des negativen bzw. des positiven Bereiches werden im darauffolgenden Berechnungsschritt, im HyFlow, als Leistungsgrenzen des Flexibilitätsgenerators gesetzt.

4.3.2 Marktorientierte Optimierung

Die Optimierung kann auf Basis des prognostizierten Energieverbrauchs und Energiepreises Entscheidungen treffen, die durch die Betriebsweisen der im System vorhandenen Hybridelemente, DSM-Prozesse und Speicher, die Gesamtkosten des Energiesystems minimiert. Die im Optimierer für die betrachtete Periode errechneten Ergebnisse werden als Vektoren gespeichert und an das übergeordnete Programm zurückgegeben. Als Basis für die Programmierung dienen die in Kapitel 3.3 diskutierten Ansätze. [15, 16]

Abbildung 40 zeigt den Aufbau des marktorientierten Optimierers. Der schematische Aufbau dieses Optimierers ist derselbe wie jener in Abbildung 39, jedoch unterscheiden sich die beiden Optimierer wesentlich in ihren Funktionen und Fähigkeiten. Auf der linken Seite des Modells, ist das Netz des jeweiligen Energieträgers dargestellt. Es kann entweder Energie vom Netz bezogen oder auch eingespeist werden. Mögliche Energieträger sind Strom, Wärme und Gas. Die jeweilige Farbe gibt an welche Energieart darin transportiert wird (Grün = Strom, Rot = Wärme, Blau = Gas). Die im Modell dargestellten Hybridelemente sind Konverter in welchen Energieträger in andere Energieträger konvertiert werden können. Der Optimierer kann die hybride Elemente PtHG, PtH, HtP, GtH und GtPH erfassen und optimieren.

Die Energieträger können in einem oder mehreren Speichern gespeichert werden oder in DSM Prozessen verbraucht bzw. bereitgestellt werden. Schlussendlich muss immer die Residuallast (rechts in der Abbildung) gedeckt bzw. verbraucht werden. Auch ist es möglich, Energie zu den gegebenen Energiebezugskosten, in das Netz einzuspeisen.

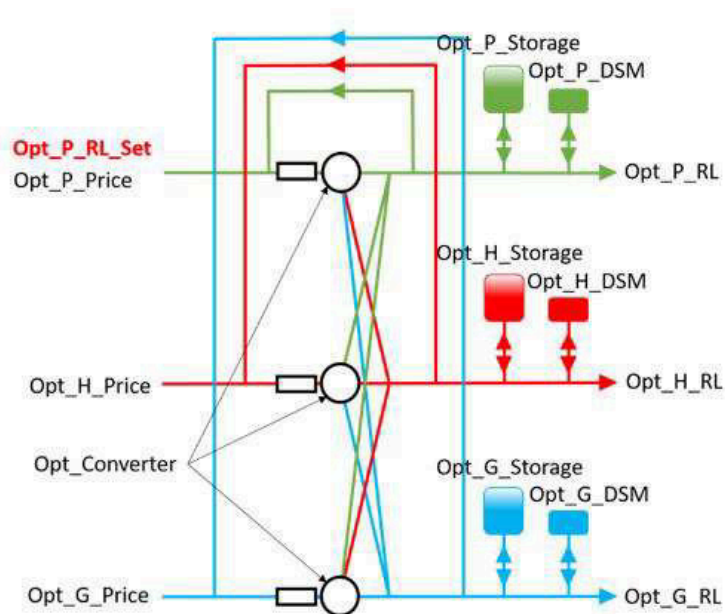


Abbildung 40: Marktorientierter Optimierer – Eingabeparameter

Die Eingabeparameter für die Optimierung sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Marktorientierter Optimierer – Eingabeparameter

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Einheit
timestep	Zeitschritt	Stunde
Opt_P_RL_Set	Vorgegebene Residuallast von HyFlow	
Opt_Converter	Eigenschaften Hybridelemente	
Opt_P_Storage	Eigenschaften Stromspeicher	
Opt_H_Storage	Eigenschaften Wärmespeicher	
Opt_G_Storage	Eigenschaften Gasspeicher	
Opt_P_DSM	Eigenschaften Strom-DSM	
Opt_H_DSM	Eigenschaften Wärme-DSM	
Opt_G_DSM	Eigenschaften Gas-DSM	
Opt_P_Price	Preisentwicklung Strom	Cent/Watt
Opt_H_Price	Preisentwicklung Strom	Cent/Watt
Opt_G_Price	Preisentwicklung Strom	Cent/Watt
Opt_P_RL	Residuallast Strom	Watt
Opt_H_RL	Residuallast Wärme	Watt
Opt_G_RL	Residuallast Gas	Watt
ops	Optimierer Eigenschaften	
GNetConnect	Gasnetzanschluss = 1 Kein Gasnetzanschluss = 0	
HNetConnect	Wärmenetzanschluss = 1 Kein Wärmenetzanschluss = 0	

Diese Parameter müssen vom HyFlow bereitgestellt werden. Dafür wurde der Programmiercode im HyFlow dahingehend modifiziert, dass die Ergebnisse der Matpower Berechnung den Optimiereingabeparametern entsprechen. Abbildung 40 zeigt die Stellen, an denen die Eingabeparameter auf das Modell des Optimierers übergeben werden. Vor jeder Optimierung untersucht HyFlow den USW-Bezirk dahingehend ob und welche Energieträger an das Netz angeschlossen sind. Wenn ein Netzanschluss vorhanden ist, erstellt HyFlow einen Transformator bzw. eine Übergabestation für den jeweiligen Energieträger mit einer unendlich großen Leistungsgrenze. Damit wird sichergestellt, dass mindestens die Menge an Energie vom Netz bezogen werden kann, die für den jeweiligen Optimierungsschritt benötigt wird.

Im folgenden Abschnitt werden die Eingabeparameter näher beschrieben. Der Parameter timestep, gibt die Dauer (t) einer Periode, bis zum nächsten Zeitschritt, in Stunden an. Der rot markierte Parameter Opt_P_RL_Set, in der Abbildung 40, wird dazu benötigt um das Flexibilitätsband in den Optimierer zu integrieren. Abbildung 41 zeigt wie die unterschiedlichen Energieflüsse auf das System des Energieträgers Strom, im marktorientierten Optimierer, einwirken.

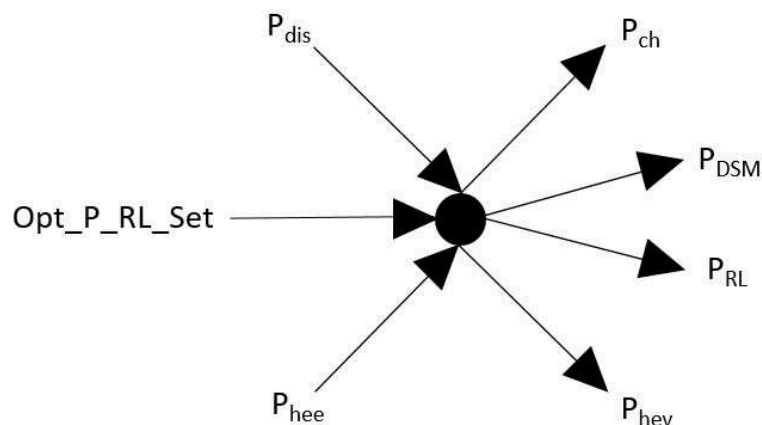


Abbildung 41: Marktorientierter Optimierer – Berechnung Opt_P_RL_Set

Bei der Berechnung des Optimierers werden alle Systemzuflüsse positiv gewertet und alle Abflüsse negativ. Die Energiemenge im System erhöht sich durch die Leistungszuflüsse des Speichers (P_{dis}), der Hybridelemente (P_{hee}) und dem von HyFlow kalkulierte Parameter $Opt_P_RL_Set$. Die vorhandene Energiemenge im System vermindert sich durch die Leistungsabflüsse des Speichers (P_{ch}), dem DSM Prozess (P_{DSM}), der umgewandelten Energie durch die Hybridelemente (P_{hev}) und der Residualast (P_{RL}). Daraus ergibt sich die in (4–12) gezeigte Formel.

$$P_{RL} = P_{hee} \cdot \eta - P_{hev} + P_{dis} - P_{ch} - P_{DSM} + Opt_P_RL_Set \quad (4-12)$$

Opt_P_RL_Set errechnet sich im HyFlow, wie in der Gleichung in (4–13) gezeigt, aus der Leistung des Flexibilitätsgenerators P_{fg} und der Residuallast (P_{RL}).

$$Opt_P_RL_Set = P_{RL} + P_{fg} \quad (4-13)$$

Bei Einsetzung der Gleichung (4–12) in die Gleichung (4–13) ergibt sich die Leistung des Flexibilitätsgenerators. Das Ergebnis in (4–14) entspricht den Elementen, die im Allgemeinen Flexibilität bereitstellen können.

$$P_{fg} = -P_{hee} \cdot \eta + P_{hev} - P_{dis} + P_{ch} + P_{DSM} \quad (4-14)$$

Opt_Converter übergibt die Hyridelemente und deren Eigenschaften an den Optimierer. Jede Zeile in (4–15) steht für ein Hybridelement, daher entspricht die Anzahl der Zeilen die Anzahl der Konverter.

$$Opt_Converter = \begin{bmatrix} 0|1 & 0|1 & 0|1 & 0|1 & 0|\eta & 0|\eta & 0|\eta & UG & OG & R & P_v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

Die Ersten acht Spalten entsprechen denselben Parametern wie in der Formel (4–7), für den Parameter FlexOptHe und sind bereits im Kapitel 4.3.1 näher beschrieben. In der neunten Spalte wird der Rampenparameter (R) in Prozent (von 0 bis 1) bezogen auf die maximal mögliche Konverter Leistung eingetragen. In der letzten, zehnten Spalte wird die Leistung in Watt des jeweiligen Konverters der Vorperiode (P_v) angegeben. Opt_P_Storage, Opt_H_Storage und Opt_G_Storage sind gleich aufgebaut, sie unterscheiden sich nur im speicherbaren Energieträger. In (4–16) wird deshalb stellvertretend für alle drei Datensätze, der Datensatz Opt_P_Storage näher erklärt.

$$Opt_P_Storage = \begin{bmatrix} SV & UG & OG & AB & \eta & UG & OG & \eta & UG & OG \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

Jede Zeile in (4–16) steht für einen Stromspeicher. Die Anzahl der Zeilen gibt also die Anzahl der Speicher an. Die erste Spalte beschreibt den Speicherverlust (SV) des jeweiligen Speichers je Zeitschritt in Prozent pro Stunde. Die Verluste berechnen sich relativ (von 0 bis 1) zum aktuellen Speicherstand. Die zweite Spalte gibt den minimal möglichen Speicherstand (UG) in Wattstunden an. Die dritte gibt die maximale Speichermenge (OG) des Speichers in Wattstunden an. Die Vierte gibt den Anfangsbestand (AB) des Speichers in Wattstunden an. Die fünfte, sechste und siebte Spalte dienen zur Ermittlung des Eingangsflusses des Speichers, wobei die Fünfte den Wirkungsgrad (η) angibt, die Sechste den minimalen Einspeisefluss (UG) in Watt angibt und die Siebte den maximal möglichen Speicherfluss (OG) angibt. Die Spalten acht, neun und zehn sind im Prinzip dieselben wie die vorhergehenden drei Spalten, mit dem Unterschied, dass diese Auskunft über den Ausspeisefluss aus dem Speicher geben. Alle Werte

müssen größer gleich Null sein. Opt_P_DSM , gezeigt in (4–17), Opt_H_DSM und Opt_G_DSM sind gleich aufgebaut. Die Parameter unterscheiden sich nur im Energieträger. Dieser Eingabeparameter ist bereits im Kapitel 4.3.1, in der Formel (4–9) näher beschrieben.

$$Opt_P_DSM = \begin{bmatrix} UG & OG \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

Opt_P_Price , Opt_H_Price und Opt_G_Price sind Vektoren, die für jede Zeitperiode den aktuellen Preis EP für den jeweiligen Energieträger in Cent pro Wattstunde angeben. Da diese alle gleich aufgebaut sind, wird in (4–18) stellvertretend der Vektor Opt_P_Price näher erklärt.

$$Opt_P_Price = \begin{bmatrix} EP \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

Die Anzahl der Zeilen entspricht der Anzahl der Perioden. Opt_P_RL , Opt_H_RL und Opt_G_RL sind Vektoren, die für jede Zeitperiode die Residuallast (P_{RL}) für den jeweiligen Energieträger in Watt angeben. Da diese alle gleich aufgebaut sind, wird stellvertretend in (4–19) der Vektor Opt_P_RL näher erklärt.

$$Opt_P_RL = \begin{bmatrix} P_{RL} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

Die Anzahl der Zeilen entspricht der Anzahl der Perioden (n). Der Parameter ops , welcher in (4–20) gezeigt ist, ist ein spezifischer Parameter, der für die Optimierung vorab die Optimierungsrahmenbedingungen schafft.

$$ops = sdpsettings('solver','gurobi','verbose',0) \quad (4-20)$$

Die ersten zwei Teile in der Klammer legen fest, dass der Optimierer Gurobi™ [59] verwendet werden soll und die letzten beiden stellen sicher, dass kein Text im Command Window von MATLAB® ausgegeben wird. Die Eingabeparameter werden am Beginn der Optimierung in der Matrix M zusammengefasst. Die einzelnen Spalten geben die jeweiligen Eingabeparameter wieder. Der Aufbau der Matrix ist in der Abbildung 58 im Anhang gezeigt. Die Anzahl der Zeilen gibt die Anzahl der veränderbaren Variablen der Optimierung wieder. Diese Variablen können sich im Bereich der Grenzen der übergebenen Eingabeparameter bewegen. Die bei der Optimierung benötigten Parameter werden aus dieser Matrix bezogen.

Um die Eingabe der Gleichungssysteme zu erleichtern wurde die Matlab Erweiterung Yalmip [58] verwendet. Damit wird vor allem das Setzen von Grenzen für die Variablen erleichtert. Für die Optimierung sind neben den Nebenbedingungen (Bereichsfestlegung diverser Variablen), drei Hauptgleichungssystem (Speicher, Residuallast, Preis) nötig. Das programmierte Optimierungssystem umfasst im Idealfall insgesamt drei Variabel-Vektoren,

den x- (Basisvariablen), y- (Speicher Hilfsvariablen) und z-Vektor (Energieverkaufsvariablen). Es wird für jedes UG-OG Paar in den Eingabeparametern eine Variable erstellt. So besitzt ein Hybridelement oder ein DSM-Prozess zum Beispiel immer nur eine Variable (ein UG-OG Paar), welche einen variablen Leistungsfluss ermöglicht. Ein Speicher hingegen besitzt drei Variablen (drei UG-OG Paare), eine für den variablen Speicherstand, eine für den einspeise Leistungsfluss und eine für den ausspeise Leistungsfluss. Diese Variablen sind veränderbar und können dadurch in der Optimierung so verändert werden, dass ein bestimmtes Ziel (z.B. geringe Kosten) erreicht werden kann. Die y-Variablen sind binäre Hilfsvariablen (0 oder 1). Je Speicher gibt es jeweils zwei dieser Variablen. Es gibt insgesamt drei z-Variablen. Diese bestimmen den Leistungsfluss der verkaufbaren Energieträger (Strom, Wärme, Gas). Diese Variablen werden durch die im System vorhandene Energie begrenzt. Je nach Anzahl n der Perioden erhöht sich die Anzahl der Variablen um den Faktor n.

Die unterschiedlichen Gleichungssysteme werden im nachfolgenden Abschnitt mathematisch näher erläutert. Das Hauptgleichungssystem des Speichers dient zur Berechnung des Speicherstandes der nächsten Periode. Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, werden dafür die Variablen vom x-Vektor und vom y-Vektor benötigt. Für die mathematische Darstellung des Systems dient die Gleichung (4–21). Der Speicherstand (E_{ss}^{i+1}) der nächsten Periode (i+1) berechnet sich aus dem Speicherstand (E_{ss}^i) am Beginn der betrachteten Periode (i), der Speicherladeleistung (P_{netz}^{ch}), des Speicherladewirkungsgrades (η_{ch}), der Speicherentladeleistung (P_{netz}^{dis}), des Speichers Entladewirkungsgrades (η_{dis}), der Speicherverluste je Stunde (E_{dis}) und der Zeit t.

$$E_{ss}^{i+1} = E_{ss}^i + \left(P_{netz}^{ch} \cdot \eta_{ch} - \frac{P_{netz}^{dis}}{\eta_{dis}} \right) \cdot t - E_{dis} \quad (4-21)$$

Um sicherzustellen, dass nicht gleichzeitig ein und ausgespeist wird, werden zusätzlich y-Variablen wie in (4–22), (4–23) und (4–24) gezeigt eingebaut.

$$y_1^i(P_{netz}^{ch}) = \begin{cases} 0 & P_{netz}^{ch} = 0 \\ 1 & P_{netz}^{ch} > 0 \end{cases} \quad (4-22)$$

$$y_2^i(P_{netz}^{dis}) = \begin{cases} 0 & P_{netz}^{dis} = 0 \\ 1 & P_{netz}^{dis} > 0 \end{cases} \quad (4-23)$$

$$y_1^i(P_{netz}^{ch}) + y_2^i(P_{netz}^{dis}) \leq 1 \quad (4-24)$$

Abbildung 42 zeigt einen typischen Fall, bei dem Energie eingespeichert wird und die genannten Gleichungen bzw. Bedingungen für die Berechnung genutzt werden, damit nicht gleichzeitig auch ausgespeichert wird.

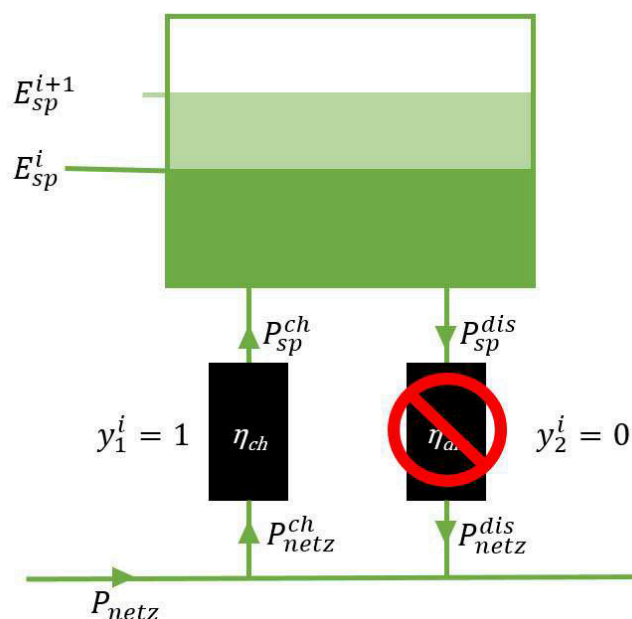


Abbildung 42: Marktorientierter Optimierer – Speicherflüsse

Jeder Energieträger besitzt einen Vektor, dem die benötigten Residuallast je Periode zugeordnet ist. Diese muss in jedem Fall gedeckt werden. Dies wird mit den Variablen im x-Vektor und im z-Vektor sichergestellt. Die Residuallast des Energieträgers ergibt sich aus der umgewandelten Leistung in den entsprechenden Energieträger ($P_{hee} \cdot \eta$), der bezogenen Leistung der HE (P_{hev}), der Ausspeicherleistung (P_{netz}^{dis}), der Speicherleistung (P_{netz}^{ch}), der DSM-Leistung (P_{DSM}) und der verkauften Energiemenge (P_{ϵ}). Die Variablen, die in der Gleichung (4–25) rechts vom Gleichheitszeichen stehen, können flexibel unter den gegebenen Grenzen (UG-OG Paar) verändert werden, sodass der Verbrauch unter der Berücksichtigung der besten Konditionen gedeckt werden kann.

$$P_{RL} = P_{hee} \cdot \eta - P_{netz}^{ch} + P_{netz}^{dis} - P_{DSM} - P_{\epsilon} - P_{hev} \quad (4-25)$$

Die Gesamtenergiekosten sind der entscheidende Faktor bei der Optimierung. Es wird versucht, die Kosten so gering wie möglich zu halten bzw. mögliche Gewinne über mehrere Perioden zu erwirtschaften. Dies ist zum Beispiel durch Einspeicherung von Energie bei geringen Energiepreisen und Ausspeicherung von Energie bei hohen Preisen möglich. Der Optimierer berechnet über die gegebenen Perioden alle möglichen Szenarien und gibt das beste Ergebnis mit den geringsten Gesamtkosten bzw. höchsten Gewinnen aus. Die Kostenberechnung ist in (4–29) dargestellt. Die Kosten berechnen sie über die bezogene Leistung P des jeweiligen Energieträger ET, den verkauften Energiemengen P_{et}^{ϵ} desselben Energieträgers, den Energiepreis (EP_{et}) und der Periodendauer (t).

$$Kosten = \sum_{et=Strom}^{Gas} (P_{et} - P_{et}^{\epsilon}) \cdot EP_{et} \cdot t \quad (4-26)$$

In der Tabelle 10 sind die Ausgabeparameter des Optimierers aufgelistet.

Tabelle 10: Marktorientierter Optimierer – Ausgabeparameter

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Einheit
RL_Energy	Residuallast Energieträger	Watt
RL_Konverter	Residuallast Hybridelemente	Watt
P_RL_Storage	Residuallast Stromspeicher	Watt
H_RL_Storage	Residuallast Wärmespeicher	Watt
G_RL_Storage	Residuallast Gasspeicher	Watt
P_RL_DSM	Residuallast Strom DSM	Watt
H_RL_DSM	Residuallast Wärme DSM	Watt
G_RL_DSM	Residuallast Gas DSM	Watt

Es werden immer nur die Ergebnisse der ersten Periode im HyFlow benötigt. Da in HyFlow jeder Zeitschritt einzeln berechnet wird, ist es nicht nötig, im betrachteten Zeitschritt Ergebnisse darauffolgender Zeitperioden im Optimierer auszugeben. Die Ergebnisse der restlichen Periode dienen dazu, die Ergebnisse der ersten Periode vorausschauender zu gestalten (Speicher aufladen / entladen, etc.). Abbildung 43 zeigt die Stellen an denen die Ausgabeparameter des Optimierers für HyFlow generiert werden. RL_Energy stellt einen Vektor dar, welcher für jeden Energieträger die Residuallast (P_s^{RL} , P_w^{RL} , P_g^{RL}) ausgibt. Der Vektor ist in (4-27) gezeigt.

$$RL_Energy = \begin{bmatrix} P_s^{RL} \\ P_w^{RL} \\ P_g^{RL} \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

Die Residuallast für den Strom (P_s^{RL}), die Wärme (P_w^{RL}) und das Gas (P_g^{RL}) berechnet sich, wie in (4-28) gezeigt, aus der Differenz des vom Optimierer bezogenen Stroms (P_s) und aus der verkauften Energiemenge (P_s^{ϵ}) desselben Energieträgers.

$$P_s^{RL} = P_s - P_s^{\epsilon} \quad (4-28)$$

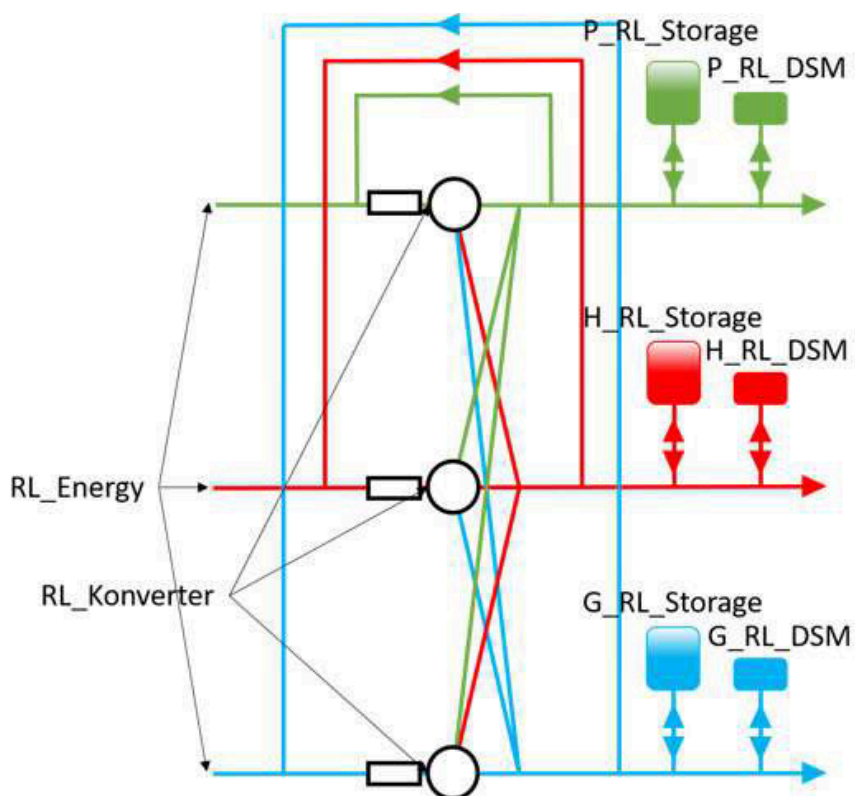


Abbildung 43: Marktorientierter Optimierer – Ausgabeparameter

RL_Konverter ist in (4–29) dargestellt. Dieser Ausgabeparameter ist ein Vektor, der den Leistungsbezug jedes Hybridelements (P_{hev}) beinhaltet und diesen in derselben Reihenfolge im Vektor zurückgibt, an der das Element bei der Eingabe im Eingabeparameter positioniert war.

$$RL_{Konverter} = \begin{bmatrix} P_{hev} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4-29)$$

Das heißt es wird jene Leistung übergeben, die der jeweilige Konverter benötigt. Diese Leistung wird an dem in der Abbildung 44 gezeigten Punkt abgerufen.

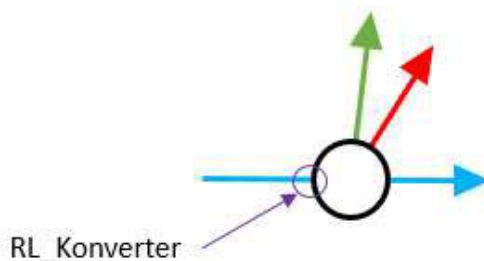


Abbildung 44: Marktorientierter Optimierer – Hybridelement Bezugsleistung

P_RL_Storage, H_RL_Storage und G_RL_Storage sind gleich aufgebaut. Diese Parameter unterscheiden sich nur im Energieträger. In (4–30) wird deshalb stellvertretend für alle drei Datensätze der Datensatz P_RL_Storage näher erklärt.

$$P_{RL_Storage} = \begin{bmatrix} P_{netz}^{RL} & P_{sp}^{RL} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

Dieser Vektor übergibt sowohl die netzseitige Residuallast (Spalte 1) als auch die speicherseitige Residuallast (Spalte 2). Jede Zeile steht für einen Speicher. Diese beiden Fälle sind in Abbildung 45 dargestellt.

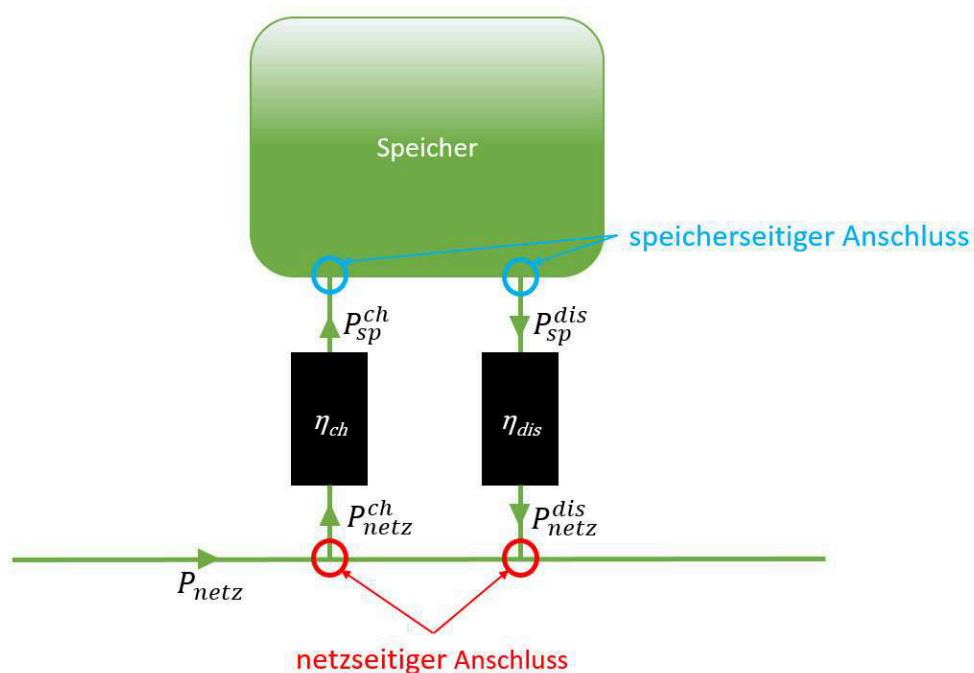


Abbildung 45: Marktorientierter Optimierer – Speicheranschlüsse

Die netzseitige Residuallast (P_{netz}^{RL}) ergibt sich, wie in (4–31) dargestellt aus der Subtraktion der netzseitigen Einspeiseleistung (P_{netz}^{ch}) und der netzseitigen Auspeiseleistung (P_{netz}^{dis}).

$$P_{netz}^{RL} = P_{netz}^{ch} - P_{netz}^{dis} \quad (4-31)$$

Die speicherseitige Residuallast ergibt sich gleich wie die netzseitige Residuallast mit der Ausnahme, dass dafür die Parameter des speicherseitigen Anschlusses genutzt werden. P_{RL_DSM} , H_{RL_DSM} und G_{RL_DSM} sind gleich aufgebaut, sie unterscheiden sich nur im Energieträger. In (4–32) wird deshalb stellvertretend für alle drei Datensätze der Datensatz P_{RL_DSM} näher erklärt.

$$P_{RL_DSM} = \begin{bmatrix} P_{DSM}^{RL} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4-32)$$

Die Anzahl der Zeilen spiegelt die Anzahl der DSM-Prozesse des jeweiligen Energieträgers wider. P_{RL_DSM} beschreibt die Residuallast des jeweiligen DSM Prozesses, diese Variable kann sowohl positiv (es wird in den DSM Prozess eingespeist) als auch negativ (es wird aus dem DSM Prozess ausgespeist) sein.

Nach der Übergabe der Ausgabeparameter an das HyFlow erfolgt die LFR von Gas und Wärme. Um Strompreisvorhersagen zu erhalten, wurde am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik, basieren auf der Masterarbeit „Realisierung einer Kurzfristigen-Prognose des Intraday-Markts mittels verschiedener Machine-Learning-Techniken“ [60, 61], eine Preisvorhersage erstellt. Diese kann auf Basis von den Energiepreisen von 2009 bis 2020 den Strompreis für die nächsten 48 Zeitschritte prognostiziert.

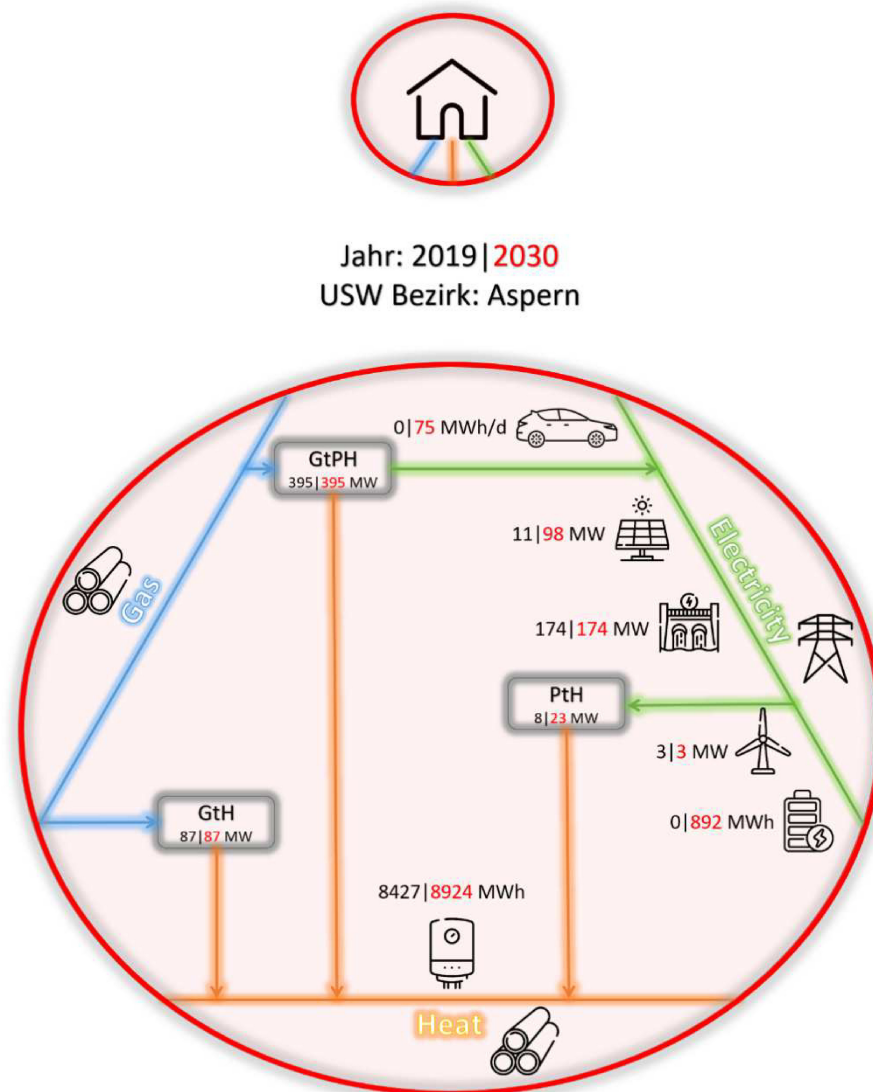
5 SZENARIEN

Nach der Datenaufbereitung, der Integration der neuen Codeelemente und Beseitigung aller angefallener Fehler im Code wurde versucht die Simulation in HyFlow, anhand der Energiedaten von Österreich durchzuführen. Dabei stellte sich heraus, dass der derzeitige Code eine hohe Laufzeit bzw. Rechenleistung benötigt. Die beiden skalierenden Elemente sind im Bereich der neu integrierten Optimierer. Bei der Berechnung der Zeiterhöhung je Zeitschritt auf 35040 Zeitschritte, ergibt sich eine Rechenzeiterhöhung, die im Bereich von 10 Tagen liegt. Da jeder Zeitschritt aber nicht nur aus der Rechenzeiterhöhung besteht, sondern auch aus der Grundrechenzeit, würde sich eine gesamte Rechenzeit zur Simulation eines Jahres von mehreren Wochen oder Monaten ergeben. Resultierend aus dieser Erkenntnis ist der Entschluss gekommen, dass die Simulation mit dem derzeitigen Code bzw. mit dem am Lehrstuhl für Energieverbundtechnik vorhandenen EDV Equipment nicht möglich ist. Um die Fähigkeiten des neu integrierten Optimierers und mögliche zukünftige Szenarien des erneuerbaren Ausbaus zu präsentieren, werden im folgenden Teil zwei charakteristische USW-Bezirke, anhand des derzeitigen Standes und anhand mögliche zukünftiger Ausbauschritte gezeigt und optimiert.

5.1 Optimierung USW-Bezirk: Aspern

Für die folgende Optimierung wurde der USW-Bezirk 1040 (Aspern), welcher im Wiener Becken liegt, aufbereitet. Der Aufbau des USW-Bezirks ist für das Jahr 2019 und 2030 in der Abbildung 46 gezeigt. In Schwarz sind die Leistungen des Jahres 2019 gezeigt und in Rot sind die jeweiligen Leistungen für das Jahr 2030 abgebildet. Der USW-Bezirk weist einen Netzanschluss für alle drei Energieträger und drei unterschiedliche Hybridelemente auf. Das GtPH Element entspricht einem typischen GuD Kraftwerk. Es wird davon ausgegangen, dass dieses bis 2030 nicht ausgebaut wird und somit eine Leistungsobergrenze von 395 MW hat. Da laut Erneuerbaren-Energie-Ausbaugesetz [4] in Zukunft weniger fossile Energie genutzt werden soll, wird für diesen USW-Bezirk angenommen, dass die für die Wärmeerzeugung benötigte Energiemenge nicht mehr aus Heizöl oder Kohle kommen wird. Um die erzeugte Energiemenge aus diesen Rohstoffen zu ersetzen, wurde angenommen, dass der Ausbau von Fernwärmenetzen und PtH Elementen vorangetrieben wird. Aus diesem Grund wurde auf Basis der in den letzten Jahren installierten Wärmepumpen (siehe Kapitel 3.2) eine Leistungsobergrenze der PtH Elemente auf 23 MW, für das Jahr 2030 errechnet. Die Erhöhung der Energieerzeugung aus PV, Wasserkraft und Wind wurde mit den Ausbauzielen laut EAG [4] ermittelt. Die Ausbauobergrenze wurde mithilfe der im Kapitel 4.2.1 erwähnten Arbeit [13], worin die möglichen Energiepotentiale der unterschiedlichen Erzeugungsarten den jeweiligen Gemeinden zugeordnet sind, festgelegt. Ebenfalls wurde die Integration von Stromspeicher mit einer Energiemenge von durchschnittlich 10 kWh pro Haushalt

angenommen. Die Anzahl der Haushalte für das Jahr 2030 wurde mithilfe von Statistik Austria [62] ermittelt. Die bereits installierten Wärmespeicher wurden aufgrund eines prognostizierten Zuwachs an Hausalten bis zum Jahr 2030 von 8247 MWh auf 8942 MWh angehoben.



designed by Smashicons from Flaticon

Abbildung 46: Szenario 1 – USW-Bezirk Aspern 2019|2030

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf die Energieerzeugung wird in Zukunft die Elektromobilität sein. Um den zusätzlichen Verbrauch an Strom zu ermitteln, wurde anhand der prognostizierten Anzahl der zugelassenen Elektroautos im Jahr 2030 [63] der Tagesverbrauch ermittelt. Dazu wurde die durchschnittlich zurückgelegte Strecke pro Auto [64] auf einen Tag heruntergebrochen und auf den durchschnittlichen Energieverbrauch eines E-Auto pro Tag umgerechnet. Das ergibt einen Energieverbrauch für ein Auto von 7 kWh pro Tag. Da der Optimierer wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben vorausschauend arbeitet, wurde ein

Sommertag (01.08.2019) mit einer hohen Sonnenleistung als Referenztag gewählt. Es wurden die Leistungen für den Zeitpunkt um 12:00 Uhr ermittelt. Der Optimierer berechnete, basierend auf den nachfolgenden 47 Zeitschritten, wobei ein Zeitschritt 15 Minuten andauert, den wirtschaftlichsten Einsatz der im USW-Bezirk vorhandenen Elemente. Dazu wurden die ermittelten Lastprofile für die unterschiedlichen Erzeuger- und Verbrauchertypen aus dem Kapitel 4.2 herangezogen und ein Summenlastgang, mithilfe der jeweiligen maximalen Leistungen, erstellt. Die zeitlichen aufgelösten Verbräuche zum Laden der E-Autos wurde mithilfe von Quell- und Zielverkehranalysen [65] ermittelt. Da der Energieverbrauch bei ähnlichen Szenariobetrachtungen [66] als gleichbleibend angesetzt wurde, wurde der Verbrauch mit der Ausnahme der hinzugefügten E-Autos wie im Jahr 2019 belassen. Für den Strompreis wurde eine Preisentwicklung [67] die leichte Schwankungen enthält, um die Reaktionen des Optimierers auf unterschiedliche Energiepreise darzustellen, verwendet. Der Wärme- und Gaspreis wurde zu jeweils 50 €/MW [68] und 40 €/MW [69] als konstant angenommen. Tabelle 11 zeigt den Energiepreis pro Zeitschritt, für die nächsten zwölf Zeitschritte. Für die Optimierung im Jahr 2019 und 2030 wurde für eine gute Vergleichbarkeit, dieselben Energiepreise verwendet.

Tabelle 11: Szenario 1 – Preisentwicklung [67–69]

Zeitschritt [15 min Intervall]	Strompreis [€/MW]	Wärmepreis [€/MW]	Gaspreis [€/MW]
1	80,00	50,00	40,00
2	50,00	50,00	40,00
3	35,55	50,00	40,00
4	51,65	50,00	40,00
5	73,42	50,00	40,00
6	64,00	50,00	40,00
7	50,00	50,00	40,00
8	34,57	50,00	40,00
9	58,45	50,00	40,00
10	65,14	50,00	40,00
11	46,00	50,00	40,00
12	46,00	50,00	40,00

In Tabelle 12 sind die Eigenschaften der eingesetzten Flexibilitätsoptionen für das Jahr 2019 aufgelistet. In der ersten Spalte steht die Bezeichnung des jeweiligen Hybridelements. Die zweite Spalte gibt den Wirkungsgrad (η) bzw. die Leistungszahl (bei Wärmepumpen) in

Prozent wieder. Spalte Drei und Vier geben je die Leistungsobere (OG) und Untergrenze (UG) in Megawatt an. In der letzten Spalte steht der sogenannte Rampenparameter in Prozent, welcher angibt wie sehr sich der Leistungswert von dem in der Vorperiode maximal unterscheiden darf. Der Transformator, die Wärme- und Gasübergabestation dienen als Netzanbindungselemente und deren mögliche maximalen Leistungen werden als unendlich angenommen.

Tabelle 12: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Aspern 2019

Hybridelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Rampe [%]
Transformator	100	0	∞	100
Wärmeübergabestation	100	0	∞	100
Gasübergabestation	100	0	∞	100
GtPH	Strom: 55 Wärme: 35	0	395,00	100
GtH	99	0	87,35	100
PtH	300	0	8,00	100

Da der Optimierer ein Teil von HyFlow ist und die maximale mögliche Flexibilität normalerweise vorab darin bestimmt wird, muss zusätzlich zu den bereits erwähnten Parametern, auch ein weiterer Parameter, Opt_P_RL_Set (siehe 4.3.2, Gleichung (4–13)) gesetzt werden. Mit Hilfe dieses Parameters lässt sich das Flexibilitätsband berechnen. Für diesen USW-Bezirk wird sowohl für das Jahr 2019 als auch 2030 ein Wert von -60 MW gewählt. Das negative Vorzeichen gibt an, dass Energie erzeugt wird. Abhängig von der jeweiligen USW-Bezirk Residuallast ergibt sich ein unterschiedlicher Flexibilitätsbereich für den ersten Zeitschritt.

Tabelle 13 zeigt die Werte der installierten Speicher. Der Ein- und Ausspeicherwirkungsgrad (η), sowie die Unter- (UG) und Obergrenze (OG) der Ein- und Ausspeicherleistung wurden jeweils mit demselben Wert angenommen. Die maximal mögliche Speichermenge (Kapazität) ist in MWh angegeben. Da der erste Schritt für 12:00 kalkuliert wurde, wurde der Anfangsbestand des Speichers (AB) vor der ersten Periode mit 50 % angenommen. Die Speicherselbstentladung (SE) ist in Prozent angegeben und gibt an, ob und wie sehr sich der Speicher kalendarisch selbst entladet. Die Verluste berechnen sich relativ zum aktuellen Speicherstand. Bei einem Wert von 0% entladet sich der Speicher nicht von selbst

Tabelle 13: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Aspern 2019

Speicherelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Kapazität [MW]	AB [MWh]	SE [%]
Wärmespeicher	99	0	842,66	8426,60	4213,30	0

Tabelle 14 zeigt die Residuallast der ersten 12 Zeitperioden für den jeweiligen Energieträger. Das Flexibilitätsband berechnet sich wie in Kapitel 4.3.2, in der Formel (4–13), gezeigt. Für das Jahr 2019 ergibt sich daraus ein mögliches Flexibilitätsband von 3,76 MW. Das heißt die Flexibilitätsoptionen müssen im USW-Bezirk diesen Residuallastwert annehmen.

Tabelle 14: Szenario 1 – Optimierer Residuallast: Aspern 2019

Zeitschritt [15 min Intervall]	Strom RL [MW]	Wärme RL [MW]	Gas RL [MW]
1	-63,76	28,70	16,03
2	-65,74	28,70	16,04
3	-67,18	28,70	16,03
4	-68,12	28,70	16,03
5	-67,71	28,70	16,01
6	-68,01	28,70	15,99
7	-68,15	28,70	15,97
8	-68,23	28,70	15,94
9	-66,89	28,90	15,91
10	-67,07	28,90	15,87
11	-67,44	28,90	15,83
12	-67,86	28,90	15,79

Abbildung 47 zeigt die für das Jahr 2019, im USW-Bezirk Aspern, kalkulierten Leistungsflüsse der einzelnen Elemente des Optimierers und die Preisentwicklung der jeweiligen Energieträger. Auf der linken y-Achse ist die Leistung in MW angegeben. Die rechte y-Achse gibt den Energiepreis in €/MW an. Auf der x-Achse sind die nächsten zwölf Zeitschritte abgebildet. Der Optimierer berechnet den ersten Zeitschritt unter der Berücksichtigung der nachfolgenden Zeitschritte. In der dritten Zeitperiode, in welcher der Strompreis geringer als der Energiepreis von Wärme und Gas ist, wird das GtPH Element nicht genutzt, da die Nutzung zu erhöhten Kosten im Vergleich zum optimalen Zustand führen würde. In den Zeitschritten in denen der Strompreis, unter der Berücksichtigung des Wirkungsgrades, höher als jener der anderen Energieträger ist, wird das GtPH Hybridelement bis an seine Leistungsgrenzen

genutzt. Das hat den Zweck, um einerseits mögliche Verbräuche anderer Energieträger möglichst günstig zu decken, aber auch den erzeugten Energieträger in das Netz zu besseren Konditionen einzuspeisen. Aufgrund des hohen Leistungsfaktors (~3) von Wärmepumpen (PtH) werden diese auch bei hohen Strompreisen eingesetzt. Der Strompreis müsste drei Mal so hoch sein wie der Wärmepreis, um die Wärmeproduktion des Elementes einzustellen. Das GtH Element wird ebenfalls über alle Perioden mit voller Leistung eingesetzt. Da der Wärmepreis konstant über dem Gaspreis liegt und es dadurch immer günstiger ist den Wärmeverbrauch mit diesem Hybridelement zu decken. Jene Wärmemenge, die nicht zur Deckung des Wärmeverbrauchs benötigt wird, wird ins Wärmenetz eingespeist (verkauft).

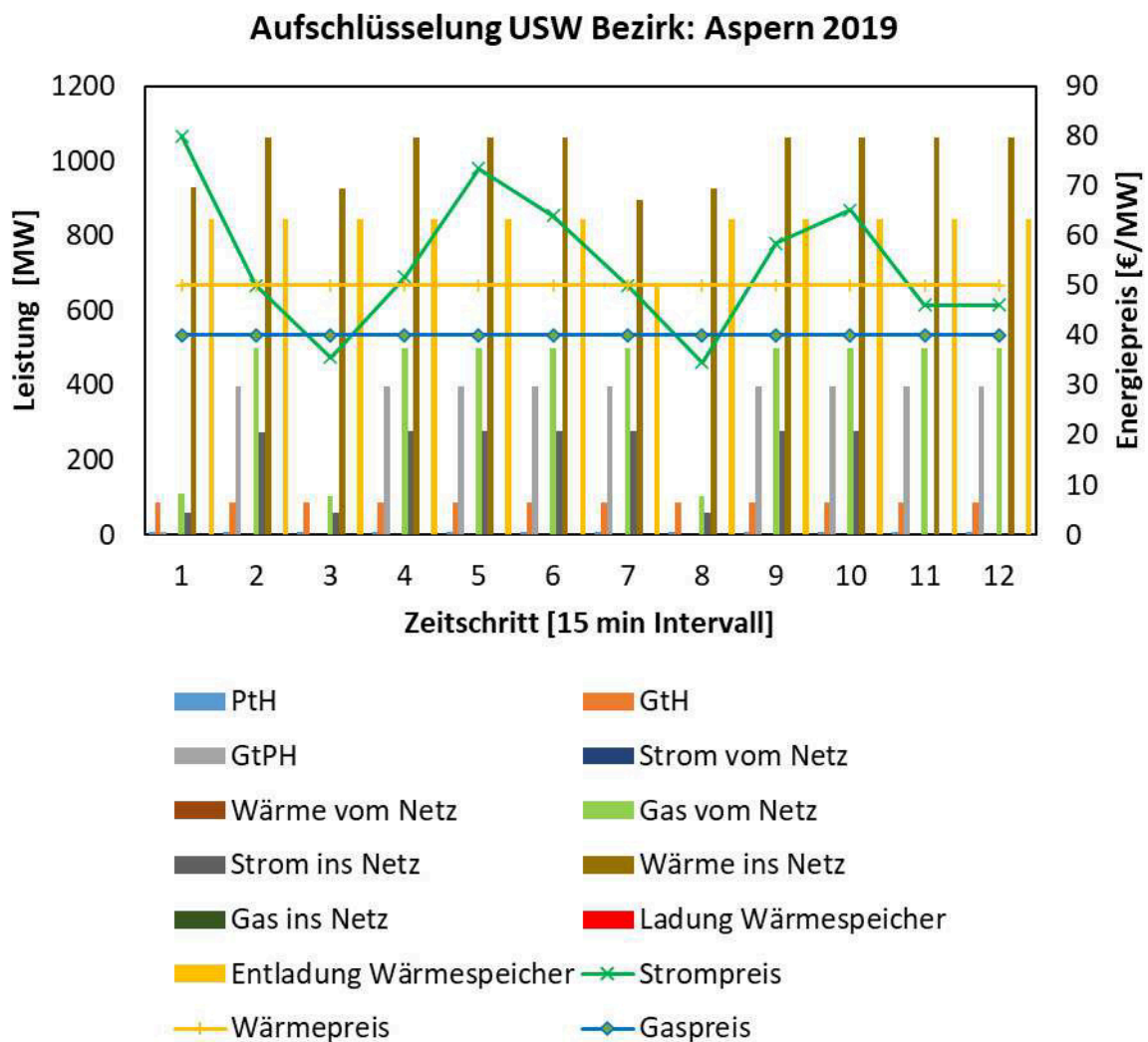


Abbildung 47: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse: Aspern 2019

Der Wärmespeicher wird über alle betrachteten Perioden hinweg entladen. Die Gründe dafür sind, dass der Wärmepreis konstant ist, kein Hybridelement im USW-Bezirk installiert ist welche Wärme in einen anderen Energieträger umwandeln kann und die Hybridelemente im USW-Bezirk, auf Basis der Energiepreise, immer gewinnbringend, andere Energieträger in

Wärme umwandeln können. Daraus resultiert, dass das Ziel des Optimierers in diesem Fallbeispiel ist, den Wärmespeicher bis zum Ende der 48 Zeitschritte ganz zu entladen.

Für das Jahr 2030 wurden dieselebe Energiepreise wie für das Jahr 2019 angenommen. Diese können aus Tabelle 11 entnommen werden. Es wurden weitere Flexibilitätsoptionen im Vergleich zum Jahr 2019 hinzugefügt und neue Leistungsgrenzen integriert. Die neuen Leistungsgrenzen können der Tabelle 15 bzw. der Abbildung 46 entnommen werden. Der Ausbau an PtH Elementen ist aufgrund dessen hoher Leistungszahl angestrebt [4]. Es wird von einem jährlichen Ausbau von 6,0 % p.a [3] ausgegangen.

Tabelle 15: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Aspern 2030

Hybridelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Rampe [%]
Transformator	100	0	∞	100
Wärmeübergabestation	100	0	∞	100
Gasübergabestation	100	0	∞	100
GtPH	Storm: 55 Wärme: 35	0	395,00	100
GtH	99	0	103,69	100
PtH	300	0	22,82	100

Tabelle 16 zeigt die Werte des neu integrierten Stromspeichers als zusätzliches Flexibilitätsoption, sowie die erweiterte Kapazität der im USW-Bezirk installierten Wärmespeicher. Da der erste Schritt für 24:00 Uhr kalkuliert wurde, wurde der Anfangsbestand des Wärmespeichers (AB) vor der ersten Periode, mit 50 % angenommen. Der Stromspeicher wurde mit einem Anfangsbestand von 75 % angenommen.

Tabelle 16: Szenario 1 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Aspern 2030

Speicherelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Kapazität [MW]	AB [MWh]	SE [%]
Stromspeicher	97	0	267,71	892,00	669,00	0
Wärmespeicher	99	0	842,66	8923,70	4461,85	0

Aufgrund des zusätzlichen Energieverbrauchs durch vermehrte Nutzung von E-Autos und des Ausbaus von erneuerbarer Energie ergibt sich eine neue Stromresiduallast für den USW-Bezirk für das Jahr 2030. Der neue Summenlastgang ist in Tabelle 17 gezeigt. Da der Parameter zur Berechnung des Flexibilitätsbandes weiterhin mit -60 MW (negatives Vorzeichen = Erzeugung)

gewählt wurde, ergibt sich in Summe eine Residuallast für alle im USW-Bezirk vorhandenen Flexibilitätsoptionen von 54,31 MW.

Tabelle 17: Szenario 1 – Optimierer Residuallast: Aspern 2030

Zeitschritt [15 min Intervall]	Strom RL [MW]	Wärme RL [MW]	Gas RL [MW]
1	-114,31	28,72	16,03
2	-116,29	28,72	16,04
3	-117,73	28,72	16,03
4	-118,67	28,72	16,03
5	-110,56	28,71	16,01
6	-110,87	28,71	15,99
7	-111,01	28,71	15,97
8	-111,09	28,71	15,94
9	-100,20	28,87	15,91
10	-100,38	28,87	15,87
11	-100,75	28,87	15,83
12	-101,17	28,87	15,79

Abbildung 48 zeigt die für das Jahr 2030 kalkulierten Leistungsflüsse der einzelnen Elemente des Optimierers im USW-Bezirk Aspern und die Preisentwicklung der jeweiligen Energieträger für dieselben Zeitschritte. Die Darstellung des Diagramms ist dieselbe wie in Abbildung 47. Die einzelnen Elemente verhalten sich denen vom Jahr 2019 ähnlich. So werden die Hybridelemente GtH und PtH gleich wie im Jahr 2019 immer auf Vollast betrieben. Fällt der Strompreis unter den Gaspreis, wird das GtPH Element ebenso wie in 2019, abgeregelt. Auch entladet sich der Wärmespeicher über alle betrachteten Perioden. Aufgrund der zusätzlichen Flexibilität durch den Stromspeicher wird bei geringen Strompreisen (z.B. Zeitschritt 3 und 8) mehr Strom vom Netz bezogen, um den Speicher zu laden. Das ermöglicht das anschließende Entladen des Speichers bei höheren Strompreisen. Dadurch kann derselbe Strom zu einem höheren Preis gewinnbringend verkauft oder zum Betrieb von PtH Elemente genutzt werden, um die Energieträgerkosten möglichst gering zu halten. Durch die Erhöhung der Leistungsgrenzen der jeweiligen Hybridelemente und die Integration der Stromspeicher kann die Optimierung durch den marktorientierten Einsatz der Elemente einen Gewinn erwirtschaften. Dieses Beispiel zeigt, dass sich aufgrund des Einsatzes von Hybrid- und Speicherelementen in einem marktorientierten optimierten Energiesystem wirtschaftlich rentable Ergebnisse erzielen lassen.

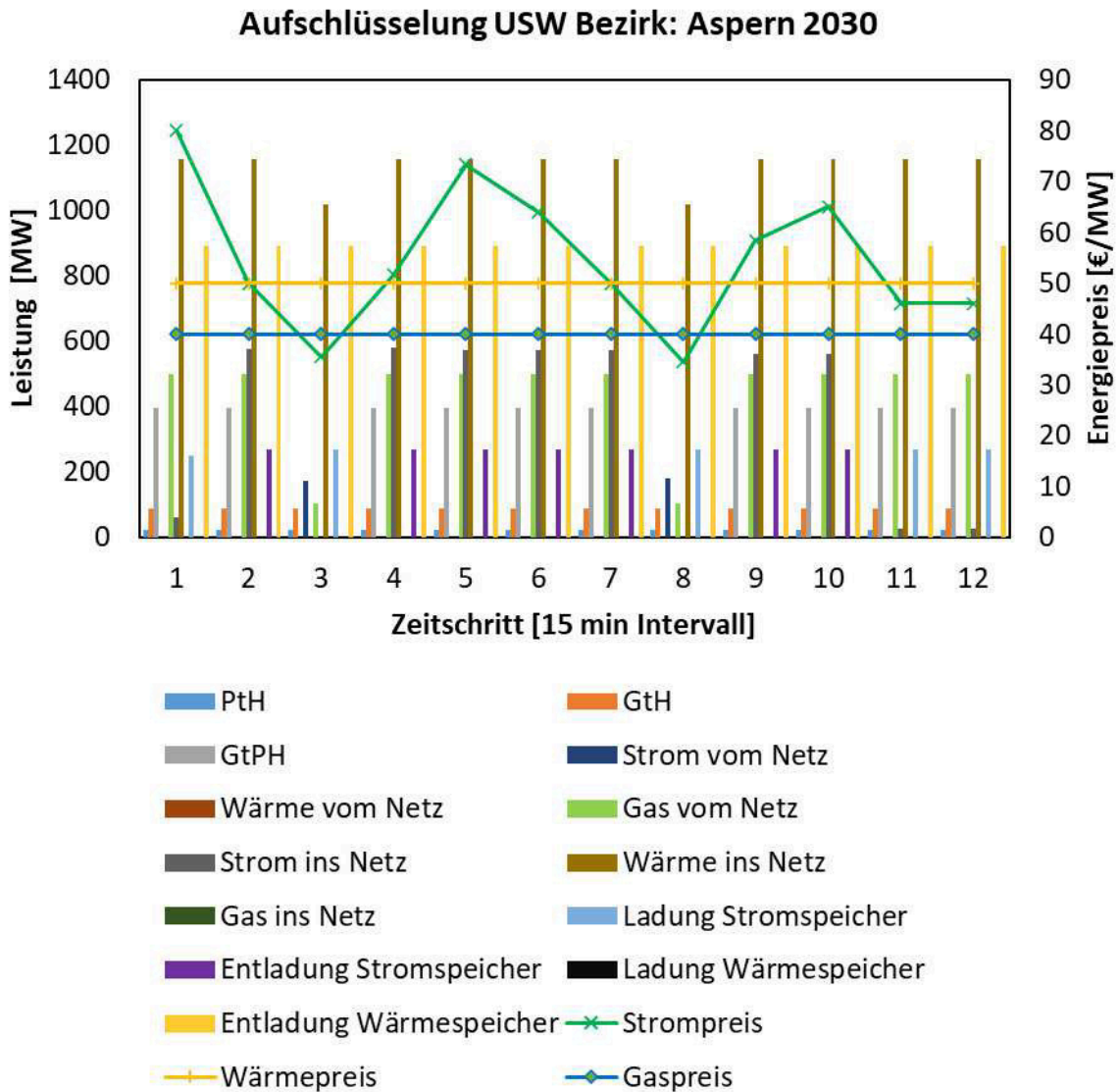


Abbildung 48: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse: Aspern 2030

Abbildung 49 zeigt eine Gegenüberstellung der Optimierungsergebnisse für die ersten vier Zeitschritte aus dem Jahr 2019 und 2030, bezogen auf den Energieträger Strom. Jene Säulen die mit „E“ betitelt sind geben jene Element wieder, die den im Diagramm angegebenen Energieträger erzeugen. Jene mit „V“ in der Beschriftung geben die Systemkomponenten wieder, die im Diagramm betitelte Energieform verbrauchen. Da das Flexibilitätsband im Jahr 2030 größer als im Jahr 2019 ist, ist auch eine dementsprechende Abweichung zum Jahr 2019 zu erkennen. Ein wesentlichster Unterschied zwischen den beiden Jahren ist der Stromspeicher. Durch dieses Element wird das Energiesystem im Stromsektor flexibler und kann hohe und niedrige Energiepreise besser nutzen. Die Nutzung des Speichers ermöglicht im Jahr 2030 verstärkt Strom bei niedrigen Preisen zu nutzen (TS1 und TS3) und bei hohen Preisen ins Netz einzuspeisen (TS2 und TS4).

Gegenübersetzung Strom 2019 | 2030: Verbrauch (V) & Erzeugung (E)

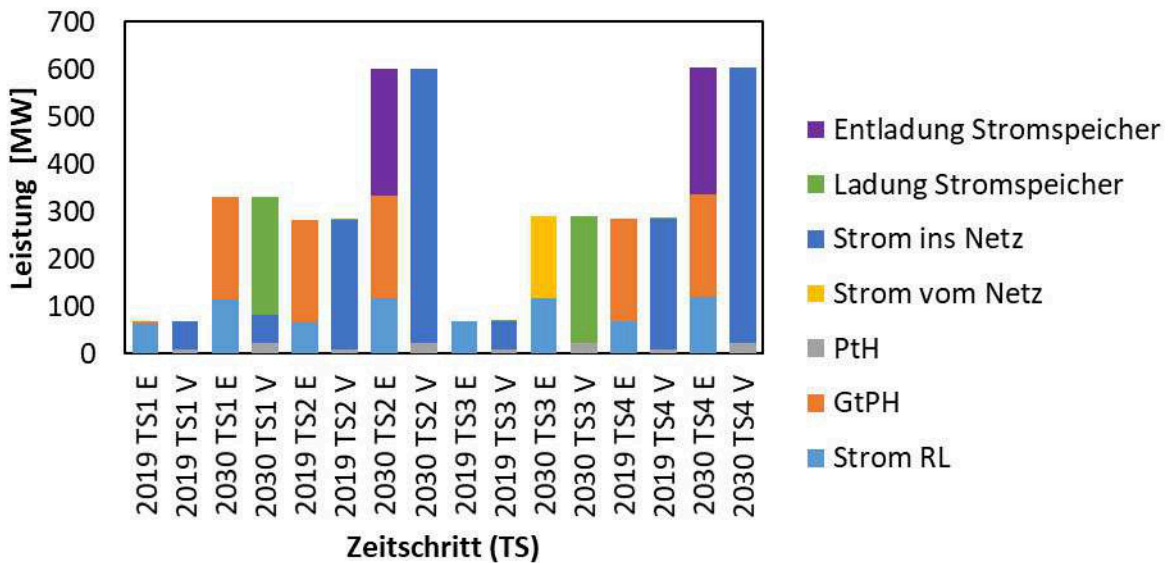


Abbildung 49: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse (Strom): Aspern 2019 | 2030

Bei Betrachtung der Abbildung 50 lässt sich ein wesentlicher Unterschied zwischen den Jahren 2019 und 2030, bei dem Energieträger Wärme, erkennen. Aufgrund der Erhöhung der Leistungsgrenzen der jeweiligen Hybridelemente, wird bei den gegebenen Energieträgerpreisen vermindert Wärme aus dem Netz gezogen. Der Grund dafür ist, dass der Wärmepreis in jeden der betrachteten Zeitschritte teurer ist als der Gaspreis, daher versucht der Optimierer den Wärmebezug aus den Wärmenetz so gering wie möglich zu halten. Der geringe Anteil an Wärme aus dem GtPH Element, im ersten Zeitschritt des Jahres 2019 resultiert daraus, dass im Stromsektor das Flexibilitätsband eingehalten werden muss. Da sich für das Jahr 2030 ein größeres Flexibilitätsband ergibt, ist es in diesem Jahr möglich, auch die größeren maximalen Leistungsgrenzen der Hybridelemente im ersten Zeitschritt auszunutzen und dadurch den Bezug von teurerer Energie aus dem Wärmenetz zu verhindern. Auch ist es möglich genügend Wärme zu erzeugen, dass diese gewinnbringend in das Netz eingespeist werden kann.

Gegenübersetzung Wärme 2019 | 2030: Verbrauch (V) & Erzeugung (E)

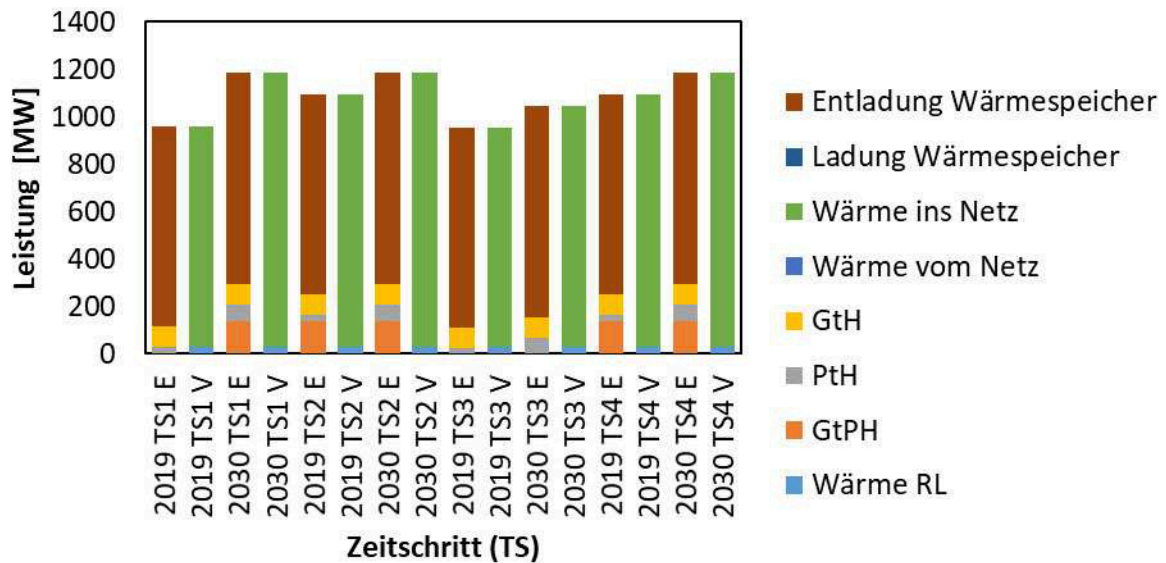


Abbildung 50: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse (Wärme): Aspern 2019 | 2030

In Abbildung 51 ist die Gaserzeugung und der Gasverbrauch der Jahre 2019 und 2030 gegenübergestellt. Da in diesem USW-Bezirk keine Hybridelemente existieren, die Gas erzeugen und die Gasresiduallast reine Verbräuche für die betrachteten Zeitschritte darstellen wird in keinen der gezeigten Zeitschritte Gas in das Gasnetz eingespeist.

Gegenübersetzung Gas 2019 | 2030: Verbrauch (V) & Erzeugung (E)

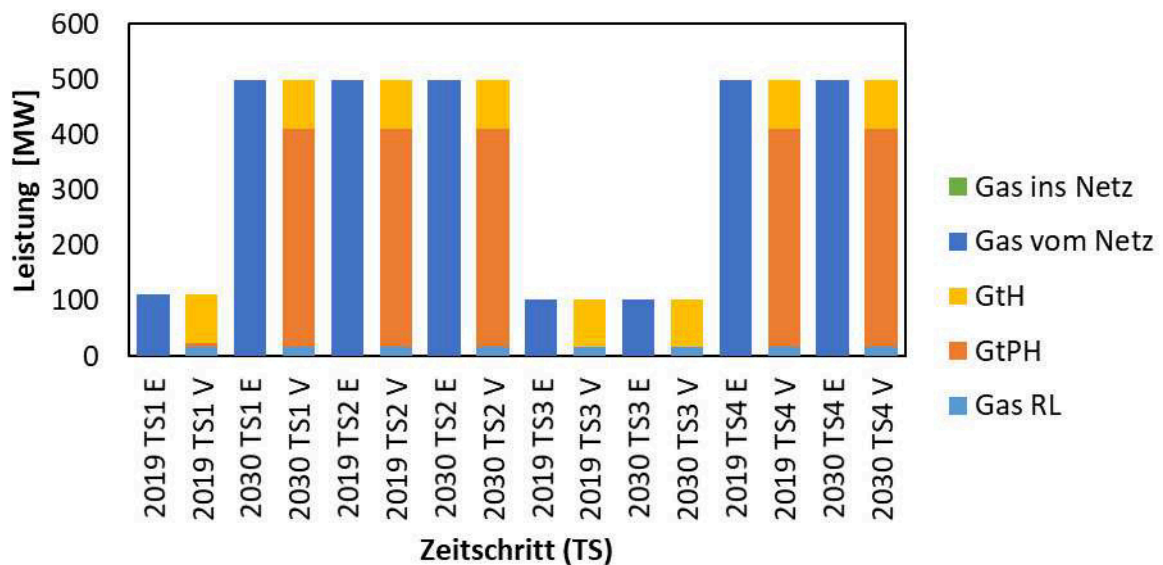
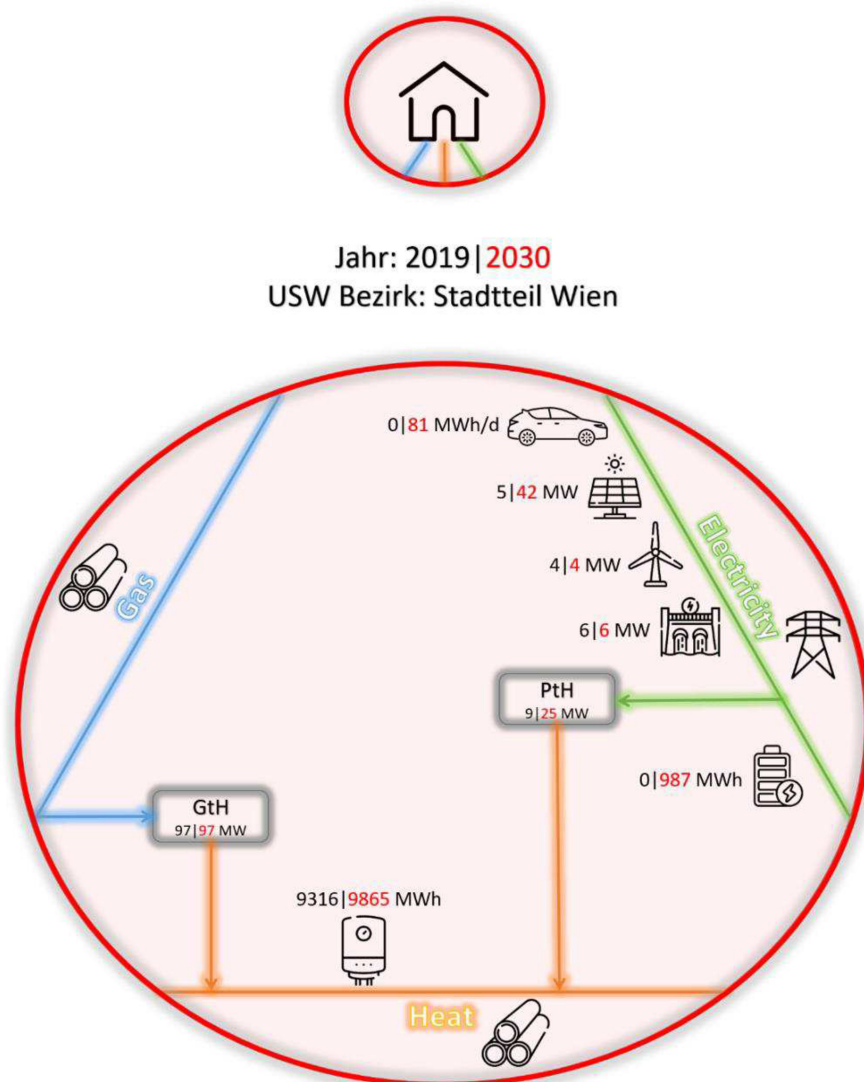


Abbildung 51: Szenario 1 – Optimierer Ergebnisse (Gas): Aspern 2019 | 2030

Wie bereits in den vorhergehenden Energiesektoren diskutiert ist, wird das Hybridelement GtPH bei Gaspreisen die höher sind als der Strompreis nicht genutzt. Dieses Verhalten ist im Zeitschritt drei noch einmal deutlich zu erkennen. Da der Gaspreis in den betrachteten Zeitschritten und Szenarien überwiegend der günstigste ist, ist der genutzte Anteil sowohl im Jahr 2019 als auch im Jahr 2030, gemessen an der Energiemenge und verglichen mit den anderen Energieträgern, die am Meist umgewandelte Energieform.

5.2 Optimierung USW-Bezirk: Stadtteil Wien

Für die folgende Optimierung wurde der USW-Bezirk 1012, ein Stadtteil von Wien, aufbereitet. Der Aufbau des USW-Bezirks ist für das Jahr 2019 und 2030 in Abbildung 52 der gezeigt.



designed by Smashicons from Flaticon

Abbildung 52: Szenario 2 – USW-Bezirk Stadtteil Wien 2019 | 2030

In Schwarz sind die Leistungen des Jahres 1019 gezeigt und in Rot sind die jeweiligen Leistungen für das Jahr 2030 abgebildet. Der USW-Bezirk weist einen Netzanschluss für alle drei Energieträger und zwei unterschiedliche Hybridelemente auf. Um die Entwicklungen der Leistungen der jeweiligen Elemente des USW-Bezirk zu bestimmen, wurden die gleichen Schritte getroffen, wie im Kapitel 5.1 vorgegeben. In diesem Szenario wurde eine Simulation für einen Zeitraum mit hohem Wärmeverbrauch gewählt. Um eine Gaspreisänderung in die Simulation miteinfließen lassen zu können, startet der gewählte Zeitraum für die Optimierung am 21.01.2019 um 23:00 Uhr und endet am 22.01.2019 um 3:00 Uhr morgens. Die Gaspreisänderung findet über den Tageswechsel statt. Diesmal wurde, im Gegensatz zum Beispiel im Kapitel 5.1, nur anhand von 12 Optimierungsschritten (15 Minuten je Zeitschritt) optimiert. Je weniger Optimierungsschritte der Optimierer verwendet, desto weniger vorausschauend werden die Ergebnisse im ersten Zeitschritt. In diesem Beispiel wird gezeigt, dass auch schon 12 Perioden ausreichend sind, um verwertbare Daten zu erhalten.

Für den Strompreis wurde eine Preisentwicklung [67], die starke Schwankungen enthält, verwendet um die Reaktionen des Optimierers auf unterschiedliche Energiepreise darzustellen. Der Wärme- und Gaspreis wurde, wie in Tabelle 18 gezeigt, festgelegt. Für die Optimierung im Jahr 2019 und 2030 wurden für eine gute Vergleichbarkeit dieselben Energiepreise verwendet.

Tabelle 18: Szenario 2 – Preisentwicklung [67–69]

Zeitschritt [15 min Intervall]	Strompreis [€/MW]	Wärmepreis [€/MW]	Gaspreis [€/MW]
1	80,00	50,00	51,00
2	50,00	50,00	51,00
3	35,55	50,00	51,00
4	51,65	50,00	51,00
5	73,42	50,00	40,00
6	154,00	50,00	40,00
7	50,00	50,00	40,00
8	34,57	50,00	40,00
9	58,45	50,00	40,00
10	65,14	50,00	40,00
11	46,00	50,00	40,00
12	46,00	50,00	40,00

In Tabelle 19 sind die Eigenschaften der eingesetzten Flexibilitätsoptionen für das Jahr 2019 aufgelistet. Die Benennungen der jeweiligen Tabellenspalten entsprechen jenen vom Kapitel 5.1 und werden daher nicht mehr für jede einzelne Tabelle gesondert beschrieben.

Tabelle 19: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Stadtteil Wien 2019

Hybridelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Rampe [%]
Transformator	100	0	∞	100
Wärmeübergabestation	100	0	∞	100
Gasübergabestation	100	0	∞	100
GtH	99	0	96,56	100
PtH	300	0	8,84	100

Da der Optimierer ein Teil von HyFlow ist und die maximal mögliche Flexibilität normalerweise vorab darin bestimmt wird, muss zusätzlich auch noch ein weiterer Parameter Opt_P_RL_Set (Siehe Kapitel 4.3.2, Gleichung (4–13)) festgelegt werden. Mit Hilfe dieses Parameters lässt sich das Flexibilitätsband berechnen. Für diesen USW-Bezirk wird sowohl für das Jahr 2019 als auch 2030 ein Wert von 60 MW (positives Vorzeichen = Verbrauch) gewählt. Das heißt, der USW-Bezirk soll im Stromsektor im ersten Zeitschritt eine Summenresiduallast von 60 MW aufweisen. Abhängig von der jeweiligen USW-Bezirk Residuallast ergibt sich für die jeweiligen Jahre ein unterschiedlicher Flexibilitätsbereich für den ersten Zeitschritt.

Tabelle 20 zeigt die Werte der installierten Speicher. Da der erste Schritt für 23:00 Uhr kalkuliert wurde, wurde der Anfangsbestand des Wärmespeichers (AB) vor der ersten Periode mit 75 % angenommen.

Tabelle 20: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Stadtteil Wien 2019

Speicherelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Kapazität [MW]	AB [MWh]	SE [%]
Wärmespeicher	99	0	931,57	9315,70	6986,78	0

Tabelle 21 zeigt die Residuallast der 12 Zeitperioden für den jeweiligen Energieträger. Das Flexibilitätsband berechnet sich wie in Kapitel 4.3.2 in der Formel (4–13) gezeigt. Für das Jahr 2019 ergibt sich daraus ein mögliches Flexibilitätsband von 3,04 MW. Das heißt die Flexibilitätsoptionen müssen im USW-Bezirk diesen Residuallastwert annehmen. Ein positives Vorzeichen bedeutet, dass die jeweilige Energie verbraucht wird.

Tabelle 21: Szenario 2 – Optimierer Residuallast: Stadtteil Wien

Zeitschritt [15 min Intervall]	Strom RL [MW]	Wärme RL [MW]	Gas RL [MW]
1	55,96	562,73	16,35
2	52,58	562,73	15,82
3	49,36	562,73	15,61
4	46,46	562,73	15,45
5	44,30	568,14	15,33
6	42,07	568,14	15,27
7	40,44	568,14	15,24
8	39,28	568,14	15,25
9	38,42	576,75	15,29
10	37,82	576,75	15,36
11	37,38	576,75	15,45
12	37,15	576,75	15,56

Abbildung 53 zeigt die für das Jahr 2019, im USW-Bezirk Stadtteil Wien, kalkulierten Leistungsflüsse der einzelnen Elemente des Optimierers und die Preisentwicklung der jeweiligen Energieträger. Die Darstellung des Diagramms ist dieselbe wie in Abbildung 48 (Kapitel 5.1). Der Optimierer berechnet den ersten Zeitschritt unter der Berücksichtigung der nachfolgenden Zeitschritte. Der erste Zeitschritt ist durch das Flexibilitätsband (3,04 MW) begrenzt. Der durch diesen Wert vorgegebene, erzwungene Stromverbrauch kann in diesem System durch das PtH Element geleistet werden. In den ersten vier Zeitschritten ist der Gaspreis höher als der Wärmepreis. Das führt dazu, dass das GtH Element nicht wirtschaftlich ist und daher nicht genutzt wird. Ab dem Zeitpunkt (fünfter Zeitschritt) an dem der Gaspreis unter dem Wärmepreis fällt, rentiert es sich das GtH Element zu nutzen. Dieses wird daher ab diesem Zeitschritt mit maximaler Leistung genutzt. Im sechsten Zeitschritt übersteigt der Strompreis den dreifachen Wert des Wärmepreises. Dies hat zur Folge, dass sich die Wärmepumpen mit einem Leistungsfaktor von Drei nicht mehr rentieren und daher das Element für diese Periode abgeregelt wird. Da die Ausspeisung von Energie aus Speichern als kostenfrei im Optimierer angesehen wird, wird über alle Zeitschritte hinweg Wärme aus dem Wärmespeicher in das System eingespeist und entweder zur Deckung des Wärmebedarfs genutzt oder ins Netz eingespeist (verkauft). Gas wird nur aus dem Gasnetz gezogen, wenn es zur Deckung des Gasverbrauches benötigt wird oder das GtH Element damit versorgt werden soll. Dasselbe gilt auch für den Strom aus dem Stromnetz. Dieses wird nur dazu verwendet, um den Stromverbrauch oder das PtH Element mit Strom zu versorgen.

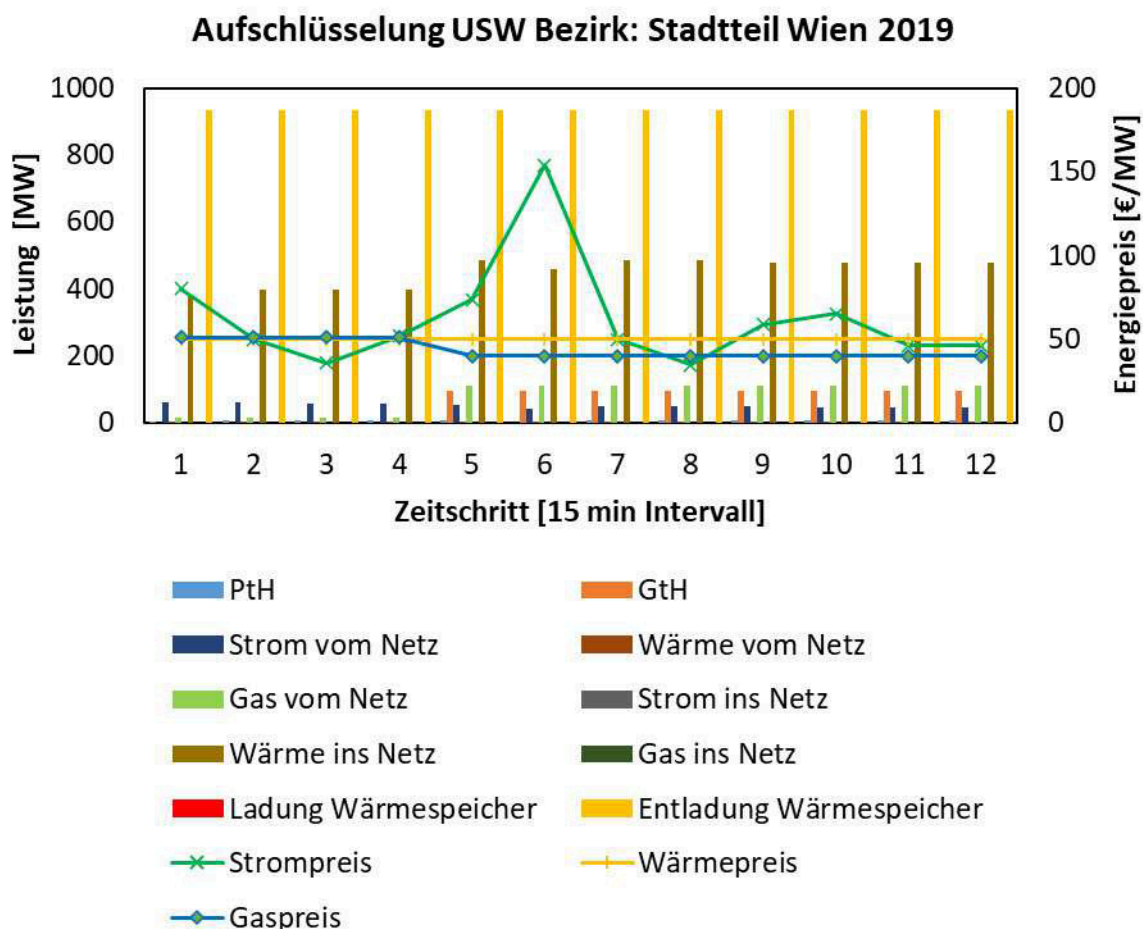


Abbildung 53: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse: Stadtteil Wien 2019

Für das Jahr 2030 wurden dieseleeben Energiepreise wie für das Jahr 2019 angenommen. Diese können aus Tabelle 18 entnommen werden. Es wurden weitere Flexibilitätsoptionen im Vergleich zum Jahr 2019 hinzugefügt und neue Leistungsgrenzen integriert. Die neuen Leistungsgrenzen können der Tabelle 22 bzw. der Abbildung 53 entnommen werden. Der Ausbau an PtH Elementen ist aufgrund dessen hoher Leistungszahl angestrebt [4]. Es wird von einem jährlichen Ausbau von 6,0 % p.a [3] ausgegangen.

Tabelle 22: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Hybridelemente): Stadtteil Wien 2030

Hybridelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Rampe [%]
Transformator	100	0	∞	100
Wärmeübergabestation	100	0	∞	100
Gasübergabestation	100	0	∞	100
GtH	99	0	96,56	100
PtH	300	0	25,23	100

Tabelle 23 zeigt die Werte des neu integrierten Stromspeichers als zusätzliches Flexibilitätsoption, sowie die erweiterte Kapazität der im USW-Bezirk installierten Wärmespeicher. Der Stromspeicher wurde mit einem Anfangsbestand von 30% angenommen. Der Anfangsbestand des Wärmespeichers wurde wie im Jahr 2019 auf 75 % festgelegt.

Tabelle 23: Szenario 2 – Optimierer Eingabeparameter (Speicher): Stadtteil Wien 2030

Speicherelement	η [%]	UG [MW]	OG [MW]	Kapazität [MW]	AB [MWh]	SE [%]
Stromspeicher	97	0	295,96	896,52	295,96	0
Wärmespeicher	99	0	842,66	8923,70	4461,85	0

Aufgrund des zusätzlichen Energieverbrauchs durch vermehrte Nutzung von E-Autos und des Ausbaus von erneuerbarer Energie ergibt sich eine neue Stromresiduallast für den USW-Bezirk für das Jahr 2030. Da die betrachteten Zeitschritte während der Nacht stattfinden, wirken sich diese Ausbauschritte bis 2030 nur minimal auf die Stromresiduallast aus. Der neue Summenlastgang ist in Tabelle 24 gezeigt. Da der Parameter zur Berechnung des Flexibilitätsbandes weiterhin mit 60 MW (Positives Vorzeichen = Verbrauch) gewählt wurde, ergibt sich in Summe eine Residuallast für alle im USW-Bezirk vorhandenen Flexibilitätsoptionen von 3,55 MW.

Tabelle 24: Szenario 2 – Optimierer Residuallast: Stadtteil Wien 2030

Zeitschritt [15 min Intervall]	Strom RL [MW]	Wärme RL [MW]	Gas RL [MW]
1	56,45	562,73	16,03
2	53,07	562,73	16,04
3	49,85	562,73	16,03
4	46,95	562,73	16,03
5	44,30	568,14	16,01
6	42,07	568,14	15,99
7	40,44	568,14	15,97
8	39,28	568,14	15,94
9	38,42	576,75	15,91
10	37,82	576,75	15,87
11	37,38	576,75	15,83
12	37,15	576,75	15,79

Abbildung 54 zeigt die für das Jahr 2030 kalkulierten Leistungsflüsse der einzelnen Elemente des Optimierers im USW-Bezirk Stadtteil Wien und die Preisentwicklung der jeweiligen Energieträger für dieselben Zeitschritte.

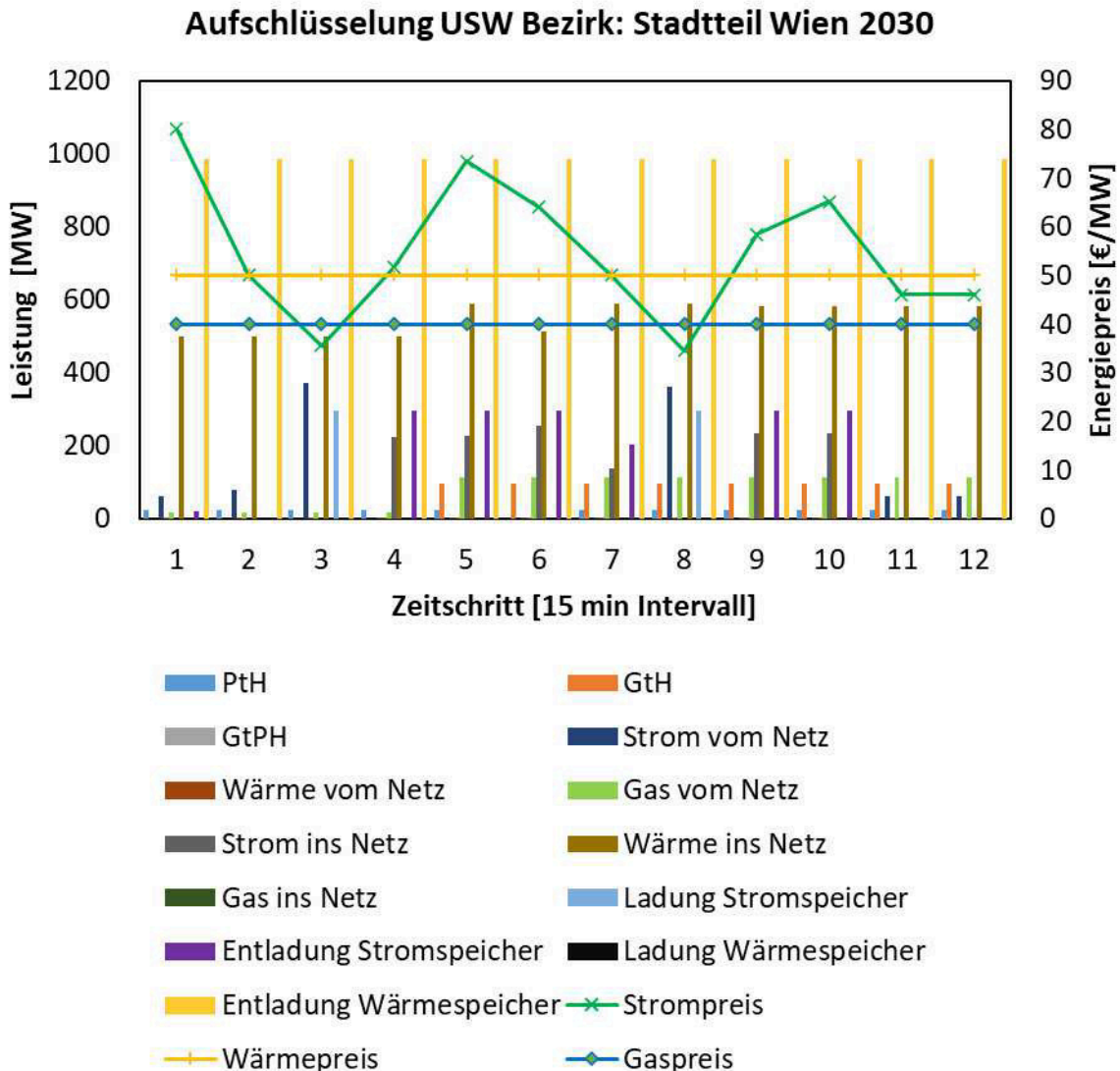


Abbildung 54: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse: Stadtteil Wien 2030

Die Darstellung des Diagramms ist dieselbe wie in Abbildung 47. Die einzelnen Elemente Verhalten sich ähnlich denen vom Jahr 2019. So werden die Hybridelemente GtH und PtH gleich wie im Jahr 2019 betrieben. Auch entladet sich der Wärmespeicher wie 2019 über alle betrachteten Perioden. Aufgrund der zusätzlichen Flexibilität durch den Stromspeicher wird bei geringen Strompreisen (z.B. Zeitschritt 3 und 8) mehr Strom vom Netz bezogen, um den Speicher zu laden und um diesen dann anschließend bei höheren Strompreisen wieder zu entladen. Dadurch kann derselbe Strom zu einem höheren Preis gewinnbringend verkauft werden oder zum Betrieb von PtH Elemente genutzt werden, um die Energiebezugskosten möglichst gering zu halten. Durch die Erhöhung der Leistungsgrenzen der jeweiligen

Hybridelemente und des Wärmespeichers, kann im Jahr 2030 im Vergleich zu 2019 mehr Wärme ins Wärmenetz gewinnbringend eingespeist werden.

Abbildung 55 zeigt eine Gegenüberstellung der Optimierungsergebnisse für die ersten vier Zeitschritte gegenüber den Jahren 2019 und 2030 für den Sektor Strom. Jene Säulen die mit „E“ betitelt sind, geben jene Element wieder, die den im Diagramm angegebenen Energieträger erzeugen. Jene mit „V“ in der Beschriftung geben die Systemkomponente wieder, die die im Diagramm betitelte Energieform verbrauchen. Das Flexibilitätsband des Jahres 2019 ist um 0,51 MW kleiner als jenes des Jahres 2030. Da bei der Berechnung dieses Bandes die Residuallast der Flexibilitätsoptionen errechnet wird, wird im Jahr 2030 deutlich mehr Strom mit den Flexibilitätsoptionen im ersten Zeitschritt umgesetzt. Durch das Entladen von Strom aus dem Stromspeicher kann der Mehrverbrauch des PtH Elements gedeckt werden und es ergibt sich eine Residuallast, die dem Betrag des Flexibilitätsbandes entspricht. Auch in diesem Szenario lässt sich deutlich erkennen, dass sich durch den zusätzlichen Einsatz von Speichern und auch die Erhöhung der Leistungsgrenzen eine größere Flexibilität ergibt, die dazu genutzt werden kann, Systeme wirtschaftlicher zu gestalten oder je nach Optimierungsansatz auch direkt zur Stabilisation des Stromnetzes genutzt werden kann.

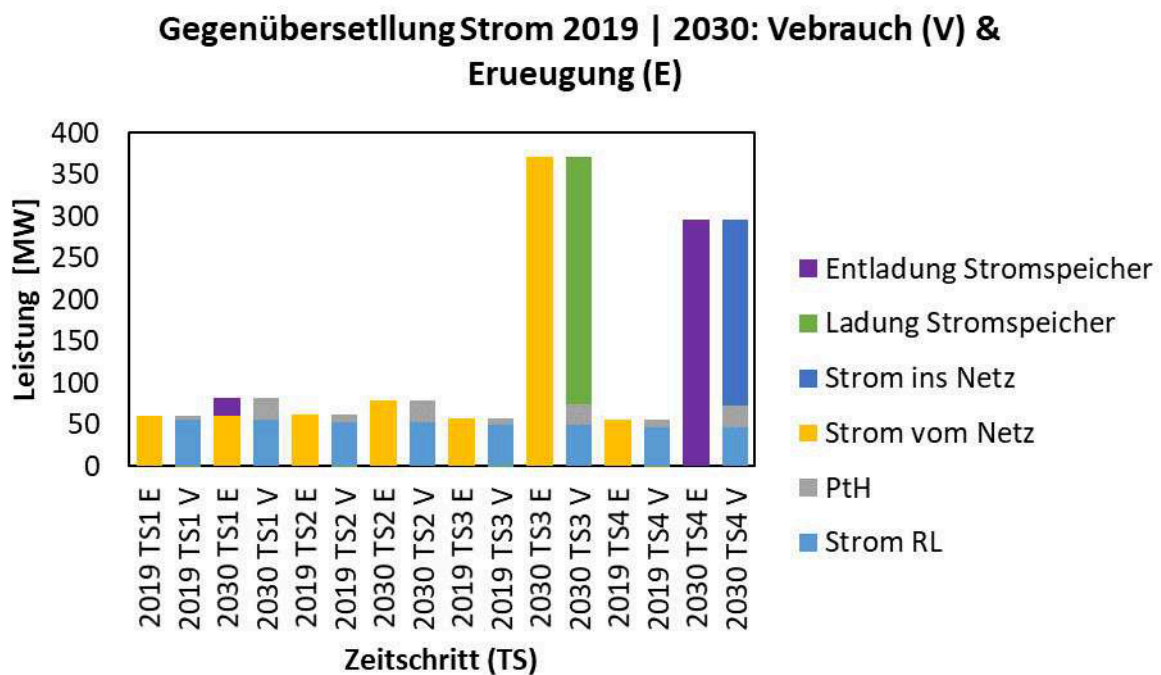


Abbildung 55: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse (Strom): Stadtteil Wien 2019 | 2030

In der Abbildung 56 lässt sich erkennen, dass durch die Erhöhung der Leistungsgrenzen des PtH Elements im Jahr 2030 vermehrt Energie in das Wärmenetz eingespeist wird. Das GtH Element wird in den ersten vier Schritten aufgrund des hohen Wärmepreises nicht genutzt.

Gegenübersetzung Wärme 2019 | 2030: Verbrauch (V) & Erzeugung (E)

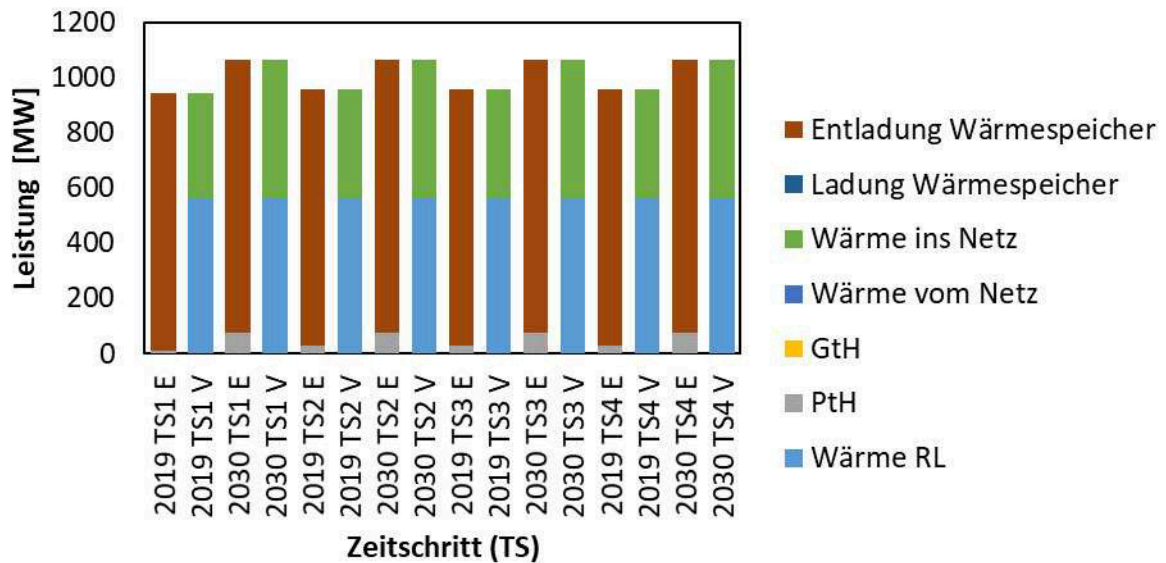


Abbildung 56: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse (Wärme): Stadtteil Wien 2019 | 2030

Abbildung 57 stellt den Gassektor der Jahre 2019 und 2030 gegenüber. Da in diesem USW-Bezirk kein Element existiert, das Gas erzeugen kann, wird zur Deckung des Gasverbrauchs ausschließlich Gas aus dem Gasnetz genutzt.

Gegenübersetzung Gas 2019 | 230: Verbrauch (V) & Erzeugung (E)

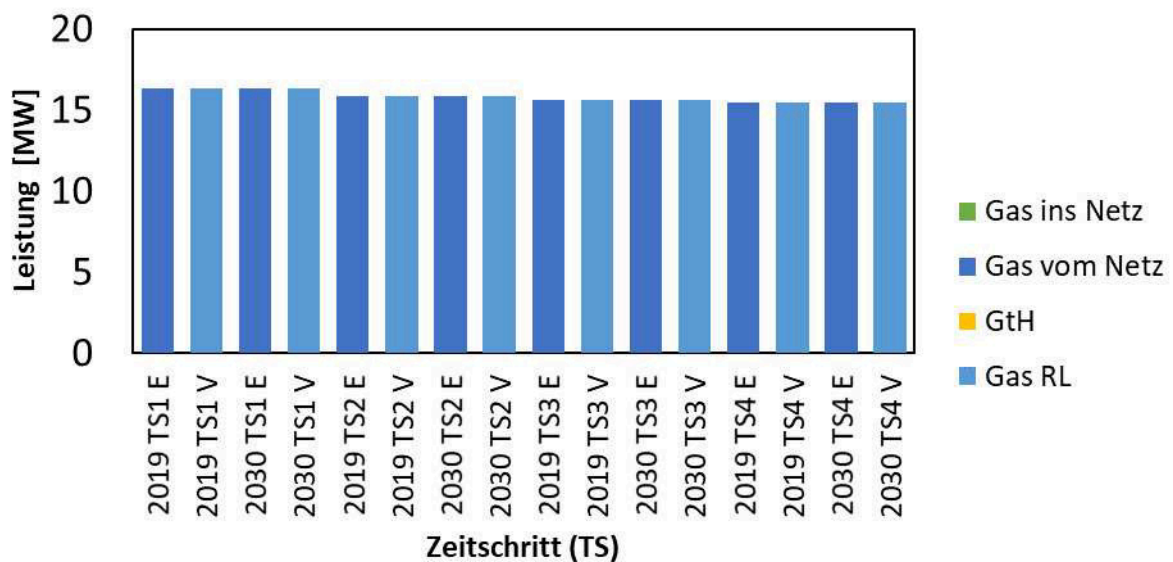


Abbildung 57: Szenario 2 – Optimierer Ergebnisse (Gas): Stadtteil Wien 2019 | 2030

Das GtH Element kommt erst in späteren Zeitschritten zum Einsatz und spielt daher in dieser Grafik keine Rolle.

Sowohl bei der Betrachtung von USW-Bezirken mit hoher Stromerzeugung und geringem Gas- und Wärmeverbrauch wie im Szenario 1, als auch bei Bezirken mit geringen Strom- und Gasverbräuchen und hohem Wärmeverbrauch (Szenario 2), zeigen bei trotz unterschiedlichem Systemaufbau eine hohe Einsatzmöglichkeit von Flexibilitätsoptionen, bei der Optimierung nach einem marktorientierten Ansatz. Dies zeigt eindeutig die wirtschaftlichen und die systemtechnischen Vorteile die durch den Einsatz von Sektorkopplungen und Speichern erreicht werden können.

6 DISKUSSION

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein örtlich und zeitlich aufgelöstes Abbild des österreichischen Energiesystems erstellt. Zusätzlich zur globalen Optimierung wurde in HyFlow eine lokale, marktorientierte Optimierung als Betriebsstrategie für Sektorkopplungen, DSM Prozesse und Speicher in Hyflow integriert.

Das erstellte Abbild des österreichischen Energienetz aus örtlich und zeitlich aufgelöste Daten wurde dahingehend aufbereitet, dass es in dem energieträgerübergreifenden Simulationstool HyFlow verwendet werden kann. Bei dem Wertevergleich der aufbereiteten Energiedaten mit den österreichischen Endenergieverbräuchen [33, 35] zeigen sich nur geringe Unterschiede. Die Gegenüberstellung ist in der Tabelle 1 im Kapitel 4.2.1 dargestellt. Der Unterschied im Endenergieverbrauch von Strom ergibt sich daraus, dass bei den aufbereiteten Daten die Transportverluste (3,339 TWh) und die unternehmenseigenen Anlagen (7,845 TWh) nicht berücksichtigt wurden [35]. Die Unterschiede im Sektor Wärme und Gas fallen vernachlässigbar gering aus und sind aufgrund der Methodik entstanden [13, 32]. Da teilweise Daten, aufgrund mangelnder Datenbasis, aus mehreren unterschiedlichen Jahren verwendet werden mussten, um die Daten für ein Jahr zu erstellen. Die Ergebnisse dieser Arbeit geben Aufschluss darüber, wie ein großes überregionales Energiesystem auf sinnvolle, berechenbare Bereiche heruntergebrochen werden kann. Es mussten jedoch auch einige Vereinfachungen getroffen werden, um eine Datenaufbereitung zu generieren, die den Anforderungen von HyFlow entsprechen. Die Arbeit gibt einen guten, nachvollziehbaren und sinnvoll umsetzbaren Weg vor, um eine große Datenmenge für HyFlow und etwaige ähnliche Programme aufzubereiten, ohne wesentlicher Qualitätseinbußen der verwendeten Daten.

Damit in Zukunft österreichweite Simulationen durchgeführt werden können, wurde HyFlow überarbeitet und mit einer Betriebsstrategie für Sektorkopplungen und Speichern erweitert. Dies ermöglicht zur globalen Optimierung in Hyflow auch eine lokale Optimierung. Dazu wurde ein marktorientierter Optimierer integriert. Dieser kann die Flexibilitätsoptionen eines Energiesystems auf Basis von Energiepreisen optimieren. Mithilfe dieses Optimierers wurde im Ergebnisteil dieser Arbeit (Kapitel 5) demonstriert, dass die Flexibilität eines Energiesystems mithilfe von Sektorkopplungen und Speichern stark zunimmt. Der Optimierer weist jedoch auch Schwachpunkte aufgrund des idealisierten Verhaltens der optimierten Elemente auf. So wird zum Beispiel im Szenario 1 über alle Perioden hinweg der Wärmespeicher entladen. Da der Wärmepreis für die betrachteten Zeitschritte konstant ist und es wirtschaftliche Vorteile bringt die Wärme ins Wärmenetz einzuspeisen (verkaufen). Dies geschieht, weil der Optimierer nur einige Stunden bis zu einem Tag vorausschauend arbeitet und sich dadurch bei großen Speicherkapazitäten und gleichbleibenden Preisen kein Grund ergibt den Speicher vorausschauend auf mögliche Energiepreiserhöhungen nicht zu

entleeren. Möglichkeiten zur Verbesserung wäre eine über mehrere Tage andauernde bzw. für USW-Bezirke mit Pumpspeicherkraftwerken und Gas Porenspeicher eine saisonübergreifende Optimierung zu integrieren. Eine größere Voraussicht erhöht aber auch die Datenmenge und somit die Rechenzeit. Auch wurde für einen simulierten Sommertag im Szenario 1 Gasheizungen verwendet, um anschließend die daraus entstehende Wärme ins Wärmenetz einzuspeisen und somit gewinnbringend zu verkaufen. Ein solches Verhalten ist jedoch im realen Fall nicht sinnvoll, da die Nachfrage nach Wärme auch in den über Leitungen verbundenen, benachbarten USW-Bezirken nicht so hoch sein würde, dass die gesamte erzeugte Wärme aus Gas benötigt wird. Um solche Fälle zu verhindern, müssten saisonbedingte Netzbegrenzungen in die Optimierung miteinbezogen werden. Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse, dass der Einsatz von Sektorkopplungen und Speichern mithilfe von marktorientierten Optimierungen nicht nur zu einer verbesserten Flexibilität beitragen, sondern auch die Wirtschaftlichkeit eines Systems erhöhen können. Auf Basis der Ergebnisse scheint ein vermehrter Einsatz von Speichern, aufgrund ihrer hohen Flexibilität, in Zukunft sinnvoll. Es ist vor allem auch mit einem vermehrten Einsatz von Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen in der Energieerzeugung und Umwandlung in Zukunft zu rechnen. Auf der Verbraucherseite werden vor allem Veränderung durch die Zunahme von Elektroautos stattfinden. Die Optimierung zeigt wie energieträgerübergreifende Elemente sinnvoll eingesetzt werden können. Für die im Kapitel 5 durchgeführten Szenarien-Berechnungen wurden zwei beispielhafte USW-Bezirke ausgewählt. Andere Bezirke können anders aufgebaut sein und daher große Unterschiede in den Ergebnissen bei möglichen Optimierungen zu den gewählten Bezirken aufweisen. Weitere Einflussfaktoren auf die Optimierung waren die gewählten Preise und der Zeitraum der Optimierung.

Aufgrund von unerwarteten hohen Zeitansprüchen bei der Berechnung durch die neu integrierte Betriebsstrategie, ergaben sich bei der Simulation des gesamten österreichischen Energiesystems Rechenzeiten, die die Möglichkeiten dieser Arbeit überstiegen.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Basis (örtlich und zeitlich aufgelöstes Energiemodell von Österreich) erstellt, mit dem das österreichische Energiesystem in derzeitigen und zukünftigen Zuständen simuliert und analysiert werden kann. Zusätzlich dazu wurden energiepolitische Ziele recherchiert. Das energieträgerübergreifende Simulationstool HyFlow wurde mit einer neuen Betriebsstrategie erweitert, um Energiesysteme auf Basis von Energiepreisen zu optimieren. Dazu wurde ein marktorientierter Optimierer integriert. Damit wurde in weiterer Folge anhand von österreichische Beispielgebieten Simulationen durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden anschließend ausgewertet und analysiert. Es zeigt, dass die Ausbauziele von erneuerbaren Technologien zur Energieerzeugung, technisch, in getesteten Gebieten möglich sind, jedoch ebenfalls der Ausbau und die Integration von Sektorkopplungen und Speichern wichtig sind, um ein stabiles Netz zu gewährleisten.

Aufgrund der hohen Rechenzeit konnte das österreichische Energiesystem in dieser Arbeit in HyFlow nicht simuliert werden. Um diese Simulationen durchführen zu können, muss in Zukunft der Programmiercode von HyFlow effizienter gestaltet werden. Vor allem die Bereiche der neu integrierten Optimierer bieten dazu ein hohes Potential. Die Optimierung, welche das Flexibilitätsband für Matpower berechnet, sollte nicht weiterhin so gestaltet sein, dass sie für jeden USW-Bezirk einzeln abläuft. Um dieses Zeitproblem zu beheben, würde es sich anbieten USW-Bezirke gleichzeitig zu optimieren, wodurch nur noch ein Optimierungsschritt je Zeitschritt nötig wäre. Auch der marktorientierte Optimierer sollte auf diese Weise modifiziert werden. Ein Ziel sollte sein die gesamte Rechenzeit je Zeitschritt auf jenen Umfang zu reduzieren, dass die Berechnung eines Zeitschrittes nicht länger als zehn Sekunden dauert, damit sich die gesamte Rechenzeit im einstelligen Tagesbereich bewegt. Ist dieses Ziel erreicht, sollte eine österreichweite Simulation mit den bereits aufbereiteten Daten durchgeführt werden.

Der marktorientierte Optimierer bietet ebenfalls Verbesserungspotential. Dazu sollte geprüft werden, ob Energie aus oder in DSM-Prozesse oder speziellen Speichern bepreist werden sollte. Wie es zum Beispiel für große Porenspeicher im Gassektor oder für Pumpspeicherkraftwerke im Stromsektor sinnvoll wäre. Die Integration von Pumpspeicherkraftwerken im Optimierer sollte verbessert werden, da sie zurzeit wie normale Stromspeicher im Optimierer behandelt werden. Dies kann durch unterschiedlich betrachtete Optimierungs- bzw. Speicherzeiten begründet werden.

Da im Optimierer die Blindleistung noch unberücksichtigt ist, kann diese ebenfalls noch integriert werden. Eine Erweiterung des Optimierers auf weitere Energieträger, wie etwa

Wasserstoff, könnte vor allem für Simulationen, die über das Jahr 2030 hinausgehen sinnvoll sein.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] *Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030 - Klimapolitik - European Commission*. URL https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de. – Aktualisierungsdatum: 2017-02-16 – Überprüfungsdatum 2021-05-26
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS (Hrsg.); BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, INNOVATION UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *#mission2030 : Die österreichische Klima- und Energiestrategie*. Wien, 2018
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Energie in Österreich : Zahlen, Daten, Fakten*. Wien, 2020
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz – EAG) : Entwurf 2021-03-16*. 16.03.2021
- [5] PLAßMANN, Wilfried ; SCHULZ, Detlef: *Handbuch Elektrotechnik : Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*. 7th ed. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017
- [6] ENERGIE-EXPERTEN: *So funktioniert das deutsche Stromnetz*. URL <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/oekostrom/stromnetz>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-16 – Überprüfungsdatum 2021-05-16
- [7] HEUCK, Klaus ; DETTMANN, Klaus-Dieter ; SCHULZ, Detlef: *Elektrische Energieversorgung : Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. 9., aktualisierte und korrigierte Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013 (Lehrbuch)
- [8] KIENBERGER THOMAS: *Kraftwerke und elektrische Energiesysteme : Topologien bei der Energieübertragung*. Lehrveranstaltungsunterlage. Leoben, 2018
- [9] AUSTRIAN POWER GRID (Hrsg.): *Netzentwicklungsplan 2019 : Für das Übertragungsnetz der Austrian Power Grid AG (APG)*. Planungszeitraum: 2020 - 2029. Wien, 08/2019
- [10] AGGM AUSTRIAN GAS GRID MANAGEMENT: *Langfristige Planung 2019 : für die Gas Verteilernetzinfrastruktur in Österreich*. für den Zeitraum 2020– 2029. 2. Aufl. Wien, 14.11.2019
- [11] TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN; Richard Büchele (Mitarb.); Reinhard Haas (Mitarb.); Michael Hartner (Mitarb.); Ricki Hirner (Mitarb.); Marcus Hummel (Mitarb.); Lukas Kranzl (Mitarb.); Andreas Müller (Mitarb.); Karl Ponweiser (Mitarb.) : *Bewertung des Potenzials für den Einsatz der hocheffizienten KWK Bewertung des Potenzials für den Einsatz der*

hocheffizienten KWK und effizienter Fernwärme- und Fernkälteversorgung
Fernkälteversorgung : Endbericht. 25.09.2015

- [12] FFG - AUSTRIAN RESEARCH PROMOTION AGENCY: *Heat Highway : Interregional heat transmission networks to enable industrial waste heat usage and fossil-free industry.* URL <https://projekte.ffg.at/projekt/3851881/pdf>. – Aktualisierungsdatum: 2021-04-28
- [13] SEJKORA, Christoph ; KÜHBERGER, Lisa ; RADNER, Fabian ; TRATTNER, Alexander ; KIENBERGER, Thomas: *Exergy as Criteria for Efficient Energy Systems—A Spatially Resolved Comparison of the Current Exergy Consumption, the Current Useful Exergy Demand and Renewable Exergy Potential.* In: *Energies* 13 (2020), Nr. 4, S. 843.
doi.org/10.3390/en13040843
- [14] FAVRE-PERROD, P.: *A vision of future energy networks*, S. 13–17.
doi.org/10.1109/PESAFR.2005.1611778
- [15] PARISIO, Alessandra ; DEL VECCHIO, Carmen ; VACCARO, Alfredo: *A robust optimization approach to energy hub management.* In: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42 (2012), Nr. 1, S. 98–104. doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.03.015
- [16] CHEN, Zexing ; ZHANG, Yongjun ; TANG, Wenhui ; LIN, Xiaoming ; LI, Qifeng: *Generic modelling and optimal day-ahead dispatch of micro-energy system considering the price-based integrated demand response.* In: *Energy* 176 (2019), S. 171–183.
doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.004
- [17] BEIGVAND, Soheil Derafshi ; ABDI, Hamdi ; LA SCALA, Massimo: *A general model for energy hub economic dispatch.* In: *Applied Energy* 190 (2017), S. 1090–1111.
doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.126
- [18] NAVARRO, A. ; RUDNICK, H.: *Large-Scale Distribution Planning—Part I: Simultaneous Network and Transformer Optimization.* In: *IEEE Transactions on Power Systems* 24 (2009), Nr. 2, S. 744–751. doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016593
- [19] NAVARRO, A. ; RUDNICK, H.: *Large-Scale Distribution Planning—Part II: Macro-Optimization With Voronoi's Diagram And Tabu Search.* In: *IEEE Transactions on Power Systems* 24 (2009), Nr. 2, S. 752–758. doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2016594
- [20] SCHULZ, Detlef (Hrsg.): *NEIS Conference 2016 : Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern = Sustainable energy supply and energy storage systems.* Wiesbaden : Springer Vieweg, 2017
- [21] ANDRÉ SEACK ; JAN KAYS ; CHRISTIAN REHTANZ: *Generating low voltage grids on the basis of Public available map data.* Paper. URL

- http://www.cired.net/publications/workshop2014/papers/CIRED2014WS_0338_final.pdf. – Aktualisierungsdatum: 06.2014
- [22] ROH, M.: *Graphentheorie – Der Dijkstra Algorithmus*. URL <https://www.rfdz-informatik.at/dijkstra-algorithmus/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-01-13 – Überprüfungsdatum 2021-04-30
- [23] DIJKSTRA, E. W.: *A note on two problems in connexion with graphs*. In: *Numerische Mathematik* 1 (1959), Nr. 1, S. 269–271. doi.org/10.1007/BF01386390
- [24] TH. OTTMANN: *Das Voronoi Diagramm : Algorithmische Geometrie*. URL <https://algo.informatik.uni-freiburg.de/bibliothek/books/ad-buch/k7/slides/11.pdf>
- [25] AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY: *Feature Column from the AMS*. URL <http://www.ams.org/publicoutreach/feature-column/fcarc-voronoi>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-16 – Überprüfungsdatum 2021-05-16
- [26] BÖCKL, Benjamin ; GREIML, Matthias ; LEITNER, Lukas ; PICHLER, Patrick ; KRIECHBAUM, Lukas ; KIENBERGER, Thomas: *HyFlow—A Hybrid Load Flow-Modelling Framework to Evaluate the Effects of Energy Storage and Sector Coupling on the Electrical Load Flows*. In: *Energies* 12 (2019), Nr. 5, S. 956. doi.org/10.3390/en12050956
- [27] FRITZ FLORIAN: *Stromnetzentlastung mittels Sektorkopplung in Gebieten mit hoher projektierte PV-Einspeisung am Fallbeispiel der Südsteiermark*. Leoben, Montanuniversitaet Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik. Masterarbeit. 2020-09-09
- [28] SCHLÖMICHNER THERESA: *Erstellung eines Modells als Grundlage für zeitlich aufgelöste Lastflussrechnungen des österreichischen Hoch- und Höchstspannungsnetzes*. Leoben, Montanuniversitaet Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik. Bachelorarbeit. Noch nicht veröffentlicht, Stand: Mai 2021
- [29] OESTERREICH, Bundesanstalt Statistik: *STATatlas*. URL <https://www.statistik.at/atlas/>. – Aktualisierungsdatum: 2020-10-05 – Überprüfungsdatum 2021-05-03
- [30] ÖBB-INFRASTRUKTUR AG (Hrsg.): *ZAHLEN DATEN FAKTEN*. Wien
- [31] AUSTRIA-FORUM: *Liste von Bahnstromanlagen in Österreich*. URL https://austria-forum.org/af/AustriaWiki/Liste_von_Bahnstromanlagen_in_%C3%96sterreich. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-17 – Überprüfungsdatum 2021-05-17
- [32] *Ergebnisse — Austrian Heat Map*. URL <http://www.austrian-heatmap.gv.at/ergebnisse/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-03 – Überprüfungsdatum 2021-05-03

- [33] STATISTICS AUSTRIA: *Nutzenergieanalyse*. URL
https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-17 – Überprüfungsdatum 2021-05-17
- [34] FRITZ FLORIAN: *Erstellung eines Modells der österreichischen Gasinfrastruktur*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik. Projektarbeit. Juni 2020
- [35] STATISTICS AUSTRIA: *Energiebilanzen*. URL
http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energiebilanzen/index.html. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-17 – Überprüfungsdatum 2021-05-17
- [36] THOMAS GOBMAIER ; WOLFGANG MAUCH ; MICHAEL BEER ; SERAFIN VON ROON ; TOBIAS SCHMID ; TOMÁS MEZGER ; JOCHEN HABERMANN ; SEBASTIAN HOHLENBURGER: *Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens : Endbericht*. Juni 2012
- [37] IT-DEVELOPMENT, Umweltbundesamt: *EDM Portal - Willkommen im Elektronischen Datenmanagement - Umwelt*. URL
https://secure.umweltbundesamt.at/edm_portal/home.do. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-18 – Überprüfungsdatum 2021-05-18
- [38] APCS POWER CLEARING AND SETTLEMENT AG: *Synthetische Lastprofile : Prognose von Verbrauchswerten mittels Lastprofilen*. URL
<https://www.apcs.at/de/clearing/technisches-clearing/lastprofile>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-04 – Überprüfungsdatum 2021-05-04
- [39] ENTSO-E: *Data view : Cross-Border Physical Flow*. URL
[https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/physicalFlow/show?name=&defaultValue=false&viewType=TABLE&areaType=ORDER_CTY&atch=false&dateTime.dateTime=01.01.2019+00:00|CET|DAY&border.values=CTY|10YAT-APG-----L!CTY_CTY|10YAT-APG-----L_CTY_CTY|10YIT-GRTN-----B&dateTime.timezone=CET_CEST&dateTime.timezone_input=CET+\(UTC+1\)+/+CEST+\(UTC+2\)](https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/physicalFlow/show?name=&defaultValue=false&viewType=TABLE&areaType=ORDER_CTY&atch=false&dateTime.dateTime=01.01.2019+00:00|CET|DAY&border.values=CTY|10YAT-APG-----L!CTY_CTY|10YAT-APG-----L_CTY_CTY|10YIT-GRTN-----B&dateTime.timezone=CET_CEST&dateTime.timezone_input=CET+(UTC+1)+/+CEST+(UTC+2)). – Aktualisierungsdatum: 2021-05-04 – Überprüfungsdatum 2021-05-04
- [40] WAGLER MARCO ; WITZMANN ROLF: *Erstellung und Evaluierung eines synthetischen Haushaltslastprofilgenerators für Wirk- und Blindleistung*. TU München, Februar 2016
- [41] GROISS CHRISTOPH ; GRUBINGER DAVID ; SCHWALBE ROMAN: *Blindleistungsbilanz im Salzburger Verteilnetz*. Technische Universität Graz, Februar 2018

- [42] LINDNER MARCO ; AIGNER CHRISTIAN ; WITZMANN ROLF ; WIRTZ FRANK ; FRINGS ROBERT: Aktuelle Musternetze zur Untersuchung von Spannungsproblemen in der Niederspannung. In: , 2016
- [43] BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg.); VERBAND KOMMUNALER UNTERNEHMEN (Hrsg.); GROUPEMENT EUROPÉEN DES ENTREPRISES ET ORGANISMES DE DISTRIBUTION D'ÉNERGIE (Hrsg.): *BDEW/VKU/GEODE Leitfaden : Abwicklung von Standardlastprofilen Gas*. Berlin, Germany, 2018
- [44] *Renewables.ninja*. URL <https://www.renewables.ninja/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-05 – Überprüfungsdatum 2021-05-05
- [45] STAFFELL, Iain ; PFENNINGER, Stefan: *Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output*. In: *Energy* 114 (2016), S. 1224–1239. doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068
- [46] PFENNINGER, Stefan ; STAFFELL, Iain: *Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data*. In: *Energy* 114 (2016), S. 1251–1265. doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060
- [47] ÖVGW; MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN; WU WIEN; DBI GAS- UND UMWELTECHNIK GMBH; TU WIEN; JKU LINZ; ERIG: *Greening the Gas : Forschungsbericht 2019*. Wien, 29.02.2020
- [48] PFEMETER CHRISTOPH: *Bioenergie Atlas Österreich*. 2. Aufl. Wien : Österreichischer Biomasse-Verband, 2019
- [49] PHOTOVOLTAIC AUSTRIA TEAM: *Die Österreichische Photovoltaik & Speicher-Branche : In Zahlen*. URL <https://pvaustralia.at/presseberichte/>
- [50] HEZEL, P.: *Statistiken zu Wasserkraft in Österreich*. URL <https://de.statista.com/themen/2265/wasserkraft-in-oesterreich/>. – Aktualisierungsdatum: 2020-12-01 – Überprüfungsdatum 2021-05-06
- [51] KLEINWASSERKRAFT ÖSTERREICH: *Fakten*. URL <https://www.kleinwasserkraft.at/en/fakten/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-07 – Überprüfungsdatum 2021-05-07
- [52] eHYD : *der Zugang zu hydrographischen Daten Österreichs*. URL <https://ehyd.gv.at/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-19 – Überprüfungsdatum 2021-05-19
- [53] JOST, G. ; MOORE, R. D. ; MENOUNOS, B. ; WHEATE, R.: *Quantifying the contribution of glacier runoff to streamflow in the upper Columbia River Basin, Canada*. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (2012), Nr. 3, S. 849–860. doi.org/10.5194/hess-16-849-2012

- [54] WOLF NICHOLAS: *Pumped Hydroelectric Dam Model*. Leoben, Montanuniversitaet Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik. 2021-03-30
- [55] SCHLÖMICHLER THERESA: *Österreichs Kraftwerke und ihre Standorte*. Leoben, Montanuniversitaet Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik. Projektarbeit. Noch nicht veröffentlicht, Stand: Mai 2021
- [56] [HTTPS://AUSTRIA-FORUM.ORG/](https://austria-forum.org/), Austria-Forum |.: *Liste österreichischer Kraftwerke | AustriaWiki im Austria-Forum*. URL https://austria-forum.org/af/AustriaWiki/Liste_%C3%B6sterreichischer_Kraftwerke. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-07 – Überprüfungsdatum 2021-05-07
- [57] VERBAND SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSUNTERNEHMEN: *Strompreisbildung*. Basiswissen-Dokument. Aarau, März 2020
- [58] LÖFBERG JOHAN: *Pre- and post-processing sum-of-squares programs in practice*. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* (2009), Nr. 5, S. 1007–10111
- [59] GUROBI OPTIMIZATION, L. L.C.: *Gurobi Optimizer Reference Manual*. URL <http://www.gurobi.com>
- [60] *Electricity Price Forecasting with Neural Networks*. URL <https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/28684/versions/9/previews/Electricity%20Load%20&%20Price%20Forecasting/Price/html/PriceScriptNN.html>. – Aktualisierungsdatum: 2014-02-12 – Überprüfungsdatum 2021-05-11
- [61] THIES DE GRAAFF: *Realisierung einer Kurzfrist-Prognose des Intraday-Markts mittels verschiedener Machine-Learning-Techniken*. Oldenburg, Universität Oldenburg, Institut für Informatik. Masterarbeit. 2018-05-11
- [62] STATISTIK AUSTRIA: *Bevölkerung*. URL https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/index.html. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-14 – Überprüfungsdatum 2021-05-14
- [63] PÖTSCHER, Friedrich: *Szenarien zur Entwicklung der Elektromobilität in Österreich bis 2020 und Vorschau 2030 : Update 2014*. Wien : Umweltbundesamt, 2015 (Report / Umweltbundesamt)
- [64] UMWELTBUNDESAMT: *Verkehrsleistungen*. URL https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/alternative_verkehrskonzepte/tourismus/vverkehrsleistungen.html. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-14 – Überprüfungsdatum 2021-05-14

- [65] BOSSERHOFF, Dietmar: *Umsetzung der Integration von Raumplanung und Verkehr in Hessen*. In: *Raumforschung und Raumordnung* 62 (2004), 4-5, S. 309–318.
doi.org/10.1007/BF03184523
- [66] KIENBERGER, Thomas ; TRAUPMANN, Anna ; SEJKORA, Christoph ; KRIECHBAUM, Lukas ; GREIML, Matthias ; BÖCKL, Benjamin: *Modelling, designing and operation of grid-based multi-energy systems*. In: *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 29 (2020), S. 7–24. doi.org/10.5278/ijsepm.3598
- [67] EXAA ENERGY EXCHANGE AUSTRIA: *Power Day Ahead Auctions*. URL <https://www.exaa.at/en/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-22 – Überprüfungsdatum 2021-05-22
- [68] INGOLSTADT, Stadtwerke: *SWI Fernwärme*. URL <https://gk.sw-i.de/gewerbe-industrie/fernwaerme/swi-fernwaerme/>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-22 – Überprüfungsdatum 2021-05-22
- [69] E-CONTROL: *Price monitor*. URL <https://www.e-control.at/en/gewerbe-gaspreis-monitor>. – Aktualisierungsdatum: 2021-05-22 – Überprüfungsdatum 2021-05-22

