



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Björn-Daniel Brunner

Fahrplan-Entwicklung des BHKWs und der Wärmepumpe für
eine energiesystemdienliche Optimierung der Wärmeversorgung
am Technologiezentrum Energie-Campus Bergedorf

Björn-Daniel Brunner

Fahrplan-Entwicklung des BHKWs und der Wärmepumpe für eine
energiesystemdienliche Optimierung der Wärmeversorgung am
Technologiezentrum Energie-Campus Bergedorf

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Renewable Energy Systems
am Department Umwelttechnik
der Fakultät Life Sciences
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers

Zweitgutachter: M. Sc. Hendrik Zachariassen

Abgegeben am 31.08.2021

Titel der Masterthesis

Fahrplan-Entwicklung des BHKWs und der Wärmepumpe für eine energiesystemdienliche Optimierung der Wärmeversorgung am Technologiezentrum Energie-Campus Bergedorf

Schlagworte

Modellentwicklung, Energiesystemdienlichkeit, Nichtlineare gemischt-ganzzahlige Optimierung, Sektorenkopplung, Schichtenspeichermodell, erneuerbare Wärme

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Optimierungsmodell für ein modernes Heizungssystem entwickelt. Es stellt die Grundlage für einen Fahrplanbetrieb am Technologiezentrum Bergedorf dar. Die Folgen der Integration einer Wärmepumpe in das bestehende Heizungssystem wurden untersucht. Für die Modellentwicklung wurde auf eine gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung zurückgegriffen. Ein Emissionsgewichtungsfaktor wurde für den Bezirk Bergedorf entwickelt, um den Betrieb der Wärmeerzeuger an Stromüberschuss und Strommangel orientieren zu können. Eine Überprüfung der Plausibilität einzelner Bestandteile des Programms wurde vorgenommen und konnte überwiegend als plausibel bewertet werden. Die Jahresauswertung zweier Varianten des Optimierungsmodells ergab eine Reduktion der CO₂-Emissionen durch die Integration der Wärmepumpe. Zudem konnte eine signifikante Verschiebung der Emissionsverursacher festgestellt werden. Es wird empfohlen, das BHKW unter Volllast während des Strommangels zu betreiben. Bei einem Stromüberschuss ist der Einsatz der Wärmepumpe emissionsärmer. Durch das Erreichen einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 7,9 könnte die Deckung des Wärmebedarfs bis zu 39 % gesenkt, sowie Betriebsstunden und Betriebsstarts des BHKWs um die Hälfte verringert werden. Aufgetretene Simulationsabbrüche bedürfen einer weiteren Untersuchung. Die Integration der Wärmepumpe in das bestehende System muss in der Praxis überprüft werden. Die Umsetzung eines optimierten Fahrplans am Technologiezentrum wartet auf ihr Verwirklichung.

Title of the paper

Timetable development of the CHP unit and the heat pump for an energy system-serving optimization of the heat supply at the Technology Center Energy Campus Bergedorf

Keywords

Model development, energy system efficiency, nonlinear mixed-integer optimization, sector coupling, stratified storage model, renewable heat

Abstract

In this work, an optimization model for a modern heating system is developed. It represents the basis for a schedule operation at the Bergedorf Technology Center. The consequences of integrating a heat pump into the existing heating system were investigated. For the model development, a mixed-integer nonlinear optimization was used. An emission weighting factor was developed for the district of Bergedorf in order to be able to orient the operation of the heat generators to electricity surpluses and shortages. A check of the plausibility of individual components of the program was carried out and could be assessed as plausible for the most part. The annual evaluation of two variants of the optimization model showed a reduction in CO₂-emissions through the integration of the heat pump. In addition, a significant shift in the emission sources could be determined. It is recommended to operate the CHP at full load during electricity shortage. When there is a surplus of electricity, the use of the heat pump is lower in emissions. By achieving an annual coefficient of performance of the heat pump of 7.9, the coverage of the heat demand could be reduced up to 39%, as well as operating hours and operating starts of the CHP unit could be reduced by half. Occurred simulation aborts require further investigation. Integration of the heat pump into the existing system needs to be verified in practice. The implementation of an optimized schedule at the technology center is waiting to be realized.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Symbolverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	5
2.1 Ausgewählte Technologien der Wärmebereitstellung	5
2.1.1 Blockheizkraftwerke	5
2.1.2 Wärmepumpen	9
2.1.3 Wärmespeicher	14
2.2 Grundlagen der Optimierung	20
2.2.1 Lineare Optimierung	21
2.2.2 Gemischt-ganzzahlige Optimierung	21
2.2.3 Nichtlineare Optimierung	23
2.2.4 Gemischt-ganzzahlig nicht-lineare Optimierung	24
3 Heizungssystem des Technologiezentrums	25
3.1 Anlagenpark des Technologiezentrums	25
3.2 Aufbau des Heizungssystems	26
3.3 Heizungsregelung	28
3.4 Gebäudeleittechnik	30
4 Entwicklung des Optimierungsmodells	32
4.1 Definition des Optimierungssystems	32
4.2 Vorgehen bei der Modellentwicklung	33
4.3 Grundoptimierung	35
4.3.1 Annahmen und Vereinfachungen	35
4.3.2 Hinterlegte Parameter und Definition der Optimierungsvariablen	36
4.3.3 Ausgewählte Datenimporte	40
4.3.4 Zielfunktion	43
4.3.5 Nebenbedingungen	44
4.4 Erweitertes Optimierungsmodell	53
4.4.1 Erweiterte Auswahl von Variablen und Parametern	54
4.4.2 Erweiterte Datenimporte	54
4.4.3 Erweiterung der Nebenbedingungen	56
5 Ergebnisse der simulierten Fahrpläne	58
5.1 Plausibilität des Modells	58
5.2 Analyse und Vergleich der Fahrpläne im Jahresverlauf	63
5.2.1 Allgemeine Analyse	64
5.2.2 Visuelle Analyse	65
5.2.3 Analyse der Betriebsparameter	67

6	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	72
6.1	Verschiebung der CO ₂ -Emissionen	72
6.2	Interpretation der Wärmepumpenkennzahlen	73
6.3	Empfohlene Betriebsweise der Wärmeerzeuger	75
6.4	Erklärungsansatz für Simulationsabbrüche	76
6.5	Potential zur Ergänzung der Fahrplanvarianten	78
7	Zusammenfassung	80
	Literatur	82
	Anhang	87
7.1	Überprüfung der Zirkulationsverluste in Rohrleitungen	87
7.2	Auszug aus BHKW-Handbuch	88
7.3	Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten - Wärmespeicher	89
7.4	Aktuelle Messdaten Mephisto G16+	90
7.5	Aktuelle Messdaten SmartHeat classic 010 WWi R	90
7.6	Thermischer Wirkungsgrad und Leistung Mephisto G16+	91
7.7	Auszug aus Wärmepumpen-Datenblatt	92
7.8	Regressionsgeraden der Koeffizienten m und b	93
7.9	Digitaler Anhang	93

Abkürzungsverzeichnis

BHKW	Blockheizkraftwerk
BTA	Betonkernaktivierung
CBC	COIN-OR Branch-and-Cut solver
CC4E	Competence Center für Erneuerbare Energien und EnergieEffizienz
CSV	CSV-Dateien (CSV: Comma-separated values)
DAC	Adsorptionsanlage (DAC: Direct air capture)
DSP	Deckenstrahlplatten
EG	Erdgeschoss
FKW	Fluorkohlenwasserstoffe
FM	Facility Management
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GLT	Gebäudeleittechnik
IPOPT	Interior Point Optimizer
JAZ	Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe
KWK	Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen
MILP	Ganzzahlig lineare Optimierung (MILP: Mixed-integer linear programming)
MINLP	Ganzzahlige nichtlineare Optimierung (MINLP: Mixed integer nonlinear programming)
NLP	Nichtlineare Optimierung (NLP: Nonlinear programming)
LP	Lineare Optimierung (LP: Linear programming)
OG	Obergeschoss
RLT	Raumluftechnik
SOC	State of charge

Symbolverzeichnis

CO_2_{eq}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent	
η_{ges}	Gesamtwirkungsgrad Blockheizkraftwerk	
η_{el}	elektrischer Wirkungsgrad Blockheizkraftwerk	
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad Blockheizkraftwerk	
σ_p	leistungsbezogene Stromkennzahl Blockheizkraftwerk	
ε	Leistungszahl Wärmepumpe	
ε_C	Carnotleistungszahl Wärmepumpe	
η	Nutzungsgrad Blockheizkraftwerk	
P_{el}	elektrische Leistung Blockheizkraftwerk	kW
P_{th}	thermische Leistung Blockheizkraftwerk	kW
P_{br}	Brennstoffleistung Blockheizkraftwerk	kW
P_V	Verdichterleistung Wärmepumpe	kW
$P_{rl,tc}$	Residuallast Technologiezentrum	kW
\dot{Q}	Wärmestrom	kW
\dot{Q}_N	Nutzwärmestrom	kW
\dot{Q}_v	Verlustwärmestrom Wärmespeicher	kW
$\dot{Q}_f, \dot{Q}_{konv}$	Wärmeleitung und natürliche Konvektion	kW
$\dot{Q}_e, \dot{Q}_{kond}$	erzwungene Konvektion	kW
$\dot{Q}_k, \dot{Q}_{chp}, \dot{Q}_{hp}$	Erzeugerwärmestrom (Blockheizkraftwerk, Wärmepumpe)	kW
\dot{Q}_l, \dot{Q}_{tc}	Verbraucherwärmestrom (Technologiezentrum)	kW
$\dot{Q}_{chp,min}$	minimaler Wärmestrom Blockheizkraftwerk	kW
$\dot{Q}_{chp,max}$	maximaler Wärmestrom Blockheizkraftwerk	kW
$\dot{Q}_{tes,disch}$	Entladewärmestrom Wärmespeicher	kW
$\dot{Q}_{tes,ch}$	Beladewärmestrom Wärmespeicher	kW
Q_{sp}	speicherbare Wärmemenge	kWh
U	Wärmedurchgangskoeffizient	kW/m ² K
U_B, U_D, U_Z	Wärmedurchgangskoeffizient Decke, Boden, Zylinder	kW/m ² K
s	Dämmschichtdicke Wärmespeicher	m
i	Wärmespeicherschicht	
c_p	Wärmekapazität	kJ/kgK
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
λ_{eff}	effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit	W/mK
λ_w	Wärmeleitfähigkeit Wasser	W/mK
m_{reg}	Koeffizient Regressionsgerade, Leistungszahl Wärmepumpe	
b_{reg}	Koeffizient Regressionsgerade, Leistungszahl Wärmepumpe	
A_q	Querschnittsfläche Wärmespeicher	m ²
l_z	Speicherhöhe	m
V_i	Speicherschichtvolumen	m
x	Entscheidungsvariable	
F	Zielfunktion	
P	Beispiel eines Optimierungsproblems	
g	Nebenbedingung	
z	Lösung der Optimierung	
t	Zeit	h

m_{grid,CO_2}	CO ₂ -Menge Netzstrombezug	kg
m_{chp,CO_2}	CO ₂ -Menge Blockheizkraftwerk	kg
\dot{m}_{sp}	Massenstrom Wärmespeicher	kg/h
\dot{m}_{chp}	Massenstrom Blockheizkraftwerk	kg/h
\dot{m}_{hp}	Massenstrom Wärmepumpe	kg/h
\dot{m}_{tc}	Massenstrom Technologiezentrum	kg/h
\dot{m}_{pro}	Massenstrom Erzeuger	kg/h
δ_{sp}	Betriebszustand Wärmespeicher	
δ_{hp}	Betriebszustand Wärmepumpe	
δ_{chp}	Betriebszustand Blockheizkraftwerk	
$T_{chp,s}$	Vorlauftemperatur Blockheizkraftwerk	°C
$T_{pro,s}$	Vorlauftemperatur Erzeuger	°C
$T_{hp,s}$	Vorlauftemperatur Wärmepumpe	°C
$T_{tc,s}$	Vorlauftemperatur Technologiezentrum	°C
$T_{chp,r}$	Rücklauftemperatur Blockheizkraftwerk	°C
$T_{hp,r}$	Rücklauftemperatur Wärmepumpe	°C
$T_{pro,r}$	Rücklauftemperatur Erzeuger	°C
$T_{tc,r}$	Rücklauftemperatur Technologiezentrum	°C
T_{oben}	obere Schichtentemperatur	°C
T_{mitte}	mittlere Schichtentemperatur	°C
T_{unten}	untere Schichtentemperatur	°C
\bar{T}_{sp}	durchschnittliche Speichertemperatur	°C
ΔT_{hp}	Temperaturspreizung Wärmepumpe	°C
f_{Erdgas}	spez. Emissionsfaktor Erdgas	kgCO ₂ /kWh
$f_{Strommix,BD}$	Emissions-Gewichtungsfaktor Bergedorf	kgCO ₂ /kWh
$f_{Strommix}$	Gesamtemissionsfaktor	kgCO ₂ /kWh
$\bar{f}_{Strommix,D}$	durchschnittlicher Emissionsfaktor deutscher Strommix	kgCO ₂ /kWh

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vergleich von KWK-Anlagen und getrennter Strom- und Wärmeerzeugung	5
2.2	Prinzipschaltbild BHKW Mephisto G16+	6
2.3	BHKW-Auslegung anhand der geordneten Jahresdauerlinie	9
2.4	Prinzip der Kompressions-Wärmepumpe	10
2.5	Abhängigkeit der Leistungszahlen von der Umweltwärme und dem Heizungsvorlauf	12
2.6	Schematische Darstellung eines Energiepfahls	13
2.7	Pufferspeicher mit direkter Beladung und Entladung	15
2.8	Schematische Darstellung eines Schichtenspeichers mit n Schichten	17
2.9	Auftretende Wärmeströme im Schichtenspeichermodell	19
2.10	Grafische Darstellung des Optimierungsproblems P	22
2.11	Zulässigkeitsbereiche der Lösungen P1 und P2	22
2.12	Entscheidungsbaum des Branch-and-Bound-Verfahren für das Problem P	23
2.13	Konvexität des zulässigen Bereichs einer Funktion	24
3.1	Anlagenpark am Technologiezentrum Energie-Campus	25
3.2	Schematische Darstellung des Heizungssystems des Technologiezentrums	27
3.3	Heizkennlinie des Obergeschosses	28
3.4	Schema einer Rücklaufbeimischung	29
3.5	Vereinfachtes Schema der Gebäudeautomatisierung	30
4.1	Vorgehen bei der Modellentwicklung	34
4.2	Schematische Darstellung der Grundoptimierung	35
4.3	Eingehende Größen des BHKW-Modells	37
4.4	Eingehende Größen des Schichtenspeichermodells	39
4.5	Eingehende Größen des Verbrauchermodells	40
4.6	Installierte Leistung erneuerbarer Energien in den Bezirken Hamburgs	42
4.7	Heizleistungsverlauf des Technologiezentrum 2020	43
4.8	Residuallastverlauf des Technologiezentrum 2020	43
4.9	Effizienz des BHKWs Mephisto G16+ der Firma Kraftwerk	46
4.10	Thermische Leistung in Abhängigkeit von der Stromkennzahl	47
4.11	Externe und interne Massenströme des Wärmespeichers	52
4.12	Schematische Darstellung der erweiterten Optimierung	55
4.13	Niedertemperaturquelle im Jahresverlauf	56
4.14	Leistungszahl Smart Heat classic über Quellenvorlauftemperatur	57
5.1	Testdaten des Gewichtungsfaktors für Bergedorf	58
5.2	Plausibilitätsprüfung des Modells	60
5.3	Testverläufe der Schichtentemperaturen	61
5.4	Flussdiagramm für Programmablauf der Jahresauswertung	63
5.5	Anzahl der erfolgreich simulierten Fahrpläne	64
5.6	Fahrplan der Grundoptimierung am 24.02.2020	65
5.7	Fahrplan der erweiterte Optimierung am 24.02.2020	66
5.8	Relative Verteilung der Wärmeerzeugung bei der erweiterten Optimierung	67
5.9	Betriebsstunden der Wärmeerzeuger	67
5.10	Betriebsstarts der Wärmeerzeuger	68
5.11	Thermische Leistung und Jahresdauerlinie - BHKW Grundoptimierung	68
5.12	Thermische Leistung und Jahresdauerlinie - BHKW erweiterte Optimierung	69

5.13	Thermische Leistung und Jahresdauerlinie - Wärmepumpe erweiterte Optimierung	69
5.14	CO ₂ -Gesamtemissionen Grundoptimierung	70
5.15	CO ₂ -Gesamtemissionen erweiterte Optimierung	71
6.1	Vorlauftemperatur und Jahresdauerlinie der Wärmepumpe, erweiterte Optimierung	74
6.2	Optimierter Fahrplan der erweiterten Optimierung vom 24. bis 27. März 2020 . .	75
6.3	Abschnittsweiser Verlauf der Heizleistung des Technologiezentrum	77
7.1	Themischer Wirkungsgrad über thermischer Leistung Mephisto G16+	91
7.2	Auszug aus Wärmepumpen-Datenblatt SmartHeat classic 010 WWi R	92
7.3	Regressionsgeraden der Koeffizienten m und b	93

Tabellenverzeichnis

4.1	Parameter und Variablen - Wärmeerzeugung	38
4.2	Parameter und Variablen - Wärmespeicher	39
4.3	Parameter und Variablen - Wärmeverbraucher	40
5.1	Durchschnittliche Kennzahlen der Wärmeerzeuger	70

1 Einleitung

Um die Folgen des Klimawandels abzumildern, wurde auf dem Pariser Klimagipfel 2015 beschlossen, die globale Erwärmung möglichst auf $1,5^{\circ}\text{C}$ zu begrenzen [54]. Als zentrale Strategie zum Erreichen dieses Ziels gilt die deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen im Energiesektor durch die Umstellung der Energieversorgung von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energien, sowie die Senkung der Primärenergieverbräuche durch höhere Effizienzmaßnahmen [10].

Im Jahr 2020 sanken in Deutschland die Treibhausgasemissionen um etwa 80 Mio. Tonnen CO_2_{eq} . Damit liegen sie mit einem Wert von etwa 722 Mio. Tonnen CO_2_{eq} etwa 42 % unter dem Niveau von 1990 (Referenzjahr, 1251 Mio. Tonnen CO_2_{eq}). Dieser Rückgang der Emissionen um etwa 10 % gegenüber dem Vorjahr 2019 ist zu $\frac{2}{3}$ pandemiebedingt. Neben einer rückläufigen Industrie-Produktion, reduzierter Mobilität und einem geringeren Heizbedarf führte im Wesentlichen eine niedrige Kohleverstromung dazu, dass das gesteckte Klimaziel der Bundesregierung, eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 % gegenüber 1990, nicht um mehr als 2 % verfehlt wurde [28].

Bereits im Dezember 2020 hatte der Europäische Rat das EU-Klimaziel für 2030 von einer Reduktion um -40 % auf mindestens -55 % erhöht [24]. Als das Bundesverfassungsgericht in seinem Beschluss vom 24. März 2021 das im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2019 beschlossene deutsche Klimagesetz als unzureichend bemängelte [14], sah sich auch die große Koalition gezwungen, ihre Klimaziele zu verschärfen. Ein neuer Gesetzentwurf (Stand 02.06.2021) sieht u.a. vor, die Klimaneutralität Deutschlands im Jahr 2045, also bereits 5 Jahre früher, zu erreichen und auf dem Weg dorthin die Emissionen 2030 bereits nicht nur um 55 %, sondern jetzt sogar um 65 % zu reduzieren [20].

Die Erreichbarkeit der Ziele mit den bisher gefassten Maßnahmen wird unterdessen kontrovers diskutiert. Laut eines Gutachtens, beauftragt durch das Umweltbundesamt, verfehlt Deutschland die alten Reduktionsziele bis 2030 bereits mit einer Lücke von 71 Mio. Tonnen CO_2_{eq} [27]. Die Autoren der dena-Leitstudie sehen die Minderung der Treibhausgasemissionen um 80 % - 95 % bis 2050 als grundsätzlich erreichbar an. Dies setzt aber einen deutlich höheren Ausbau erneuerbarer Energien, sowie die Senkung des Endenergieverbrauchs in allen Sektoren voraus, da auf Grundlage der derzeitigen Maßnahmen lediglich eine Reduktion der Emissionen von 62 % erreicht werde [18].

Der Endenergieverbrauch ist in Deutschland seit 1990 kaum gesunken. Die Aufteilung des Energieverbrauchs nach den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr macht deutlich, dass mehr als 50 % des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs auf die Wärmeversorgung entfallen. Hiervon wird ein Großteil aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe gedeckt. Die Sektoren mit dem größten Endenergiebedarf an Wärme sind die privaten Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und die Industrie, in denen die überwiegend benötigte Raum- und Prozesswärme durch Erdgas, Öl und Kohle bereitgestellt wird. Auch bei der Fernwärmeerzeugung verzeichnen fossile Energieträger die größte Anwendung [12].

Wärme aus erneuerbaren Energien ist zwar seit 1990 stetig gestiegen und liegt inzwischen bei einem Anteil von 15,2 %, der Anstieg stagniert aber seit dem Jahr 2012. Dabei wird der überwiegende Teil erneuerbarer Wärme vor allem aus biogenen Festbrennstoffen wie Holz erzeugt. Trotz eines zu verzeichnenden Anstiegs werden nur etwa 14,5 % der erneuerbaren Wärme 2020 aus Solarthermie und Geothermie bezogen [11].

Um den Ausbau erneuerbarer Energien im Gebäudesektor voranzutreiben, gelten elektrisch betriebene Wärmepumpen und erneuerbare Fernwärme als zentrale Elemente. Zum Erreichen der Klimaziele 2050 sei eine starke Bestandserhöhung von Wärmepumpen notwendig [18]. Derzeit erreichen Wärmepumpen beim Wohnungsneubau zwar 34 % und der Ausbau steigt seit 2015 stetig. Im Bestand liegt der Anteil der Wärmepumpen jedoch unter 3 % und auch der Anteil der Fernwärmeheizungen reduzierte sich im Jahr 2020 [13]. Im Rahmen der Sektorenkopplung besteht zudem die Problemstellung, dass der Stromverbrauch für E-Autos und elektrisch betriebene Wärmepumpen zum Heizen steigen wird. Der Wärmesektor kann demnach nur durch einen hohen Anteil von Strom aus regenerativen Energien dekarbonisiert werden [56].

Auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) gelten aufgrund ihres Effizienzvorteils gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in Großkraftwerken als eine vielversprechende Technologie zum Erreichen der Energiewende im Wärmesektor. KWK-Anlagen im Verbund mit Wärmespeichern sollen vor allem mittelfristig durch nachfrageangepasste Stromeinspeiseverhalten (Systemdienlichkeit) dazu beitragen, die Versorgungssicherheit zu gewährleisten [37]. Obwohl KWK-Anlagen durch die parallel zur Stromerzeugung genutzte Abwärme einen Betrag zur Ressourcenschonung leisten, steht die Nutzung meist gasbasierter Brennstoffe im Widerspruch zu den Zielen der Dekarbonisierung der Energieversorgung. Kritische Stimmen forderten bereits einen Stopp des Neubaus von KWK-Anlagen ab dem Jahr 2020, sollte die Dekarbonisierung bis zum Jahr 2040 gelingen. Laut Quaschnig [56] kann die klimaneutrale Einbindung von KWK-Anlagen nur durch sogenannte Power-to-Gas-Verfahren bewerkstelligt werden, bei denen überschüssiger erneuerbarer Strom zur Herstellung der nötigen Brenngase verwendet werde. Der für eine vollständige Dekarbonisierung der Wärmeversorgung notwendige erneuerbare Strombedarf für KWK-Anlagen wird auf 776 TWh geschätzt, was die gesamte Bruttostromerzeugung Deutschlands von ca. 625 TWh übersteigen würde und somit als unrealistisch angesehen wird [56].

Eine weitere Problemstellung bei der Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energien besteht darin, dass durch eine verstärkte Nutzung von Wind- und Solarenergie die Stromerzeugung kurzfristigen, teils heftigen Schwankungen unterliegt. Die sogenannte Residuallast, also die Differenz zwischen Stromnachfrage und fluktuierendem Angebot aus erneuerbaren Energien wird bisher durch steuerbare, konventionelle Kraftwerke ausgeglichen. Mit dem Umbau besteht immer stärker die Notwendigkeit, für dezentrale Energiesysteme kurzfristig und flexibel auf Schwankungen im Angebot zu reagieren und stromsystemdienliche Betriebsweisen umzusetzen [53].

Vor dem Hintergrund der Herausforderungen an die zukünftige dezentrale Wärmeversorgung von Gebäuden, wird im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft ein dynamisches Modell eines solchen Energiesystems entwickelt. Die reale Grundlage des zu entwickelnden Modells bildet die Wärmeversorgung des Technologiezentrums Energie-Campus in Bergedorf. Hierbei sollen die mittelfristig und langfristig gehandelten Schlüsseltechnologien für das Gelingen der Energiewende im Wärmesektor energiesystemdienlich modelliert werden. Unter einer energiesystemdienlichen

Wärmeversorgung wird in dieser Arbeit eine Betriebsweise des Energiesystems verstanden, die

- den Wärmebedarf des betrachteten Gebäudes zu jedem Zeitschritt abdeckt,
- die im Gesamtsystem auftretenden CO₂-Emissionen als zentrales Klimagas minimiert,
- eine stromorientierte Betriebsweise der Wärmeerzeuger voraussetzt,
- und zu einem möglichst effizienten Betrieb der Wärmeerzeuger führt.

Die vorgelegte Arbeit soll im Rahmen des Forschungsbetriebs am Technologiezentrum die Grundlage für einen optimierten Fahrplanbetrieb der Wärmeversorgung bilden, der zukünftig basierend auf Prognosen über den Wärmebedarf und die Residuallast umgesetzt werden soll. Um diesem Ziel ein Stück näher zu kommen, werden in dieser Arbeit zwei optimierte Fahrplanvarianten entwickelt und getestet. Dazu werden Messdaten aus dem Jahr 2020 herangezogen und unter den oben genannten Voraussetzungen für einen energiesystemdienlichen Betrieb der Wärmeversorgung verarbeitet. Bei der ersten Fahrplanvariante (Grundoptimierung) setzt sich das Modell aus einer KWK-Anlage, einem Wärmespeicher und einem Wärmeverbraucher zusammen. Für die zweite Fahrplanvariante (erweiterte Optimierung) wird als zusätzlicher Wärmeerzeuger eine Wärmepumpe hinzugefügt, um den Wärmebedarf abzudecken. Ziel dabei ist es, die beiden Varianten zu analysieren und miteinander zu vergleichen. Dabei soll die These, dass die Integration einer Wärmepumpe in das bestehende Heizungssystem des Technologiezentrums die CO₂-Gesamtemissionen reduziert, überprüft werden.

Die stromorientierte Betriebsweise der Wärmeerzeuger soll so modelliert werden, dass im Falle eines lokalen Stromüberschusses durch erneuerbare Energien die stromverbrauchende Wärmepumpe unterstützt durch Wärmespeicher die Wärmeversorgung übernimmt. Während der Zeiten eines lokalen Strommangels an erneuerbarer Energien soll die KWK-Anlage die Wärmeversorgung oder das Laden der Wärmespeicher übernehmen.

Da keine Informationen über den genauen Verlauf der Residuallast auf lokaler Ebene bestehen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein lokaler Emissions-Gewichtungsfaktor entwickelt, der eine alternative Stellgröße darstellt, um eine Aussage über den Anteil der eingespeisten erneuerbaren Energien zu erhalten.

Als besonderer Aspekt dieser Arbeit wird versucht, eine dynamische Modellierung der Massen- und Wärmeströme sowie der Temperaturniveaus umzusetzen. Häufig werden Fahrplanoptimierungen im Energiesektor als gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle aufgebaut wie in den Dissertationen von Steck (2012)[49] und von Oehsen (2012)[3] oder in den Masterarbeiten von Krohn (2019)[38] und Engels (2020)[39]. Dabei spielt unter anderem die Begrenzung der Komplexität der Modelle eine Rolle. Andererseits können so die einhergehenden Schwierigkeiten mit einer nichtlinearen Optimierung umgangen werden. Hierdurch wird aber die vereinfachte Abbildung von Wärmespeichern in Kauf genommen, die nur bedingt deren reales Verhalten abbildet. Es wird daher ein realistischeres Speichermodell eines Schichtenspeichers entwickelt, weshalb auch der Fokus bei der Modellentwicklung verstärkt dem Wärmespeicher zukommt.

Zur Durchführung der Aufgabenstellung werden zunächst in Kapitel 2 die Grundlagen der ausgewählten Schlüsseltechnologien einer zukünftigen Wärmeversorgung und die angewendeten Optimierungstechniken beschrieben. Im Anschluss daran folgt in Kapitel 3 die Charakterisierung des realen Heizungssystems am Technologiezentrum, bevor in Kapitel 4 die Entwicklung der zwei

Optimierungsmodelle, die der Grundoptimierung und die der erweiterten Optimierung dargestellt wird. Die Jahresauswertung beider Optimierungsmodelle werden in Kapitel 5 analysiert und miteinander verglichen. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Betriebsweise der Wärmeerzeuger, ihre Effizienz und ihren ökologischen Fußabdruck gelegt. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Simulationen diskutiert und unter Einbeziehung anderer Forschungsarbeiten bewertet. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen, die im Rahmen des entwickelten Modells relevant sein können. In Kapitel 7 werden die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen

In Kapitel 2 geht es darum, die entscheidenden Technologien des Heizungssystems im Technologiezentrum, BHKW, Wärmepumpe und Wärmespeicher vorzustellen und ihre Wirkungsweise zu erläutern. Des Weiteren werden die Grundlagen von Optimierungen beschrieben, sowie die Modellierungstechniken charakterisiert, die in dieser Arbeit angewandt werden.

2.1 Ausgewählte Technologien der Wärmebereitstellung

2.1.1 Blockheizkraftwerke

Blockheizkraftwerke (BHKWs) gehören zu den Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWKs). Charakteristisch für alle KWK-Anlagen ist die gleichzeitige Gewinnung von Strom und Wärme bei der Brennstoffumwandlung in Verbrennungsprozessen, was zu einem hohen Gesamtwirkungsgrad der Systeme führt. Dies stellt den Hauptvorteil von KWK-Anlagen gegenüber einer getrennten Erzeugung von elektrischer und thermischer Nutzenergie in Großkraftwerken dar. Hierdurch kann bei optimaler Auslegung und Betriebsweise einer KWK-Anlage bis zu einem Drittel der Primärenergie eingespart werden [47]. Abbildung 2.1 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

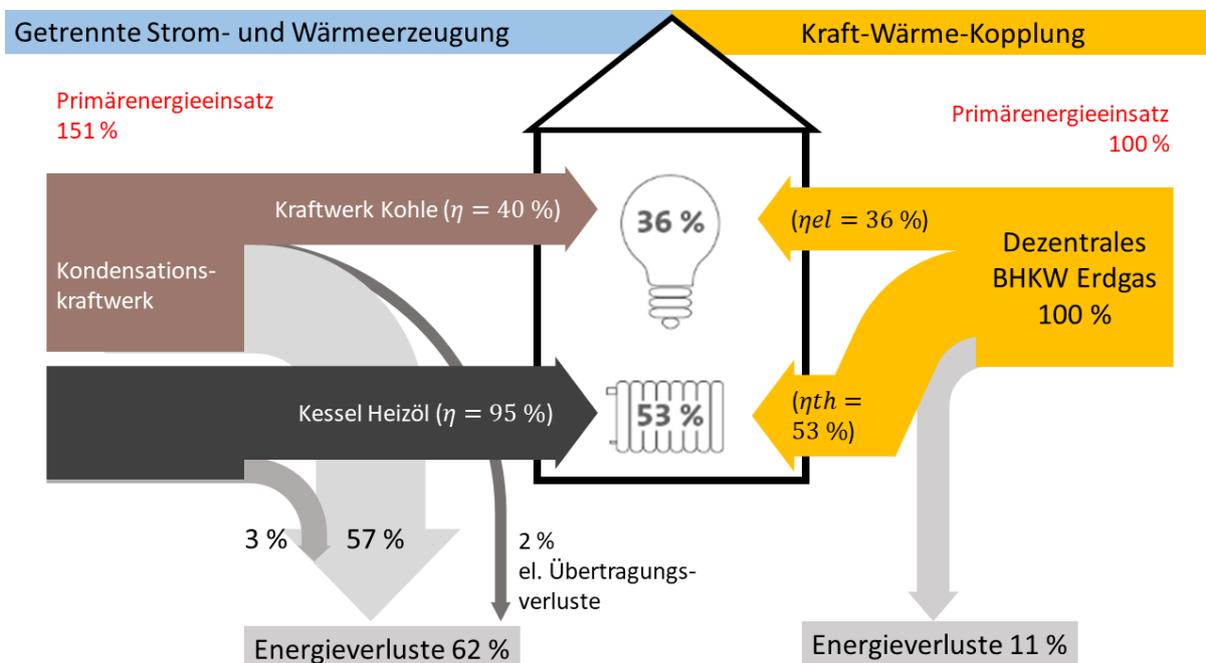


Abbildung 2.1: Vergleich der Primärenergiebilanzen von KWK-Anlagen und getrennter Strom- und Wärmeerzeugung (in Anlehnung an [4])

BHKWs kommen vor allem in kleineren Leistungsbereichen von 1 kW_{el} bis circa 2 MW_{el} Aggregatgröße zum Einsatz. Sie werden häufig für die Raumheizung und die Warmwasserversorgung von dezentralen Gebäuden eingesetzt. Der von ihnen gewonnene Strom wird meist in

das Niederspannungsnetz (0,4 kV) eingespeist [47]. Neben BHKWs werden eine Vielzahl von Energieerzeugungsanlagen den KWK-Anlagen zugeordnet, auf die in dieser Arbeit nicht tiefer eingegangen wird. Dazu zählen unter anderem:

- Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerke,
- Formen der Absorptions-Kälteanlagen,
- Brennstoffzellen-Heizkraftwerke,
- Stirlingmotorheizkraftwerke,
- Gasmotor-Wärmepumpen.

Aufbau und Aggregatetechnik

Die wesentlichen Anlagenkomponenten eines Blockheizkraftwerkes sind in dem Prinzipschaltbild in Abbildung 2.2 veranschaulicht. Über einen Gas-Mischer wird das Luft-Gas-Gemisch in einen wassergekühlten 4-zylindrigen Ottomotor geleitet. Dieser treibt einen wassergekühlten Asynchrongenerator an, der die technischen Bedingungen zum Einspeisen in das Niederspannungsnetz erfüllt.

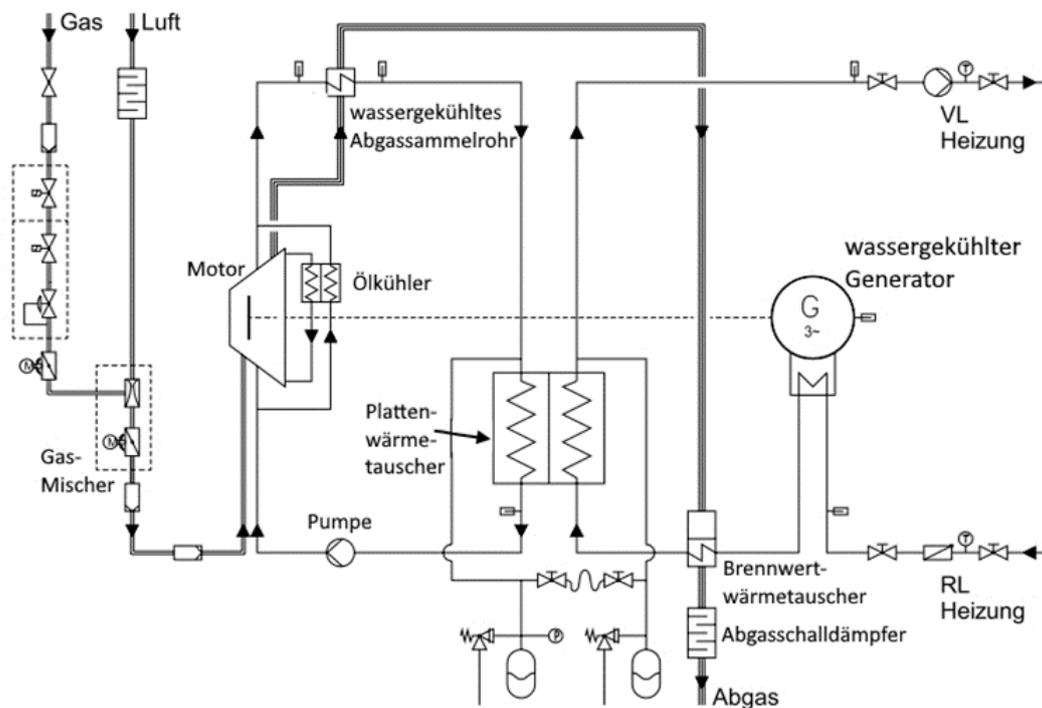


Abbildung 2.2: Prinzipschaltbild des internen Hydraulikkreislaufs - Gasbefeuertes Brennwerts-BHKW Mephisto G16+ (in Anlehnung an [33])

Die Heizwasseraufwärmung erfolgt zunächst im Öl- und Zylinderkühlwasserwärmetauscher. Die Restaufwärmung im Primärkreislauf (Motorkreislauf) findet in einem Abgaswärmetauscher statt. Nachgeschaltet erfolgt in einem Plattenwärmetauscher die Wärmeübertragung an den Sekundärkreislauf (Heizungskreislauf). Abschließend entzieht der Brennwerts-Wärmetauscher dem

Abgas weitere Restwärme [33]. Hierbei kühlt sich das Abgas bis auf wenige Grad über die heizungsseitige Rücklaufemperatur ab. Unterschreitet das Abgas dabei seinen Taupunkt, beginnt der in ihm enthaltene Wasserdampf zu kondensieren. Mit der so ausgekoppelten Kondensationswärme kann das BHKW Gesamtwirkungsgrade über 100 % erreichen. Je nach zugehörigem Heizungssystem erfolgt so ausgehend von üblichen Rücklaufemperaturen von ca. 50 bis 70°C eine Aufheizung des Heizwassers auf 90 bis 110°C. Minimale Temperaturspreizungen von 20 Kelvin sind die Regel [47].

Die hydraulische Einbindung des BHKW erfolgt oft in den Rücklauf des Heizungssystems zur Anhebung der Temperatur. Kann so ein ausreichendes Temperaturniveau zur Deckung des Wärmebedarfs erreicht werden, wird das Heizwasser zu den Verbrauchern zurückgeleitet. Andernfalls kommt ein Heizkessel zur Anhebung auf die Solltemperatur zum Einsatz [47].

BHKWs werden entweder mit Otto-Motoren oder Dieselmotoren betrieben. Otto-Motoren zeichnen sich dabei durch einen guten elektrischen Wirkungsgrad auch im Teillastbereich bis 50 % der Nennlast aus. Hier liegt oft die kleinste mögliche Leistung eines Aggregates, der sogenannte Kleinstlastpunkt. Unterhalb dieser Mindestleistung schaltet sich die Anlage ab. Als Brennstoff können gasförmige Energieträger wie u.a. Erdgas, Flüssiggas oder Klärgas genutzt werden. Dabei können Otto- und Diesel-Motoren im Mehrbrennstoffbetrieb auch mit Gasen unterschiedlicher Methanzahl arbeiten und ermöglichen eine weitgehend rußfreie Verbrennung. BHKWs mit Diesel-Motoren lassen neben den zuvor genannten gasförmigen Brennstoffen die Verwendung flüssiger Brennstoffe (z.B. Heizöl EL) zu. Das Abgas ist stärker als beim Otto-Motor mit Russ und Schwefel belastet, was den Einsatz einer Rauchgasreinigung erforderlich macht. In Bezug auf das Teillastverhalten schneidet der Diesel-Motor im Vergleich zum Otto-Motor ungünstiger ab. Der Betrieb unterhalb von 70 % der Nennlast sollte vermieden werden . Die Motoren sind dafür ausgelegt, innerhalb von wenigen Minuten ihre Nennleistung zu erreichen [47].

Betriebsarten

Die meisten BHKWs werden wärmeorientiert betrieben. Die stromorientierte Betriebsweise gewinnt aber zunehmend an Bedeutung. Hintergrund ist, dass durch die zunehmende Zahl dezentraler Energieerzeuger, BHKWs zur Erbringung von Regelenergie genutzt werden können. Sowohl strom- wie wärmeorientierte Betriebsweisen sind in Sonderfällen denkbar [47]. Wichtige Aspekte beider Betriebsweisen werden im Folgenden kurz skizziert.

Stromorientierter Betrieb:

- Auswahl, Auslegung und Betrieb der Anlage erfolgt nach dem elektrischen Energiebedarf;
- Bereitstellung unzureichender thermischer Energie mittels Kesselanlagen;
- Vermeidung eines Wärmeüberschusses bei der Auslegung.

Wärmeorientierter Betrieb:

- Auswahl, Auslegung und Betrieb der Anlage erfolgt nach dem thermischen Energiebedarf;
- Ausgleich von zu hoher oder niedriger Stromerzeugung durch das öffentliche Netz;
- Abdeckung der Wärmespitzenlast in der Regel durch Kesselanlagen;
- Auslegung nach Wärmegrundlast mit Hilfe der Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs;
- Vorteile in Bezug auf Einsparungen von Primärenergie und CO₂-Emissionen gegenüber der Wärmeerzeugung in Kesselanlagen.

BHKW-Kennzahlen

Zur Beurteilung der Effizienz im Auslegungszustand des Blockheizkraftwerks sind u.a. die theoretisch erreichbaren Wirkungsgrade relevant. Diese werden leistungsbezogen berechnet. Ist eine Anlage in Betrieb, werden häufig arbeitsbezogene Nutzungsgrade zur Beurteilung der realen Effizienz in einem Kontrollzyklus von zwölf Monaten ausgewertet [8]. Typischerweise liegen die Werte des sich ergebenden Jahresnutzungsgrades ein bis zwei Punkte unter den entsprechenden thermischen und elektrischen Wirkungsgraden [47]. In dieser Arbeit werden die folgenden leistungsbezogenen Kennzahlen angewandt:

Elektrischer Wirkungsgrad

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{br}} \quad (2.1)$$

Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{br}} \quad (2.2)$$

Gesamtwirkungsgrad

$$\eta_{ges} = \frac{P_{th} + P_{el}}{P_{br}} \quad (2.3)$$

Stromkennzahl

$$\sigma_p = \frac{P_{el}}{P_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (2.4)$$

Anhand der Wirkungsgrade lassen sich der thermische Nutzen, der elektrische Nutzen sowie der Gesamtnutzen zum jeweiligen Brennstoffaufwand darstellen. Eine weitere wichtige Größe ist die Stromkennzahl, die das Verhältnis von elektrischer zur thermischen Leistung ausdrückt.

Allgemein sinkt der elektrische Wirkungsgrad eines BHKWs mit abnehmender Last, während der thermische Wirkungsgrad ansteigt. Auch die Stromkennzahl nimmt im Teillastbereich ab. Weiterhin ist die Höhe des thermischen und elektrischen Wirkungsgrads abhängig von der Leistungsgröße der Motoraggregate, wohingegen sich der Gesamtwirkungsgrad nur geringfügig ändert. In der Regel bedeutet eine Verringerung des elektrischen Wirkungsgrads eine Verbesserung des thermischen Wirkungsgrads [8].

Dimensionierung von BHKWs

Zentrales Kriterium für die Dimensionierung eines BHKWs ist heutzutage die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Doch auch die ökologischen Aspekte nehmen bei der Anlagenauswahl durch die zunehmende politische Relevanz im Rahmen der Klimaerwärmung mehr Raum ein. Allgemein führt die Überdimensionierung zu einem höheren Teillastbetrieb bei schlechteren Wirkungsgraden. Auch kann es zu einem Taktbetrieb kommen. Durch häufiges Takten reduziert sich die Lebenszeit der Anlagenkomponenten und die Wirtschaftlichkeit sinkt. Im Sinne eines wirtschaftlichen Betriebes ist es sinnvoller, die Anlage zu klein auszulegen. Zudem sind lange Laufzeiten ohne häufiges An- und Abschalten sowie eine möglichst konstante Rücklauf­temperatur erstrebenswert. Ein möglichst durchgehender Betrieb des BHKWs kann durch Wärmespeicher zur Entkopplung der Wärmeerzeugung und des Wärmebedarfs erreicht werden. Zur Auslegung der Anlage wird in der Regel die in Abbildung 2.3 gezeigte Jahresdauerlinie des thermischen Wärmebedarfs herangezogen [47].

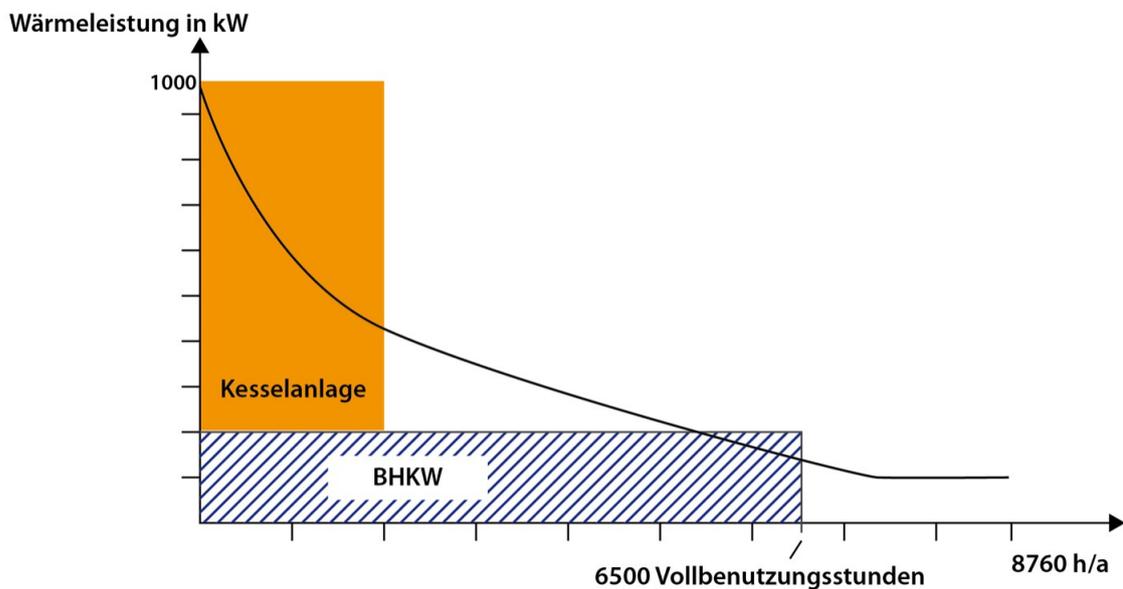


Abbildung 2.3: Beispiel für BHKW-Auslegung anhand der geordneten Jahresdauerlinie (in Anlehnung an [8])

2.1.2 Wärmepumpen

Als Wärmepumpen werden Systeme bezeichnet, bei denen elektrisch oder mechanisch angetriebene Pumpen Nutzwärme aus einer Niedertemperaturquelle erzeugen. Wärmepumpen werden häufig zur Warmwasserversorgung und zum Heizen von Gebäuden oder zur Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie verwendet [57]. Der Hauptvorteil von Wärmepumpen wird darin gesehen, dass ein Mehrfaches an Wärmeenergie gewonnen werden kann, als an Energie zum Antrieb der Pumpe dem System zugeführt werden muss [21]. Wärmepumpen lassen sich nach drei Funktionsprinzipien unterscheiden.:

- Absorptions-Wärmepumpen,
- Kompressions-Wärmepumpen,
- Adsorptions-Wärmepumpen.

Der in dieser Arbeit gesetzte Fokus liegt auf der Modellierung einer Kompressions-Wärmepumpe, weshalb die anderen Technologien nicht tiefer betrachtet werden.

Die Umweltbilanz von elektrisch betriebenen Kompressions-Wärmepumpen hängt von der Zusammensetzung des Kraftwerkparcs im deutschen Strommix während der Zeit des Wärmepumpenbetriebs ab. Im Falle des Netzstrombezugs bei einer Kraftwerkzusammensetzung mit einem hohen Anteil an Kohlestrom verschlechtert sich die Umweltbilanz einer Wärmepumpe. Mit dem zunehmenden Ausbau erneuerbarer Energien ist dagegen eine stetige Verbesserung der Ökobilanz von Wärmepumpen zu beobachten [57].

Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip einer Kompressions-Wärmepumpe gleicht dem eines Kühlschranks. Dieser wird jedoch als Kältemaschine betrieben und entzieht seinem isolierten Innenraum die Wärme. Abbildung 2.4 veranschaulicht das Funktionsprinzip einer solchen Kompressions-Wärmepumpe.

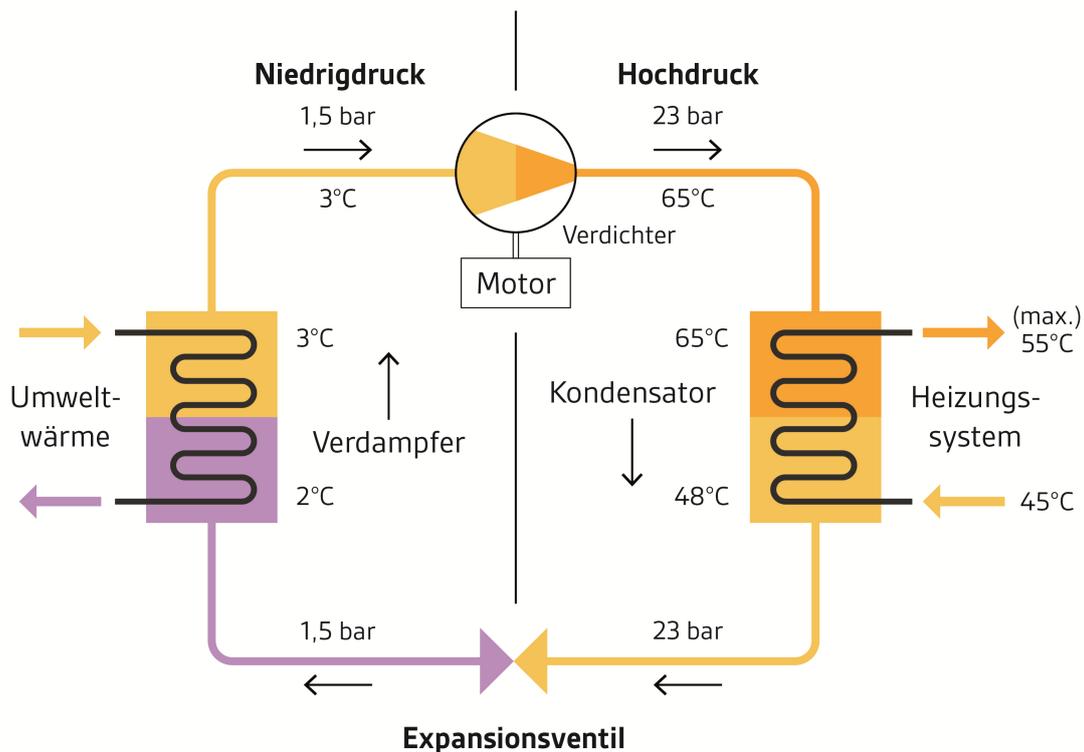


Abbildung 2.4: Prinzip der Kompressions-Wärmepumpe (in Anlehnung an [26])

Ein Kältemittel dient in dem geschlossenen Kreislauf als Arbeitsfluid und durchströmt während des Betriebs die vier Komponenten: Verdampfer, Verdichter, Kondensator und Expansionsventil. Der Prozess beginnt mit der Übertragung von Umweltwärme im Verdampfer auf das

Kältemittel, wodurch dieses zu verdampfen beginnt. Im gasförmigen Zustand wird das Kältemittel von dem Verdichter angesaugt und auf ein höheres Druck- und Temperaturniveau gehoben. Angetrieben wird der Verdichter durch einen Elektromotor oder einen Benzin- bzw. Gasmotor. Anschließend strömt das heiße Gas zum Kondensator, der einen Wärmetauscher darstellt. Durch das Unterschreiten des Taupunktes des Kältemittels kommt es zu seiner Kondensation. Die Wärme auf hohem Temperaturniveau kann als Nutzwärme an ein Fluid, beispielsweise an das Heizwasser eines Heizungskreislaufes oder an die Raumluft, übertragen werden. Im verflüssigten Zustand wird das Kältemittel nun über ein Expansionsventil entspannt, wodurch es sich abkühlt und zum Verdampfer zurück gelangt [26].

Die in Kompressions-Wärmepumpen eingesetzten Kältemittel sind meist sogenannte Fluorkohlenwasserstoffe (FKWs), die auch im negativen Celsiusbereich verdampfen. Besonders zu beachten beim Einsatz von FKWs ist, dass diese ein mehr als 1000-fach höheres Teibhauspotential als CO_2 besitzen [57].

Wärmepumpen-Kennzahlen

Um die Effizienz einer Wärmepumpe zu beurteilen, wird die Leistungszahl ε herangezogen. Sie gibt das Verhältnis von nutzbarem Wärmestrom \dot{Q}_N zu der Antriebsleistung des Verdichters P_V an. Dabei findet der aufgenommene Wärmestrom aus der Umwelt keine Berücksichtigung, da er frei zur Verfügung steht und in diesem Sinne keinen Aufwand darstellt [57].

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_N}{P_V} \quad (2.5)$$

Nach Carnot lässt sich der ideale Wärmepumpenprozess beschreiben. Die Carnot-Leistungszahl ε_C stellt eine obere Grenze für die real zu erreichende Leistungszahl einer Wärmepumpe dar. Bestimmt werden kann sie nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik über das Temperaturniveau der Umweltwärmequelle T_U und das zu erreichende Temperaturniveau des Heizungsverlaufes T_N [57].

$$\varepsilon_C = \frac{T_N}{T_N - T_U} \quad (2.6)$$

Leistungszahlen im realen Betrieb fallen deutlich geringer als im idealisierten Carnot-Prozess aus, was aus Abbildung 2.5 ersichtlich wird. Zudem zeigt sich, dass Leistungszahlen umso höher ausfallen, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequellentemperatur und Vorlauf-temperatur des Heizungssystems ist. Eine hohe Wärmequellentemperatur sowie eine niedrige Vorlauf-temperatur des Heizungssystems sind dementsprechend erstrebenswert. Besonders eignen sich Wärmepumpen dazu, den Wärmebedarf einer Fußbodenheizung zu decken, da diese niedrige Heizungstemperaturen bis 35°C benötigt [26].

Das Verhältnis zwischen realer und idealer Leistungszahl wird anhand des Gütegrads η beschrieben. Typischerweise werden heutzutage Gütegrade zwischen 0,4 und 0,5 erreicht [57].

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_C} \quad (2.7)$$

Da die Temperaturbedingungen im Jahresverlauf variieren, schwanken auch die Leistungszahlen. Deshalb wird für eine ganzjährige Beurteilung der Effizienz einer Wärmepumpe die sogenannte Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe (JAZ) eingeführt. Sie beschreibt das Verhältnis

der Summe des nutzbaren Wärmestroms zur aufsummierten Leistung für die Verdichtung [57].

$$JAZ = \frac{\sum_a \dot{Q}_N}{\sum_a P_V} \quad (2.8)$$

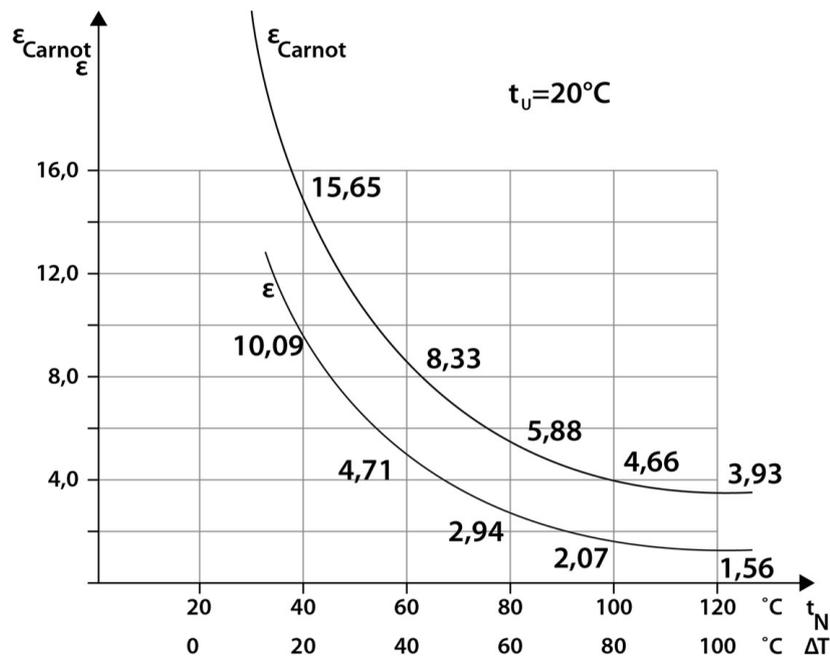


Abbildung 2.5: Abhängigkeit der Carnot-Leistungszahl und der Leistungszahl von der Temperaturdifferenz zwischen Umweltwärme und Heizungsverlauf (in Anlehnung an [21])

Energiepfähle als Niedertemperaturquelle

Ausschlaggebend für das Funktionieren einer Wärmepumpe ist die Niedertemperaturquelle. Anhand dieser meist aus der Umwelt bezogenen Wärme und der Art der späteren Wärmenutzung unterteilt man Wärmepumpen in Luft/Luft-, Luft/Wasser-, Sole/Wasser- oder Wasser/Wasser-Wärmepumpen [57]. Der Bezug von Umweltwärme kann aus folgenden Wärmequellen erfolgen:

- Grund- oder Oberflächenwasser (Wasser/Wasser),
- Erdreich, Erdwärmetauscher (Sole/Wasser),
- Erdreich, Erdsonde (Sole/ Wasser),
- Umgebungsluft (Luft/Wasser),
- Abwärme (Luft/Wasser oder Wasser/Wasser).

Eine weitere Möglichkeit des Bezugs von Umweltwärme aus dem Erdreich besteht in der geothermischen Aktivierung von Gründungspfählen. Gründungspfähle kommen dann zum Einsatz,

wenn die Baugrundbedingungen am Standort unvorteilhaft sind und eine Tiefenründung des Gebäudes notwendig machen [50]. Der Bezug der Umweltwärme über Energiepfähle wird im Rahmen dieser Arbeit betrachtet. In Abbildung 2.6 ist der Aufbau eines Energiepfahls beispielhaft dargestellt. Seine Funktionsweise gleicht der von Erdwärmesonden, mit dem Unterschied, dass die wassertransportierenden Rohre komplett in Beton eingegossen sind. Im Vergleich mit Wärmesonden, die vertikal meistens bis in Tiefen von 100 m reichen, überschreiten Energiepfähle selten Tiefen von 20 -30 m. In einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert die Wärmeträgerflüssigkeit zur Wärmepumpe [50].

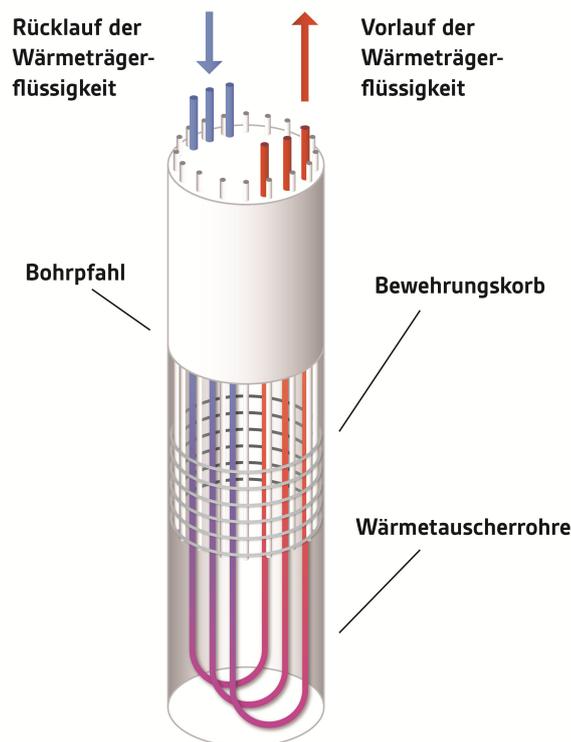


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines Energiepfahls (in Anlehnung an [50])

Zur Abschätzung der Wärmeentzugsleistung bei der Dimensionierung spielen die Pfahlanzahl, Pfahltiefe und der Pfahlabstand sowie die anfallende Heiz- und Kühlarbeit des Gebäudes eine wichtige Rolle. Daneben sind die Kenndaten über die geologische und hydrologische Charakterisierung des Untergrundes zentral. Anhand des geologischen Profils über den sogenannten Teufbereich der Anlage erfolgt vor der Gründung in der Regel eine thermophysikalische Bewertung der Erdschichten. Zur Abschätzung der zu erwartenden Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes werden üblicherweise Tabellenwerte der VDI-Richtlinie 4640 herangezogen [34].

Nach der Richtlinie müssen weiterhin Temperaturgrenzen des Wärmeträgermittels eingehalten werden. Hiernach darf die Temperatur des in die Energiepfähle zurückkehrenden Wärmeträgermediums im Dauerbetrieb (Wochenmittel) den Grenzbereich von ± 12 K Temperaturänderung gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur nicht überschreiten, bei Spitzenlast können es maximal ± 18 K sein [34], [55]. Neben einer Reihe anderer baulicher und technischer Anforderun-

gen der Länder an die Nutzung oberflächennaher Erdwärme muss die Anlage so ausgelegt sein, dass die Einhaltung der Temperaturlimits für einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren gewährleistet ist [6]. Durch diese Maßnahmen soll einer übermäßigen Erwärmung oder Abkühlung des Erdreichs und sinkenden Leistungszahlen der Wärmepumpe vorgebeugt werden. Liegt die Anlage in einem wasserwirtschaftlich sensiblen Bereich (z.B. Wasserschutzgebiet) wird außerdem der Betrieb der Anlage mit dem Wärmeträgermedium Wasser gefordert [34].

2.1.3 Wärmespeicher

Wärmespeicher ermöglichen es, das Wärmeangebot im zeitlichen Verlauf von dem Wärmebedarf zu entkoppeln. Die effiziente Nutzung von Energiequellen, wie industrieller Abwärme oder Sonnenenergie, wird durch Wärmespeicher erst ermöglicht. Bei der Wärmespeicherung werden im Wesentlichen drei physikalische Prinzipien unterschieden [25]:

- Speicherung sensibler Wärme infolge einer Temperaturänderung,
- Speicherung latenter Wärme durch Änderung des Aggregatzustandes,
- Speicherung chemischer Wärme als Bindungsenergie bei Stoffreaktionen.

Als latente Wärme wird die beim Phasenübergang von Stoffen aufgenommene oder abgegebene Wärme bezeichnet, die zu keiner merklichen Temperaturänderung führt. Latentwärmespeicher spielen vereinzelt für dezentrale Anwendungen eine Rolle, besitzen im Bereich der Wärme- und Kältespeicherung aber bisher keine relevante Funktion [25]. Bei der chemischen Wärmespeicherung wird die Reaktionsenthalpie (Reaktionswärme) von Reaktionspartnern ausgenutzt. Der Hauptvorteil chemischer Energiespeicher liegt darin, dass die Reaktionspartner ohne das Auftreten von Wärmeverlusten bei Umgebungstemperatur beliebig lange gelagert werden können [25]. Die bei der Wärmeversorgung von Gebäuden heutzutage am häufigsten zum Einsatz kommenden Systeme sind Speicher für sensible (fühlbare) Wärme. Unter sensibler Wärme wird die Wärmeaufnahme oder -abgabe bezeichnet, die mit einer fühlbaren Änderung der Temperatur verbunden ist [25]. Diesen Zusammenhang beschreibt die folgende Grundgleichung:

$$Q_{sp} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.9)$$

Die speicherbare Wärmemenge Q_{sp} ist abhängig von der Temperaturdifferenz, der Stoffmasse m und der spezifischen Wärmekapazität c_p . Die spezifische Wärmekapazität stellt eine physikalische Stoffeigenschaft dar, die angibt, welche Wärmemenge 1 kg des Stoffes zugeführt werden muss, um seine Temperatur um 1 Kelvin zu erhöhen.

Neben dem physikalischen Prinzip wird zwischen Kurzzeit- und Langzeitspeichern differenziert. Kurzzeitspeicher dienen zur Überbrückung einiger Stunden oder Tage, während Langzeitspeicher (mit einem deutlich größeren Volumen) saisonale Wärmeunterschiede ausgleichen [57].

Abschließend gibt es die Unterscheidung von Wärmespeichern nach ihrem Temperaturbereich. Sogenannte Niedertemperaturspeicher decken Temperaturen kleiner als 100°C ab. Speicher im Temperaturbereich von 100°C und 500°C werden als Mitteltemperaturspeicher bezeichnet. Als Hochtemperaturspeicher wiederum gelten alle Speicher oberhalb von 500°C [57].

In dieser Arbeit werden ausschließlich Kurzzeitspeicher sensibler Wärme in einem Temperaturbereich bis 100°C betrachtet.

Speichermedien

In Heizungsanlagen und bei der Warmwasserbereitstellung wird hauptsächlich Wasser als Speichermedium genutzt. Eine Reihe von Eigenschaften ist hierfür der Grund. Wasser besitzt eine vergleichsweise hohe spezifische Wärmekapazität mit einem Wert von $4,19 \text{ kJ/kgK}$ und eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Das bedeutet beispielsweise, dass es zu einem geringen Energieaustausch durch Wärmeleitung zwischen heißen und kalten Wasserschichten kommt. Neben diesen vorteilhaften Eigenschaften für die Speicherung sensibler Wärme ist Wasser nahezu überall verfügbar, leicht transportierbar und vergleichsweise günstig und nicht giftig [25].

Andere Speichermedien wie Sand, Kies oder Gestein werden bevorzugt für Erdspeicher verwendet. Beton wiederum dient häufig zur Wärmespeicherung in Gebäuden [25].

Direkte Be- und Entladung von Pufferspeichern

Sogenannte Pufferspeicher, auf die sich diese Arbeit bezieht, finden im Bereich der Kurzzeitspeicher von Wärme die häufigste Anwendung. Im Falle der Trinkwassererwärmung wird die indirekte Be- und Entladung über speicherinterne Wärmetauscher angewandt, da eine Trennung zwischen dem Speicherwasser und dem Trinkwasser notwendig ist. Zur Integration der Speicher in ein Heizungssystem kommt im Gegensatz dazu meist eine direkte Be- und Entladung zum Tragen. Das Heizwasser wird von einem Wärmeerzeuger (Wärmepumpe, BHKW, Kessel) erwärmt und über Rohrleitungen direkt in den Speicher geleitet [25]. Abbildung 2.7 zeigt schematisch die Be- und Entladung eines Pufferspeichers.

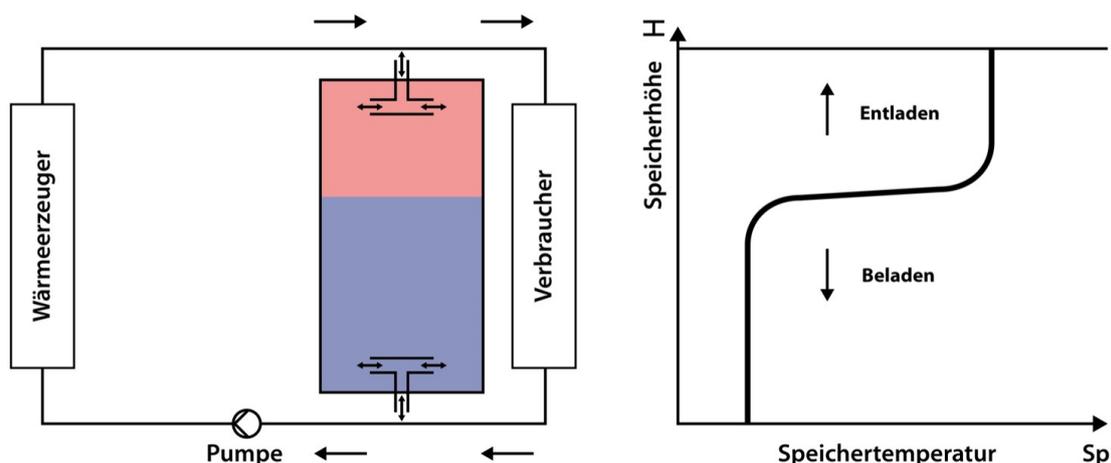


Abbildung 2.7: Pufferspeicher mit direkter Beladung und Entladung (in Anlehnung an [25])

Bei dem Beladungsvorgang drückt heißes Wasser von den Wärmeerzeugern von oben in den Speicher. Gleichzeitig fließt die entsprechende Menge kalten Wassers aus dem unteren Speicherbereich zu den Wärmeerzeugern zurück. Aufgrund seiner geringeren Dichte bildet sich bei optimalen Bedingungen eine nahezu einheitliche Schicht heißeren Wassers im oberen Speicherbereich. Mit fortlaufender Beladung drückt sie sich als Front langsam nach unten. Die Zeitdauer bis zu

einer vollständigen Beladung kann durch intelligente Regelungsansätze zur Flexibilisierung der Wärmeerzeugung dienen. So kann das Aufheizen des Speichers über entsprechende Regelungen auf Zeiten verschoben werden, in denen eine Nutzung des Wärmeerzeugers besonders vorteilhaft ist [25].

Die Entladung erfolgt in umgekehrter Strömungsrichtung. Kälteres Wasser aus dem unteren Speicherbereich wird als Front nach oben gedrückt und ermöglicht die Entnahme des heißen Wassers in den oberen Schichten hin zu den Wärmeverbrauchern. Zentral für die Aufrechterhaltung der Temperaturschichtung im Speicher ist die Begrenzung der Fließgeschwindigkeit des ein- und ausströmenden Wasserstroms. Zusätzlich werden oft sogenannte Prallplatten integriert, um den einfließenden Strom in eine horizontale Richtung abzulenken. So können stärkere Strömungen über die Speicherhöhe unterbunden und eine Durchmischung der Schichten vermindert werden [25].

Wärmeverluste

Die Speicherung sensibler Wärme ist mit unvermeidlichen Wärmeverlusten verbunden, aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebungstemperatur. Wärmespeicher werden deshalb zur Isolierung mit Wärmedämmmaterial ummantelt, um die Wärmeverluste zu vermindern. Die physikalische Grundlage zur Bestimmung der Wärmeverluste beschreibt folgende Gleichung :

$$\dot{Q}_v = U \cdot A \cdot (T_{sp} - T_u) \quad (2.10)$$

Die Wärmeverluste sind abhängig von der Oberfläche des Speichers A , der Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung sowie dem Wärmedurchgangskoeffizienten U . Dieser gibt die Größe des Wärmestroms pro m^2 und Kelvin durch die Wärmedämmung an. Nach der Gleichung:

$$U = \frac{\lambda}{s} \quad (2.11)$$

kann er durch die Dicke der Dämmschicht s und ihrer Wärmeleitfähigkeit λ abgeschätzt werden. Dabei werden die Wärmeübergangswiderstände auf der Innen- und Außenseite des Speichers vernachlässigt. Grund hierfür ist, dass der Koeffizient fast ausschließlich von der Dämmung beeinflusst wird [25].

Zusätzliche Wärmeverluste entstehen häufig an Anschlussstellen für externe Zuleitungen. Besonders kritisch sind Rohrleitungen, die z.B. aus dem oberen Bereich des Speichers zu den Wärmeverbrauchern führen. Wird die zirkulierende Strömung aus dem Speicher eingestellt, kühlt sich das heiße Wasser in den Rohrleitungen ab. Aufgrund des Dichteunterschieds von heißem und kaltem Wasser fließt es dann wieder in den heißen, oberen Teil des Speichers. Solche Rückströmungen können die Wärmeverluste eines Speichers bis zu 50 % erhöhen [25].

Im ruhenden Zustand nimmt die Speichertemperatur nach einer Aufheizung exponentiell ab, weshalb sich über die Zeit auch die Wärmeverluste verringern [57]. Für eine vereinfachte Darstellung der Temperaturänderung lässt sich die in Formel 2.12 dargestellte Differenzialgleichung der Wärmedurchgangsverluste zu einer Funktion der Speichertemperatur nach der Zeit umformen. Eine analytische Lösung der Differenzialgleichung ist unter der Annahme eines homogen durchmischten Wärmespeichers ohne Wärmeaufnahme oder Wärmeentnahme während der Ab-

Bei der energetischen Bilanzierung einer Schicht sind die Wärmetransportmechanismen Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion relevant:

Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist als nicht-stoffgebundener Energietransport durch elektromagnetische Schwingungen (Wellen) charakterisiert. Die Wärmestrahlung wird bei der Modellierung des Schichtenspeichers vernachlässigt [40].

Wärmeleitung

Wärmeleitung stellt einen Energietransport mittels atomarer und molekularer Wechselwirkungen in Festkörpern und Fluiden dar, hervorgerufen durch eine ungleichförmige Temperaturverteilung. Der Fourier'sche Wärmeleitungsansatz liefert die physikalische Grundlage zu ihrer Bestimmung [40].

Konvektion

Konvektion wird auch als Wärmemitführung bezeichnet. Sie beschreibt den massengebundenen Energietransport in einem strömenden Fluid durch die makroskopische Teilchenbewegung. Konvektion tritt stets in Zusammenhang mit Wärmeleitung auf. Abhängig von der Antriebskraft der Konvektionsströmung wird zwischen freier und erzwungener Konvektion differenziert. Da die Temperatur an sich eine skalare Größe darstellt, besitzt sie keine Richtung. Hängt die Temperatur vom Ort ab, wie in einem Schichtenspeichermodell, wird dies als Temperaturfeld bezeichnet. Bei der freien Konvektion sind Strömungs- und Temperaturfeld über den thermischen Antrieb gekoppelt. Die numerische Berechnung wird dadurch erschwert. Bei der erzwungenen Konvektion sind Strömungs- und Temperaturfeld voneinander getrennt. Grund hierfür ist, dass die Antriebskraft durch den äußeren Druck beispielsweise einer Pumpe resultiert [40].

Zwischen den Schichten kommt es also zum Austausch der natürlichen Konvektion und der Wärmeleitung. Die mathematische Modellierung dieser Konvektionsströme kann vereinfacht durch die Anwendung des Fourier'schen Gesetzes über eine effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} abgebildet werden. Für moderne Speicher ohne innere Einbauten liegt die effektive Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Wärmeleitfähigkeit von Wasser [22]. Nach dem Ansatz der Fourierrechnung ergibt sich der Nettowärmestrom \dot{Q}_f für die Schicht i aus der Differenz der beiden Wärmeströme der umgebenden Schichten $i+1$ und $i-1$. Nach der Umformung lässt sich der Nettowärmestrom der Schicht i über die Schichthöhe l_z und die Querschnittsfläche A_q und die auftretenden Temperaturdifferenzen der Schichten bestimmen:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_f &= \dot{Q}_{f,i-1 \rightarrow i+1} - \dot{Q}_{f,i \rightarrow i+1} \\
 &= -\frac{A_q \cdot \lambda_{eff}}{l_z} \cdot (T_{sp,i} - T_{s,i-1}) - \left(-\frac{A_q \cdot \lambda_{eff}}{l_z} \cdot (T_{sp,i+1} - T_{s,i})\right) \\
 &= \frac{A_q \cdot \lambda_{eff}}{l_z} \cdot (T_{sp,i+1} - 2T_{sp,i} + T_{sp,i-1})
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Weiterhin wird die erzwungene Konvektion \dot{Q}_e zwischen den Schichten ausgetauscht. Die Höhe des erzwungenen Wärmestroms von einer Schicht in die andere ist neben der jeweiligen Temperaturdifferenz durch den effektiven Speichermassenstrom \dot{m}_{sp} beeinflusst, der während eines

Zeitschrittes in allen Schichten gleich groß ist. Für die Schicht i ohne externe Anschlüsse ergibt sich die erzwungene Konvektion aus der Summe der Wärmeströme der umgebenden Schichten [22].

$$\begin{aligned}\dot{Q}_e &= \dot{m}_{sp} \cdot c_p \cdot (T_{i-1} - T_i) + \dot{m}_{sp} \cdot c_p \cdot (T_i - T_{i+1}) \\ &= \dot{m}_{sp} \cdot c_p \cdot (T_{i-1} - T_{i+1})\end{aligned}\quad (2.14)$$

Die Gesamtenergiebilanz einer Schicht ergibt sich aus den Wärmedurchgangsverlusten \dot{Q}_v , dem zugeführten Erzeugerwärmestrom \dot{Q}_k , dem entnommenen Verbraucherwärmestrom \dot{Q}_l sowie den konvektiven Wärmeströmen \dot{Q}_f und \dot{Q}_e , die zwischen den Schichten ausgetauscht werden [22].

$$mc \frac{dT_{sp}}{dt} = \dot{Q}_k - \dot{Q}_l - \dot{Q}_v + \dot{Q}_f + \dot{Q}_e \quad (2.15)$$

Eine analytische Lösung der Differentialgleichung ist aufgrund des dynamischen Verhaltens der Erzeuger- und Verbraucherwärmeströme jedoch nicht möglich. Die Anwendung des sogenannten Vorwärtsdifferenzenverfahrens lässt es aber zu, den Temperaturverlauf $T_{sp}(t)$ einer Speicherschicht zum Zeitschritt t aus Werten des vorherigen Zeitschrittes $t - 1$ nach Gleichung 4.16 zu berechnen [22].

$$\begin{aligned}T_{sp}(t) &= T_{sp}(t - 1) + \Delta T(t) \\ &= T_{sp}(t - 1) + \frac{\Delta t}{mc} \cdot (\dot{Q}_k(t) - \dot{Q}_l(t) - \dot{Q}_v(t) + \dot{Q}_f(t) + \dot{Q}_e(t))\end{aligned}\quad (2.16)$$

Das in dieser Arbeit umgesetzte Schichtenspeichermodell wurde in Anlehnung an die vorher erklärten Zusammenhänge entwickelt. Dafür wird der Speicher über seine Höhe in drei gleich große Schichten unterteilt. Die vereinfachte Abbildung 2.9 veranschaulicht die auftretenden Wärmeströme, die in die Gesamtenergiebilanz einer Schicht einbezogen werden.

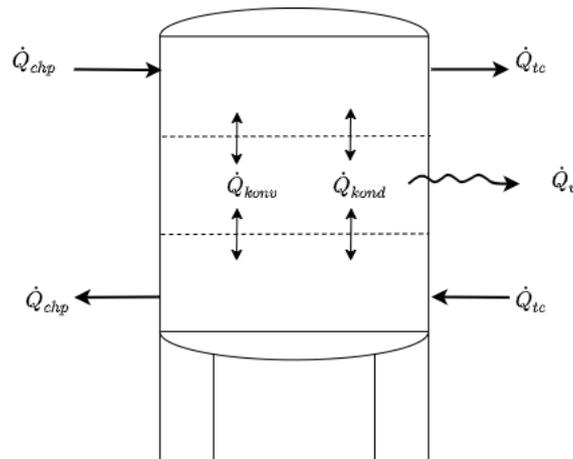


Abbildung 2.9: Auftretende Wärmeströme im Schichtenspeichermodell

2.2 Grundlagen der Optimierung

Optimierungen und Simulationen können dazu beitragen, reale Zusammenhänge in komplexen Systemen besser nachzuvollziehen. Dabei werden reale Entscheidungssituationen in einem mathematischen Modell abgebildet und mit Hilfe von Computer-Software gelöst. Analysen, die mit Hilfe eines solchen Ausschnittes der Realität durchgeführt werden, können eine Grundlage für Entscheidungen schaffen, die im Rahmen komplexer System getroffen werden sollen. Die entwickelten Modelle bedürfen der kritischen Überprüfung auf ihre Praxistauglichkeit [44].

Allgemein besteht ein Optimierungsmodell aus einer Zielfunktion F , die es zu maximieren oder minimieren gilt.

$$z = F(x_1, \dots, x_n) \quad (2.17)$$

Die Nebenbedingungen g_i schränken den Lösungsraum der Zielfunktion ein. Zur Abbildung von Nebenbedingungen können Gleichungen oder Ungleichungen definiert werden.

$$g_i(x_1, \dots, x_n) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} b_i \text{ für } i = 1, \dots, m \quad (2.18)$$

Dabei sind:

n	Anzahl der Variablen,
m	Anzahl der Nebenbedingungen,
$x_j \in \mathbb{R}$	kontinuierliche Variable,
$x_j \in \mathbb{Z}$	ganzzahlige Variable,
$x_j \in \{0, 1\}$	binäre Variable,
$F(x_1, \dots, x_n)$	Zielfunktion,
$F(x_1, \dots, x_n)$	Funktion der Nebenbedingung,
b_i	rechte Seite der Nebenbedingung.

Sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen hängen von den Entscheidungsvariablen x_1 bis x_n ab. Sie können kontinuierliche, ganzzahlige oder binäre Variablen darstellen. Die Entscheidungsvariablen werden in der Regel durch eine untere (x_i^l) und obere Grenze (x_i^u) (engl. lower and upper boundaries) eingeschränkt. Durch die Einschränkung der Entscheidungsvariablen wird letztendlich auch der Lösungsraum limitiert [32].

Die Ergebnisse einer Optimierungsaufgabe stellen nie ein Optimum von allgemeiner Gültigkeit dar. Die sich ergebende Lösungen sind stets ein Optimum in Bezug auf die Zielfunktion, die Nebenbedingungen und die getroffenen Ausgangsbedingungen. So muss das Ergebnis relativ zu seiner Umgebung interpretiert werden [58].

Unter der Vielzahl heutzutage gebräuchlicher Optimierungsarten werden in dieser Arbeit drei wesentliche Techniken angewandt, die im Folgenden kurz charakterisiert werden.

2.2.1 Lineare Optimierung

Die Lineare Optimierung (LP: Linear programming) eignet sich als Optimierungsmethode, wenn die Zielfunktion und alle Nebenbedingungen eines Optimierungsmodells Linearkombinationen der Entscheidungsvariablen sind. Dabei kann eine gegebene Zielfunktion minimiert oder maximiert werden. Die linearen Nebenbedingungen müssen dabei erfüllt bleiben. Historisch gehen die Anfänge der linearen Optimierung auf Probleme der Logistik-Optimierung vor und während des 2. Weltkriegs zurück, bei denen sich die Frage nach der optimalen Zuteilung knapper Ressourcen stellte. Seither haben LP-Modelle im Rahmen von wirtschaftlichen Entscheidungen in Unternehmen großen Einzug gehalten. Klassische Anwendungen sind die Optimierung einer Tourenplanung eines Lieferservices oder die Planung des Güterverkehrs zwischen Produzenten und Käufern. Bewährte numerische Lösungsverfahren wie das Simplex-Verfahren oder das Innere-Punkte-Verfahren können nach endlich vielen Schritten eine exakte Lösung, das globale Optimum, eines mathematisch abstrakten Modells finden [44].

2.2.2 Gemischt-ganzzahlige Optimierung

Eine Erweiterung der linearen Optimierung stellt die Ganzzahlig lineare Optimierung (MILP: Mixed-integer linear programming) dar. Viele reale Prozesse lassen sich nur als ganzzahlige Variable beschreiben, wie beispielsweise die Anzahl von Menschen oder Maschinen oder typische Ja- und Nein-Entscheidungen. Ein Energieerzeuger kann sich in einem eingeschalteten oder ausgeschalteten Zustand befinden, aber nicht dazwischen. Damit unterscheidet sich die lineare von der gemischt-ganzzahligen Optimierung dadurch, dass zusätzliche Bedingungen einige Variablen als ganzzahlig akzeptieren. Programmiertechnisch werden u.a. sogenannte binäre Variablen zur Abbildung solcher Problemstellungen genutzt, wodurch eine Variable diskret und nicht mehr kontinuierlich dargestellt wird. Durch die Anwendung binärer Variablen in Optimierungsmodellen steigt aber die Anzahl möglicher Lösungen üblicherweise exponentiell an, weshalb die Findung einer optimalen Lösung sich erschwert. Durch die Entwicklung spezieller Suchstrategien, wie zum Beispiel dem Branch-and-Bound-Verfahren oder dem Branch-and-Cut-Verfahren, konnte der Rechenaufwand zur Findung einer Lösung verbessert werden [44].

Branch-and-Bound-Verfahren

Das Branch-and-Bound-Verfahren stellt eine häufig verwendete mathematische Methode dar, mit der optimale Lösungen für gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme gefunden werden [32]. Zur Veranschaulichung des Verfahrens wird von einem gemischt-ganzzahligen Optimierungsproblem P ausgegangen, das zu maximieren ist.

Abbildung 2.10 zeigt die grafische Darstellung des Lösungsraums der Zielfunktion $f(x_1, x_2) = x_1 + 2x_2$, welche durch zwei Nebenbedingungen (blaue Geraden) eingeschränkt wird. Die beiden Entscheidungsvariablen x_1 und x_2 unterliegen der Ganzzahligkeitsbedingung, weshalb alle grauen Punkte mögliche ganzzahlige Lösungen markieren.

Als erster Schritt des Algorithmus wird die Ganzzahligkeitsbedingung der Entscheidungsvariablen aufgehoben, was als lineare Relaxierung des Problems P bezeichnet wird. Damit reduziert sich das Modell auf ein lineares Optimierungsproblem und kann leicht durch bewährte Optimierungstechniken, wie dem Simplex-Verfahren oder dem Inneren-Punkte-Verfahren, in kurzer

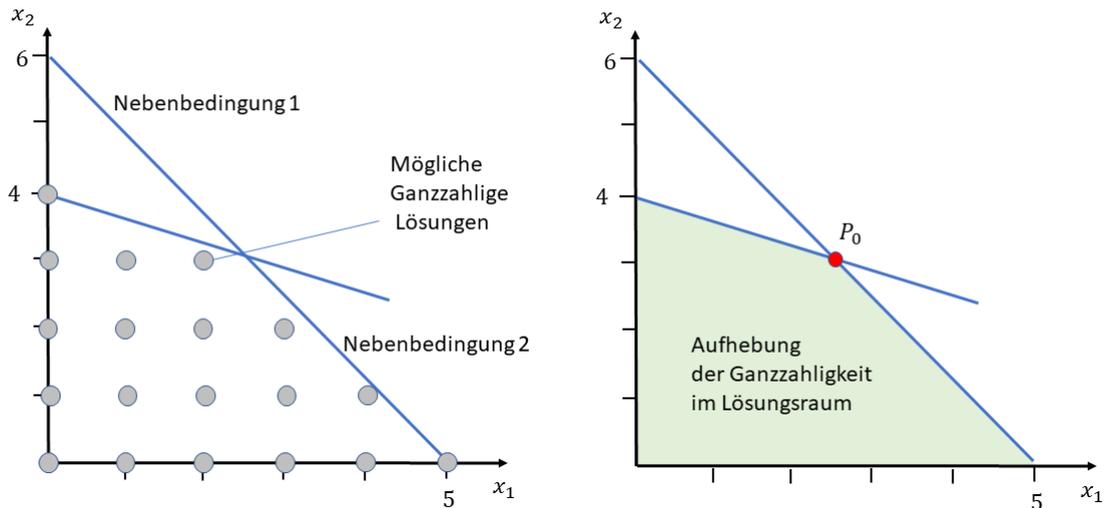


Abbildung 2.10: Grafische Darstellung des Optimierungsproblems P nach [32]

Zeit gelöst werden. Auf diese Weise wird die optimale Lösung für das lineare Problem P_0 von $z = 8,29$ aus $x_1 = 2,65$ und $x_2 = 2,82$ gefunden. Diese Lösung ist jedoch nicht zulässig, da sie nicht ganzzahlig ist [32].

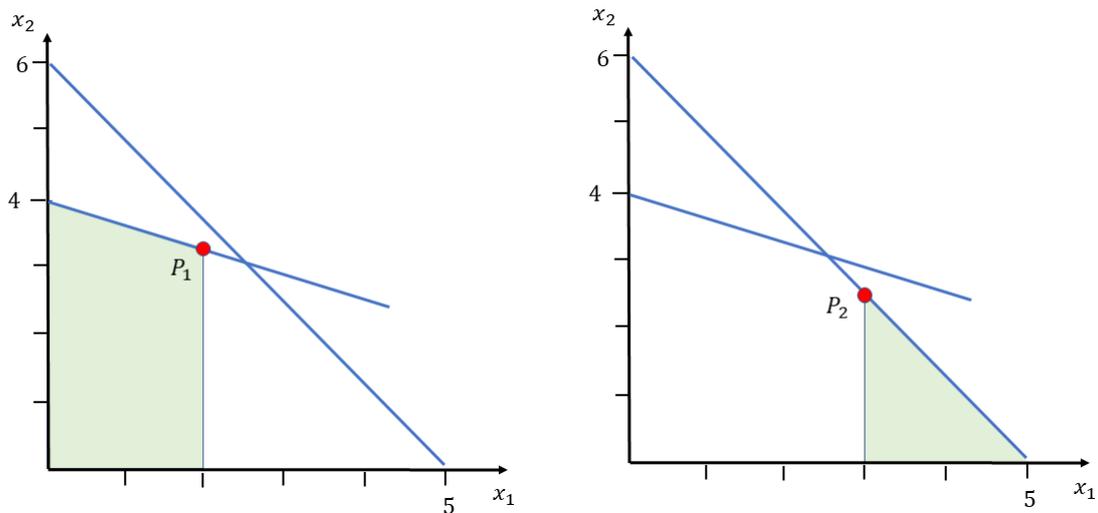


Abbildung 2.11: Zulässigkeitsbereiche der Lösungen P_1 und P_2 nach [32]

Deshalb werden im zweiten Schritt zwei weitere lineare Teilprobleme P_1 und P_2 generiert, wie in Abbildung 2.11 zu erkennen. Dies geschieht, indem der Lösungsraum der ursprünglichen Lösung P_0 , durch das Hinzufügen zweier Nebenbedingungen - $x_1 \leq 2$ für P_1 und $x_1 \geq 3$ für P_2 - weiter eingeschränkt wird. Dieser Prozess der Aufteilung des Gesamtproblems in zwei Teilprobleme wird als "Branching" bezeichnet und ist für das gegebene Problem als sogenannter Entscheidungsbaum in Abbildung 2.12 dargestellt. Als Lösung der beiden Teilprobleme ergibt sich für P_1 ein optimaler Wert $z = 8,22$ und für P_2 ein Wert von $z = 7,80$. Da der rechte Ast des Entscheidungsbaums P_2 einen niedrigeren Wert als P_1 erreicht, wird er nicht weiter für die Suche nach einer optimalen Lösung betrachtet. Dieser Prozess des Ausschließens von Teilproblemen wird als "Bounding" bezeichnet [32].

Es folgt der dritte Schritt. Da für die optimale Lösung P_1 der Wert der Entscheidungsvariablen

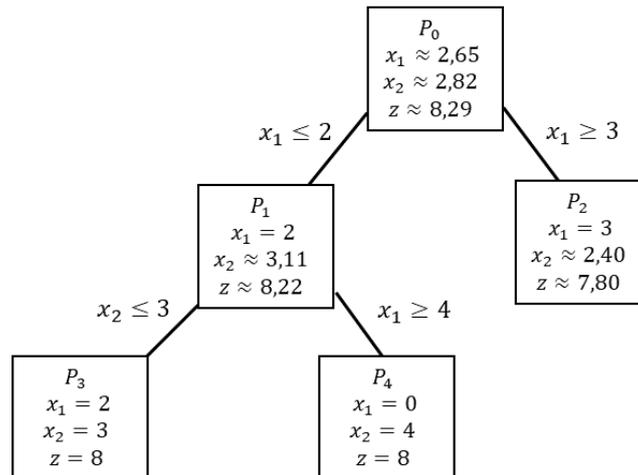


Abbildung 2.12: Entscheidungsbaum für das Problem P nach [32]

x_2 nicht ganzzahlig ist, werden wie zuvor zwei neue Teilprobleme P_3 und P_4 durch die weitere Einschränkung des Lösungsraums erzeugt und gelöst. Danach sind alle Entscheidungsvariablen ganzzahlig, wodurch sich eine optimale Lösung des MILPs von $z = 8$ ergibt [32].

2.2.3 Nichtlineare Optimierung

Eine Nichtlineare Optimierung (NLP: Nonlinear programming) besteht, sobald die Zielfunktion oder die Nebenbedingungen eines Optimierungsmodells nicht lineare Zusammenhänge ausdrücken. In diesem Fall ist die Anwendung der linearen und gemischt-ganzzahligen Optimierung nicht mehr ausreichend [32]. Nichtlineare Modelle sind aufwendiger zu lösen, können aber beispielsweise durch die Anwendung sogenannter "Piecewise-Functions" stückweise linearisiert und gelöst werden [44]. Weiterhin spielen bei der Lösung von NLPs die Fragen der Konvergenz und Bereitstellung guter Startwerte eine Rolle. Ebenfalls führen nicht-konvexe Modelle zur Problematik auftretender lokaler und globaler Optima [30]. Die Problematik lokaler und globaler Optima soll im Folgenden kurz veranschaulicht werden.

Viele mathematische Modelle beinhalten Zielfunktionen, die mehrere lokale Minima aufweisen, von denen nur eines ein globales Minimum darstellt. Optimierungsalgorithmen finden häufig nur das nächstgelegene lokale Minimum. Vor allem ist hierbei die Suchrichtung des Algorithmus relevant, die meist von einem Startpunkt aus immer abwärts zum nächsten Minimum führt. Der Unterschied zwischen einem lokalen und einem globalen Minimum ist für die Güte der Optimierung also entscheidend [58]. Abbildung 7.2 veranschaulicht den zulässigen Lösungsbereich einer Zielfunktion, der einmal durch eine konvexe und ein anderes Mal durch eine nichtkonvexe Nebenbedingung eingeschränkt wird. Das Finden des globalen Minimums kann nur sichergestellt werden, soweit die Konvexität der Zielfunktion und der Nebenbedingungen gewährleistet ist [58].

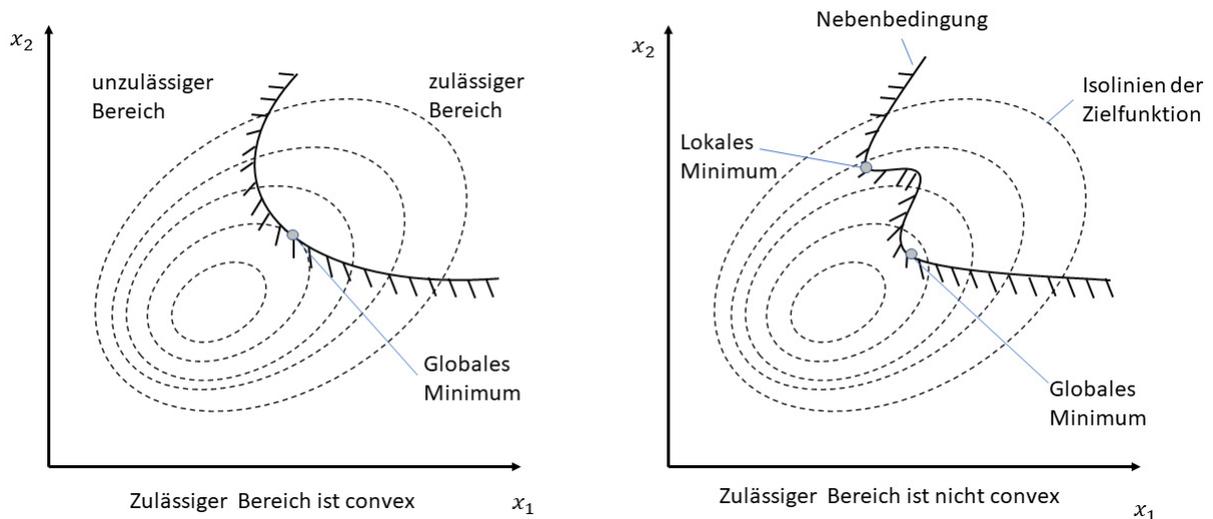


Abbildung 2.13: Konvexität des zulässigen Bereichs einer Funktion nach [58]

2.2.4 Gemischt-ganzzahlig nicht-lineare Optimierung

Eine Ganzzahlige nichtlineare Optimierung (MINLP: Mixed integer nonlinear programming) besteht, wenn Modelle mit ganzzahligen und kontinuierlichen Variablen Zielfunktionen oder Nebenbedingungen besitzen, die nicht lineare Anteile aufweisen. Diese Art der Optimierung findet u.a. häufig in der chemischen Industrie ihre Anwendung, in den letzten Jahren aber auch vermehrt in der Energiewirtschaft. MINLPs gelten als schwer zu lösen, da sie die Problematiken der gemischt-ganzzahligen und nichtlinearen Optimierung übernehmen und zusätzlich eigene Problematiken mit sich bringen. Viele Methoden zur Lösungsfindung von MINLPs lassen sich jedoch aus den bereits erwähnten Techniken der MILP und der NLP ableiten [30].

3 Heizungssystem des Technologiezentrums

Das im Jahre 2015 erbaute Technologiezentrum Energie-Campus ist Teil der fakultätsübergreifenden wissenschaftlichen Einrichtung Competence Center für Erneuerbare Energien und EnergieEffizienz (CC4E) der HAW Hamburg. In die Gebäudeinfrastruktur am Standort in Bergedorf sind verschiedene Technologien integriert, die im Rahmen der Sektorenkopplung, dem Schlüsselkonzept der Energiewende, eine Rolle spielen. Dies ermöglicht die Erforschung der Technologien im Einzelnen und eröffnet die Möglichkeit der Erprobung "intelligente" Regelungsansätze des Anlagenparks, die bei der Vernetzung der drei großen Sektoren Strom-, Wärme und Verkehr derzeit eine Relevanz haben.

3.1 Anlagenpark des Technologiezentrums

Abbildung 3.1 zeigt eine Übersicht des Anlagenparks des Technologiezentrums.

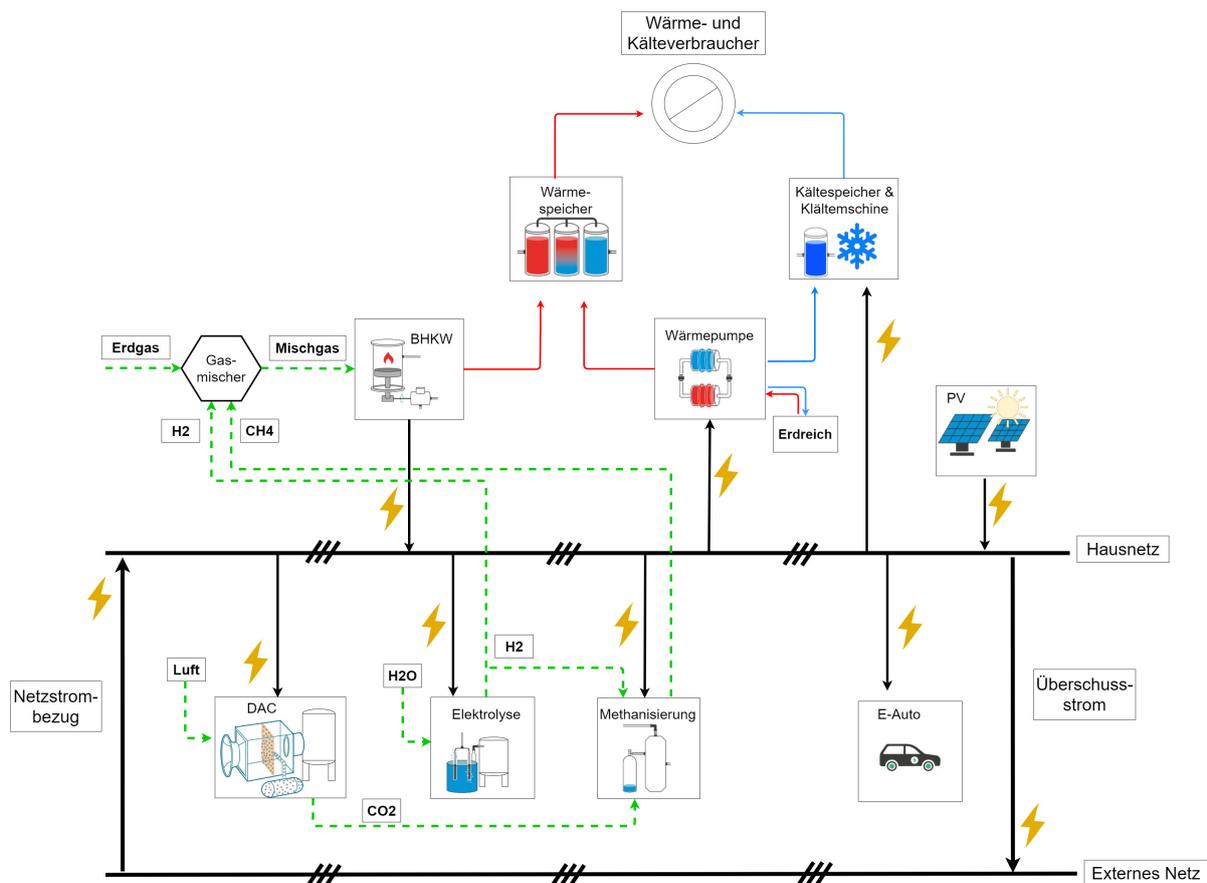


Abbildung 3.1: Vereinfachte schematische Darstellung des Anlagenparks am Technologiezentrum Energie-Campus

Die Stromerzeugung am Technologiezentrum erfolgt mit einer Photovoltaikanlage (PV), bestehend aus verschiedenen Modultypen und mehreren Wechselrichtern sowie einem Blockheizkraftwerk (BHKW), das zusätzlich Abwärme für die Wärmeversorgung des Heizungssystems auskoppelt. Ist der Eigenbedarf der Stromlasten am Energie-Campus gedeckt, werden Überschüsse niederspannungsseitig in das Stromnetz einspeist, wohingegen bei einem Mangel Strom aus dem Netz bezogen wird. Als größter flexibler Stromverbraucher steht ein Elektroauto samt hausinterner Wandladestation zur Verfügung [31].

Als Brennstoff für das BHKW wird Erdgas aus einem Gasnetzanschluss oder ein selbst hergestelltes Mischgas genutzt. Für letzteres steht am Energie-Campus ein Gasmischer zur Verfügung, welcher es zulässt, dem Erdgas eine gewisse Menge Methan (CH_4) und Wasserstoff (H_2) beizumischen.

Methan sowie die Grundstoffe einer biologischen Methanisierung Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid (CO_2) werden am Technologiezentrum selbst hergestellt. Der Wasserstoff stammt aus einem Elektrolyseur. Hier wird unter Einwirkung elektrischer Energie in einem chemischen Prozess Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff aufspaltet. Das Kohlenstoffdioxid wird aus der Umgebungsluft in einer CO_2 -Adsorptionsanlage (DAC: Direct air capture) in zwei Phasen gewonnen. Während der Adsorptionsphase wird mittels eines Ventilators die Umgebungsluft durch einen Reaktor geführt; dabei wird ein Teil des enthaltenen CO_2 an adsorbierenden Substanzen (Amine) gebunden. In der zweiten Phase, der Desorption, folgt die Abtrennung des CO_2 von dem Sorbent bei Unterdruck und unter Wärmezufuhr. Weitergeleitet in einen biologischen Reaktor, der Methanisierung, wandeln Mikroorganismen beide Gase dann zu Methan um. Entsprechende Gasspeicher ermöglichen eine Entkopplung von CO_2 - und Wasserstoffherzeugung von ihrem Bedarf.

Zum Erwärmen des Heizwassers steht neben dem BHKW eine reversible Sole-Wärmepumpe zur Verfügung. Sie bezieht in kalten Jahreszeiten Umweltwärme aus dem oberflächennahen Erdreich und hebt diese durch Zuführen elektrischer Arbeit in einem Verdichter auf ein höheres Temperaturniveau. Im Gegensatz dazu kann sie im Sommer auch "rückwärts" zum Kühlen betrieben werden, wodurch sie dem Gebäude Wärme entzieht und diese dem Erdreich wieder zuführt.

Neben der reversiblen Wärmepumpe gibt es weitere Anlagen und Komponenten, die die Kälteversorgung des Energie-Campus sichern. Dazu zählen eine Kältemaschine, Plattenwärmetauscher sowie Kältespeicher, die in dieser Arbeit aber keine nähere Betrachtung finden.

3.2 Aufbau des Heizungssystems

Das in Kapitel 4 zu entwickelnde Modell des Heizungssystems enthält alle wesentlichen Komponenten des in Abbildung 3.2 dargestellten Heizungssystems des Energie-Campus. Das Heizungssystem soll daher im Folgenden zunächst näher analysiert werden.

Derzeit erfolgt die Wärmeversorgung des Energie-Campus allein durch das wärmegeführte Blockheizkraftwerk, welches im Intervall einen der drei Wärmespeicher belädt. Erst nach der Unterschreitung bestimmter Temperaturgrenzwerte im Speicher startet ein neuer Belade- und Entladezyklus. Die reversible Wärmepumpe ist erst vor kurzem nach langem Stillstand wieder in Betrieb genommen worden. Beide Erzeuger könnten ihre Wärmeenergie in drei Pufferspeichern auslagern und ermöglichen somit auch stromgeführte Betriebsweisen aufgrund der zeitlichen

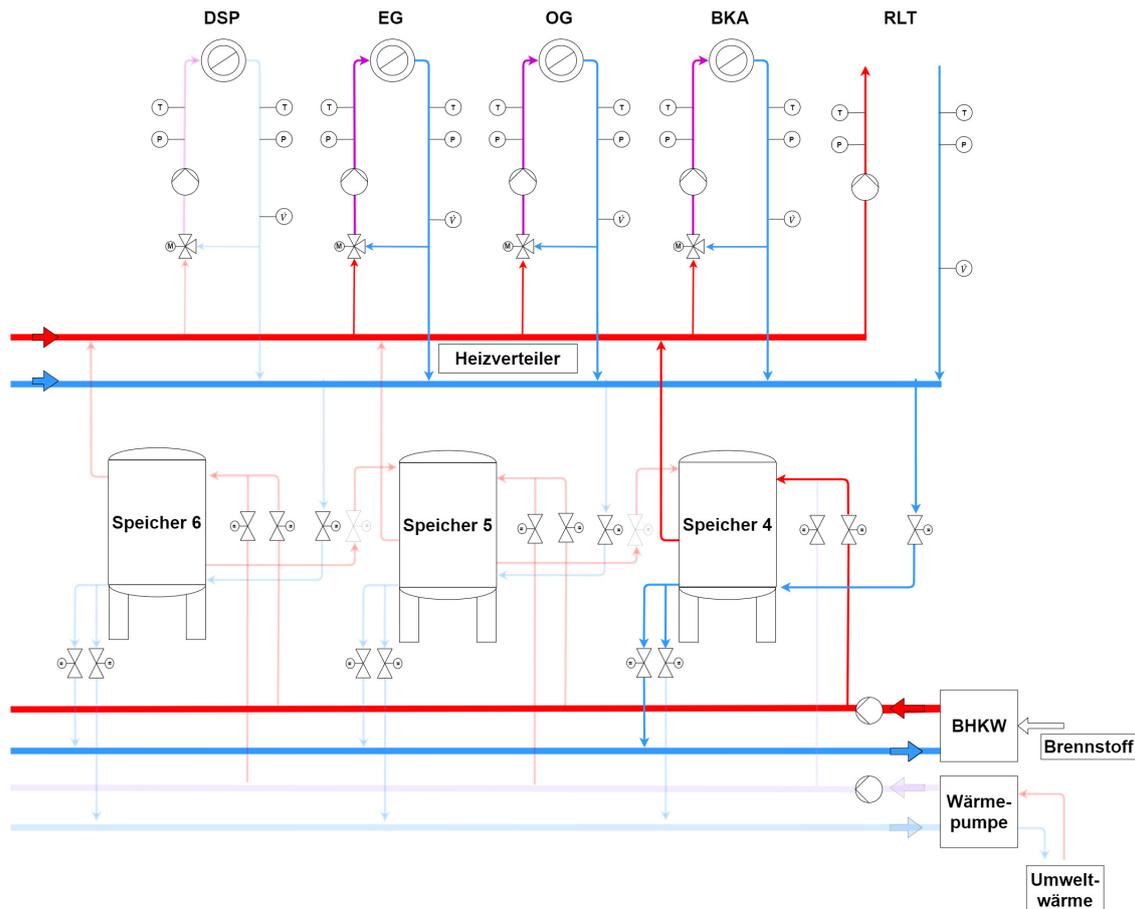


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Heizungssystems des Technologiezentrums

Entkopplung von Wärmeerzeugung und -verbrauch. Im Rahmen des Forschungsbetriebs ist es möglich, die drei Speicher in beliebiger Weise miteinander zu verschalten. Für den Fall einer unzureichenden Wärmeversorgung stehen in jedem Wärmespeicher je ein Elektroheizstab als Backup zur Verfügung. Getrennt vom Heizungssystem werden Durchlauferhitzer zur Trinkwassererwärmung genutzt [31].

Die Wärmeverbraucher werden über einen Heizverteiler mit Wärme versorgt, der wiederum an die Wärmespeicher gekoppelt ist. Insgesamt werden so die folgenden fünf Heizkreise versorgt:

- Deckenstrahlplatten (DSP): Flächenheizung zum Beheizen der Werkhalle (derzeit ungenutzt);
- Erdgeschoss (EG): Heizkörper zur Beheizung der Büro- und Seminarräume;
- Obergeschoss (OG): Heizkörper zur Beheizung der Büro- und Seminarräume;
- Raumlufttechnik (RLT): dient zur Lüftung sowie Klimatisierung der Gebäuderäume; über einen Erhitzer wird die in das Gebäude strömende Außenluft in der Wärmerückgewinnung (Kreuzstromwärmetauscher) der Lüftungsanlage auf das gewünschte Raumklima erwärmt.
- Betonkernaktivierung (BKA): Flächenheizung oder -kühlung; wasserführende Rohrleitungen sind in Decken, Böden oder Wänden verlegt, um die Speichermasse des Betons zum Heizen oder Kühlen der Räume zu aktivieren; Beton nimmt Wärme des zirkulierenden Wassers auf und gibt sie mit einer Zeitverschiebung an die Räume wieder ab.

Zur Förderung eines bestimmten Heizwasserstroms von den Wärmeerzeugern zu den Wärmespeichern oder von den Speichern in die jeweiligen Heizkreise werden drehzahlregelte Heizungsumwälzpumpen verwendet. Die elektrische Regelung der Drehzahl dieser Pumpen ermöglicht es, die zu fördernde Wassermenge dem tatsächlichen Wärmebedarf anzupassen und dabei den nötigen Förderdruckbedarf (Pumpenförderhöhe) zur Überwindung des Widerstandes des Rohrleitungsnetzes bereitzustellen [31].

3.3 Heizungsregelung

Der laut Arbeitsstättenverordnung geltende Temperatursollwert von 20°C in Büroräumen [9] wird über eine sog. außentemperaturgeführte Vorlauftemperatur-Regelung des Heizungssystems am Technologiezentrum sichergestellt. Hierfür stehen die Messwerte zweier Außentemperaturfühler im Norden und Süden des Gebäudes sowie Vorlauftemperaturfühler in den fünf Heizkreisen zur Verfügung. Anhand von Heizkennlinien oder -kurven wird der umgekehrt proportionale Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und der Raumtemperatur dargestellt und ergibt einen Sollwert für den Vorlauftemperaturregler [48]. Die in Abbildung 3.3 veranschaulichte Heizkurve des Obergeschosses macht deutlich, dass infolge einer sinkenden Außentemperatur die steigenden Transmissionsverluste aus dem Inneren des Gebäudes über die Außenwände ausgeglichen werden müssen, was durch eine Anhebung der Vorlauftemperatur des Heizkreises geschieht.

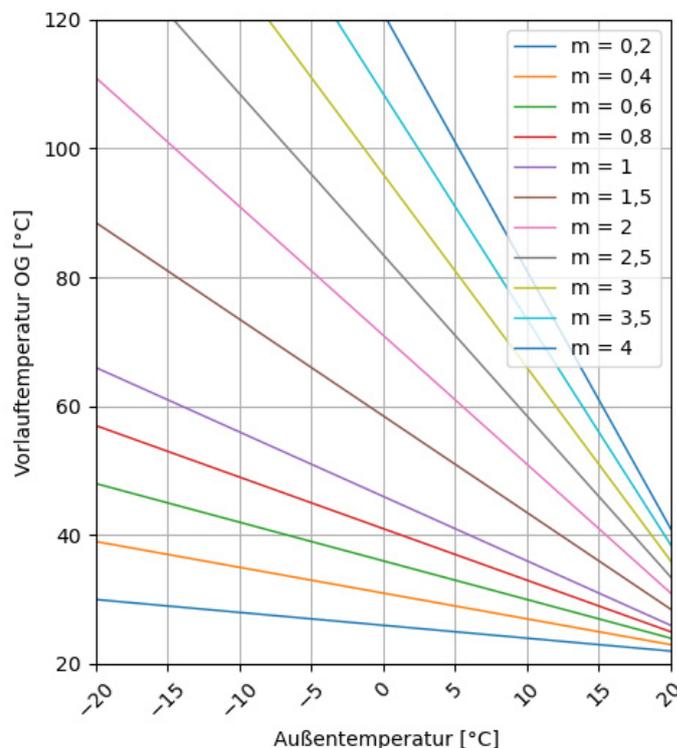


Abbildung 3.3: Heizkennlinie des Obergeschosses

Welche Vorlauftemperatur bei welcher Außentemperatur notwendig ist, wird durch die Wärmedämmung des Gebäudes, durch die Art der Wärmeabgabe (Radiatoren, Fußbodenheizung), seinen Standort (Sonnen- und Windeinflüsse), durch den Anfangspunkt und die Steilheit der

Neben der bereits genannten Vorlauftemperatureinstellung über Heizkennlinien für die Heizkreise Obergeschoss (OG), Erdgeschoss (EG) und Deckenstrahlplatten (DSP) werden die Vorlauftemperaturen der Betonkernaktivierung (BTA) und der Raumluftechnik (RLT) direkt eingestellt. Bei der BTA wird der Temperaturwert gewählt, der der gewünschten Raumtemperatur entspricht. Vermittelt über den Betonkern des Gebäudes und einer gewissen Trägheit sorgt die BTA so für die Grundtemperierung des Gebäudes und wird im Sommer auch zur Kühlung genutzt. Das Gleiche gilt für die Lüftungsanlage. Hier wird auch die gewünschte Raumtemperatur vorgegeben, unabhängig von der Außentemperatur. Im Kühlbetrieb werden der Kältespeicher und im Heizbetrieb die Wärmespeicher für die BTA genutzt. Die Temperaturregelung passiert auch hier über Rücklaufbeimischung [31].

3.4 Gebäudeleittechnik

Zur Überwachung, Regelung und Steuerung der Energiesysteme am Technologiezentrum dient eine Gebäudeautomatisierung, die eine Kommunikationsstruktur voraussetzt. Die Gebäudeautomatisierung lässt sich in Anlehnung an Keys in drei Ebenen unterteilen [31].

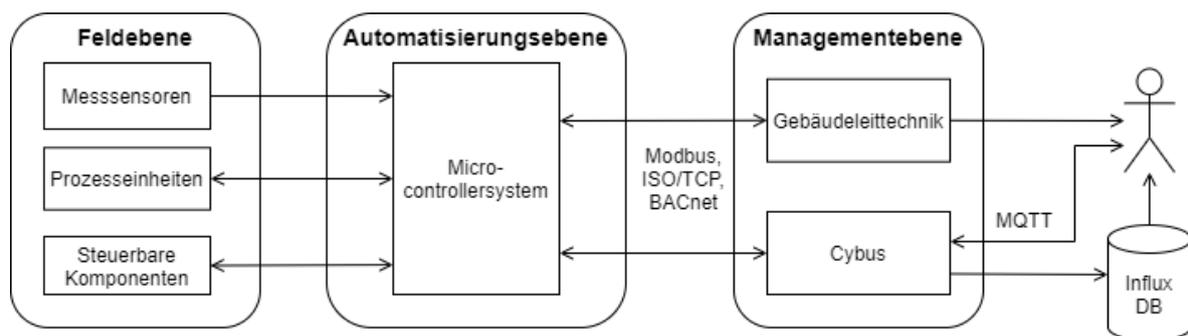


Abbildung 3.5: Vereinfachtes Schema der Gebäudeautomatisierung (in Anlehnung an [31])

Die Kommunikation zwischen den Ebenen funktioniert über mehrere Kommunikationsprotokolle (u.a. Modbus, ISO/TCP, BACnet, OPC und MQTT). Die Feldebene umfasst die am Technologiezentrum vorhandene Messtechnik bestehend aus einer Vielzahl von Messsensoren u.a. zur Temperatur-, Durchfluss- und Druckmessung sowie aus steuerbaren Komponenten wie Klappen, Ventilen, aber auch ganzen Prozesseinheiten. Die Automatisierungsebene stellt eine Schnittstelle zwischen Feld- und Managementebene dar, um die Betriebseinheiten beider Ebenen miteinander zu vernetzen. Auf der Managementebene gibt es eine Trennung zwischen dem Forschungsbetrieb sowie der Verwaltung und Instandhaltung der Gebäudeinfrastruktur durch das Facility Management (FM). Beide nutzen unterschiedliche Kommunikationslösungen, wobei für den Forschungsbetrieb, der in dieser Arbeit eine Relevanz hat, Cybus als sogenannte Kommunikationsoberfläche bereitsteht. Mithilfe von Cybus lassen sich die Maschinendaten der Feldebene übersetzen und per Internetschnittstelle über das MQTT-Protokoll von Mitarbeitern und Studenten im Forschungsbereich abonnieren. Auch die Steuerung der Anlagen ist hierüber möglich. Zur Langzeitdatenspeicherung überträgt Cybus alle relevanten Messdaten in eine zeitreihenbasierte Influx-Datenbank. Über die Web-Anwendung Grafana, ein Programm zur grafischen Darstellung von Daten, können dann alle Prozesse im Gebäude in live oder retrospektiv nachvollzogen werden. Auch die Datengrundlage dieser Arbeit basiert im Wesentlichen auf his-

torischen Zeitreihen aus der Influx-Datenbank.

Das FM nutzt eine separate Software als Gebäudeleittechnik (GLT) zur Visualisierung der technischen Vorgänge im Gebäude als auch zur Steuerung aller Komponenten auf der Feldebene. Weitere Details lassen sich aus Keys Arbeit [31] entnehmen.

4 Entwicklung des Optimierungsmodells

In diesem Kapitel wird ein Modell für einen stromgeführten Betrieb der Wärmeerzeugung am Technologiezentrum entwickelt. Die Grundlage für das Modell bildet eine gemischt-ganzzahlig nicht-lineare Optimierung (MINLP). Einleitend wird die Frage beantwortet, warum diese Art der Optimierung zielführend für die Lösung des vorliegenden Optimierungsproblems ist. Bei der Modellentwicklung wird zwischen zwei Varianten unterschieden. Zuerst erfolgt die Darstellung der Grundoptimierung, bestehend aus BHKW, Wärmespeicher und Wärmeverbraucher. Anschließend erfolgt die Darstellung der erweiterten Optimierung, die als zusätzlichen Wärmeerzeuger eine Wärmepumpe beinhaltet. Die Darstellung der Grundoptimierung beginnt mit der Beschreibung der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen sowie der in das Programm eingehenden Parameter und Datensätze. Daran anschließend werden die Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen erläutert. Bei der Darstellung der erweiterten Optimierung werden nur die hinzukommenden Aspekte konkretisiert, die in der Grundoptimierung noch keine Erwähnung fanden.

4.1 Definition des Optimierungssystems

Die Rahmenbedingungen für die Modellierung des in Kapitel 3 ausführlich beschriebenen Heizungssystems sind durch die technischen Daten der vorhandenen Wärmeerzeuger und Verbraucher, durch die eingehenden Umwelteinflüsse und die Situation im Stromnetz abgesteckt. Dabei gilt die Definition des Optimierungssystems für beide Modellvarianten. Die Entwicklung zweier Modelle hat den Hintergrund, dass in Kapitel 5 beide Varianten hinsichtlich des Betriebsverhaltens, der Effizienz und der anfallenden Emissionen miteinander verglichen werden.

Ziel der Optimierung ist es, die jährlichen CO₂-Emissionen der Erzeugeranlagen auf ein Minimum zu reduzieren, bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs und einer möglichst effizienten Betriebsweise der Wärmeerzeuger. Dabei soll das Heizungsmodell so geregelt werden, dass während der Phasen, in denen im lokalen Stromnetz von Bergedorf ein Überschuss an Strom zur Verfügung steht, die Wärmeversorgung möglichst durch die Wärmepumpe sichergestellt wird. In Phasen, in denen im lokalen Stromnetz jedoch ein Strommangel auftritt, also die Stromerzeugung regional unter dem Strombedarf liegt, soll dagegen die Wärmeversorgung am Technologiezentrum durch das BHKW gesichert werden. In beiden Phasen gilt jedoch, dass die Deckung des Wärmebedarfs nicht zwingend in jedem Zeitschritt von einem Erzeuger sichergestellt werden muss. Zur Flexibilisierung des Systems können auch die Wärmespeicher die Deckung des Wärmebedarfs gewährleisten.

Als Eingangsdaten gehen insgesamt vier historische Zeitreihen in die Optimierungsmodelle ein. Auf der Seite der Wärmeerzeuger wird zur Leistungsberechnung der Wärmepumpe die Vorlauftemperatur der Niedertemperaturquelle im Jahresverlauf abgeschätzt. Zum anderen werden Zeitreihen der Heizleistung sowie der Residuallast des Technologiezentrums in die Modelle ein-

gelesen. Von der technischen Seite aus werden die thermischen Leistungsgrenzen (Maximal- und Minimalleistung) der Wärmeerzeuger berücksichtigt, innerhalb derer sich ihre Effizienz verändert und somit die Höhe der CO₂-Emissionen beeinflusst.

Eine Integration der Wärmepumpe in das bestehende Heizungssystem geht mit der Problematik einher, dass beide Wärmeerzeugungsanlagen, Blockheizkraftwerk und Wärmepumpe, auf unterschiedlichen Temperaturniveaus ihre Wärme in dasselbe Heizungssystem einspeisen. Nicht zuletzt das dynamische Verhalten des Be- und Entladens der Wärmespeicher, aber auch die unterschiedlich einzuhaltenden Vorlauftemperaturniveaus der Heizkreise machen es für das zukünftige Fahrplanmodell notwendig, eine Aussage über die Temperaturverläufe und Massenströme in dem geschlossenen Heizungssystem zu erhalten. Innerhalb des Modells kann dies erreicht werden, indem die Temperaturniveaus als auch die Massenströme zwischen den Anlagenkomponenten als variabel definiert werden. Eine lineare Darstellung des Heizungssystems, die ausschließlich auf Leistungs- oder Energiebilanzen zwischen den Erzeugern und Verbrauchern basiert, lässt die Betrachtung dynamischer Massen- und Temperaturverläufe nicht zu, weshalb auf die nichtlineare Optimierung zurückgegriffen wird. Weiterhin machen es die zuvor genannten technischen Rahmenbedingungen erforderlich, dass die Wärmeerzeuger während eines Zeitschrittes der Simulation in oder außer Betrieb sind. Zudem müssen die Mindest- und Maximalleistungen eingehalten werden. Zur Darstellung der Betriebszustände und der Leistungsbereiche werden binäre Variablen aus dem Gebiet der gemischt-ganzzahligen Optimierung genutzt. Die Kombination aus gemischt-ganzzahliger Optimierung und nichtlinearer Optimierung führt zu einem gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Optimierungsproblem (MINLP).

4.2 Vorgehen bei der Modellentwicklung

Das Vorgehen bei der Modellentwicklung ist in Abbildung 4.1 veranschaulicht und erfolgt für beide Optimierungsvarianten auf dieselbe Weise. Die Grundlage der zu entwickelnden Optimierungsmodelle bilden Datensätze aus drei verschiedenen Quellen.

Aufgrund des langen Stillstands der Wärmepumpe am Technologiezentrum sind nicht ausreichend brauchbare Daten über die Niedertemperaturquelle der Wärmepumpe vorhanden. Daher erfolgt die Abschätzung eines Jahresverlaufs aus den Simulationsergebnissen eines Gutachtens zur Leistungsprognose von Energiepfehlen. Daneben gehen der am Technologiezentrum im Jahr 2020 messtechnisch ermittelte Heizleistungsverlauf sowie die Residuallast des Zentrums in das Modell ein. Zuvor werden die Datensätze mit Hilfsprogrammen aufbereitet, um Ausreißer und fehlerhafte Werte herauszufiltern. Ausgangspunkt für die Berechnung eines lokalen Stromnetz-faktors sind Mess- und Prognosedaten über die Stromerzeugung und den Verbrauch in Bergedorf.

Die sich so ergebenden Eingangsdaten werden anschließend als CSV-Dateien (CSV: Comma-separated values) in das für die Optimierung vorgesehene Python-Skript eingelesen. Die Schrittweite zwischen den Datenpunkten wurde mit 15 Minuten gewählt, da dies die kleinste Auflösung darstellt, mit der Prognosedaten erhältlich sind, die für eine spätere Nutzung des Modells eine Rolle spielen.

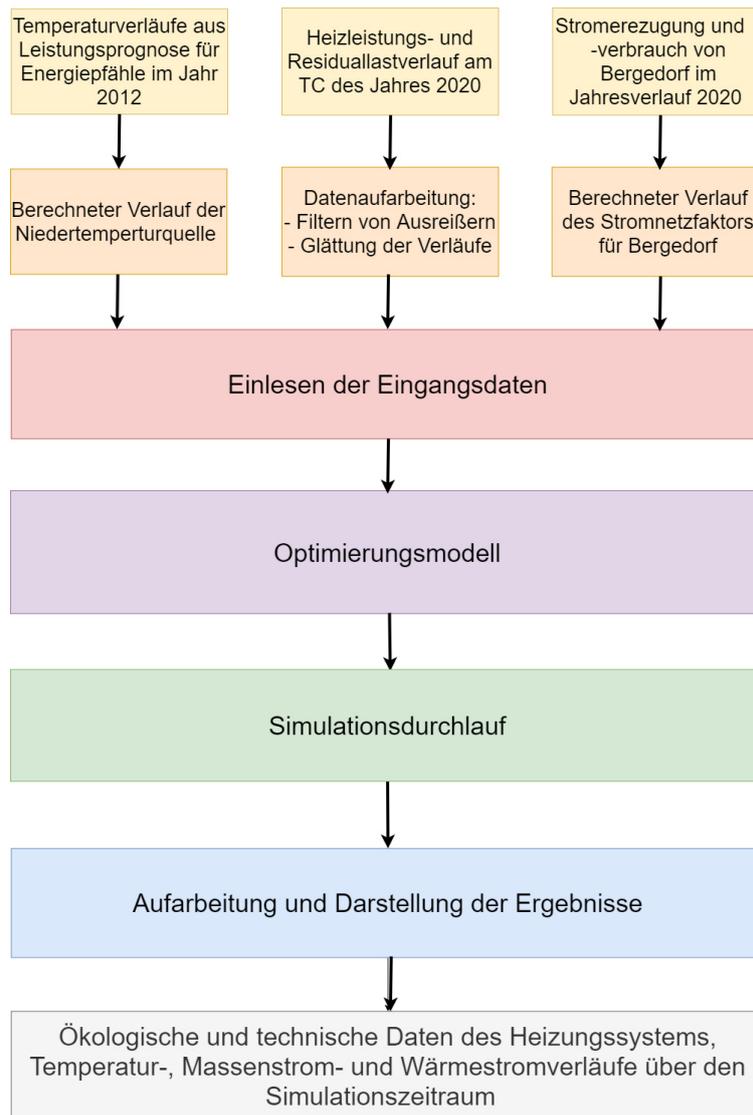


Abbildung 4.1: Vorgehen bei der Modellentwicklung

Das Optimierungsmodell, welches das Hauptprogramm darstellt, dient zur Implementierung der Datenimporte als Sets, zum Setzen darüber hinaus eingehender Parameter und zur Definition der zu optimierenden Variablen. Weiterhin werden die Parameter und Variablen in Nebenbedingungen zu einem Modell des Heizungssystems verknüpft und die zu minimierende Zielfunktion definiert. Das Hauptprogramm schließt mit der Auswahl der Lösungsverfahren (Solver) und deren Einstellung, bevor die Ausgabe der Simulationsergebnisse implementiert wird.

Das Lösen des so aufgestellten Modells übernehmen externe Solver, denen das Modell lediglich übergeben wird. Ist das Modell ausführbar und kann somit ein lokales oder globales Optimum in einem mehrdimensionalen Lösungsraum durch das Variieren und Vergleichen der Variablen gefunden werden, gibt der Solver diese Werte als Ergebnisse zurück. Als Solver zum Lösen der gemischt-ganzzahlig nicht-linearen Optimierung (MINLP) wird in dieser Arbeit der Mindtpy-Solver verwendet. Dieser nutzt einen sogenannten Zerlegungsalgorithmus, um die gemischt-ganzzahligen und nicht-linearen Teile der Optimierung zu unterscheiden und separat zu lösen [52]. Zur Lösung des Optimierungsproblems greift der Mindtpy-Solver auf andere Solvertypen zurück, die vom Nutzer definiert werden müssen. In dieser Arbeit wird der COIN-OR

Branch-and-Cut solver (CBC) für das Lösen der gemischt-ganzzahligen Optimierung und der Interior Point Optimizer (IPOPT) zur Lösung der nicht-linearen Optimierung genutzt.

Die Aufarbeitung und Darstellung der Ergebnisse erfolgt danach in weiteren Hilfsprogrammen und liefert schlussendlich die simulierten ökologischen und technischen Daten sowie die Temperatur-, Massenstrom- und Wärmestromverläufe des Heizungssystems über den Simulationszeitraum eines Tages. Aufgrund der Komplexität des Modells und der damit einhergehenden Berechnungszeit, die der Solver für das Finden einer Lösung benötigt, werden die Modellvarianten so umgesetzt, dass eine Gesamtjahressimulation in 365 Tagessimulationen unterteilt wird. Die konkrete Umsetzung der Jahressimulation erfolgt zu Beginn von Kapitel 5.

4.3 Grundoptimierung

Das Modell der Grundoptimierung stellt eine Abstraktion des real existierenden Heizsystems dar. Abbildung 4.2 veranschaulicht seine wesentlichen Bestandteile. Als einziger Wärmeerzeuger fungiert das Blockheizkraftwerk, welches seine Abwärme an das zurückfließende Heizwasser aus dem Heizkreislauf abgibt und den Vorlauf auf eine höheres Temperaturniveau aufheizt. Der BHKW-Vorlauf entlädt sich in die oberste Schicht eines Wärmespeichers mit drei Schichten (Schichtenspeichermodell). Hiervon abgehend gelangt das Heizwasser zum Technologiezentrum als Gesamtwärmeverbraucher.

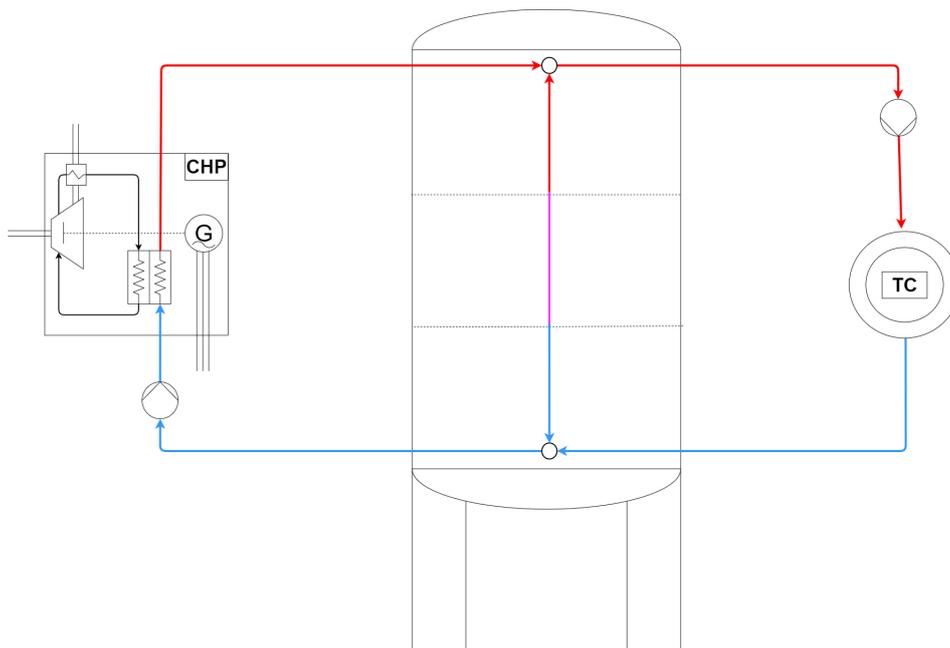


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Grundoptimierung bestehend aus BHKW, Schichtenspeicher und Verbraucher

4.3.1 Annahmen und Vereinfachungen

Für das Modell wird angenommen, dass das Rohrleitungssystem die im Heizwasser gespeicherte Wärme verlustfrei transportiert, also perfekt isoliert ist, was in der Realität nicht der Fall ist. Die Größenordnung der Zirkulationsverluste wurde nach der Überschlagsrechnung in Anhang 7.1 auf unter 1,2 % geschätzt. Zudem wird der elektrische Eigenverbrauch zur Förderung

des Heizwassers im Heizkreislauf nicht berücksichtigt. Nach Schaumann und Schmitz kann der elektrische Energiebedarf für Hilfsanlagen und Nebenantriebe einer KWK-Anlage auf das Jahr gesehen mit 3 bis 8 % angesetzt werden [47].

Der Wärmespeicher unterteilt sich in drei gleich große Schichten, was der Anzahl der Temperaturfühler in den realen Wärmespeichern am Technologiezentrum entspricht. Für jede Schicht wird angenommen, dass sie ideal durchmischt ist, also dass das gleiche Temperaturniveau während eines Zeitschrittes der Simulation in der gesamten Schicht vorherrscht. Der sich über die Energiebilanz einer Schicht ergebende Temperaturverlauf spiegelt annähernd die realen Verläufe im Speicher wieder.

Die Veränderung der Schichttemperatur im Modell wird einerseits durch die erzwungene Konvektion, die Wärmeleitung und die Wärmeverluste über die Speicheraußenwände an die Umgebung ermittelt. Die Umgebungstemperatur der Speicher wird dafür mit einem konstanten Wert von 20°C angenommen. Die auftretenden Wärmeströme der freien Konvektion und der Wärmeleitung werden vereinfacht modelliert und über eine effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit wie bei Eicker angenähert [22].

Auf der Verbraucherseite werden alle fünf Heizkreise zu einem großen Gesamtverbraucher zusammengefasst. Auch die in der Realität vorhandenen Rücklaufbeimischungen zur Vorlauf-temperaturregelung werden in diesem Modell nicht dargestellt, aber in Kapitel 5 diskutiert.

4.3.2 Hinterlegte Parameter und Definition der Optimierungsvariablen

In diesem Abschnitt werden die in das Grundmodell eingehenden Parameter, Variablen und Datenimporte beschrieben. Zum besseren Verständnis wird zuvor kurz die Logik der verwendeten Nomenklatur von Variablen und Parametern erläutert.

Systematik der Nomenklatur von Variablen und Parametern

Die verwendete Systematik bei der Benennung von Variablen und Parametern in den dargestellten Formeln und Quellcodeauszügen der nächsten Kapitel lässt sich am Beispiel von Gleichung 4.1 nachvollziehen.

$$\dot{Q}_{chp}(t) = \dot{m}_{chp}(t) \cdot c_p \cdot (T_{chp,s}(t) - T_{chp,r}(t)) \quad (4.1)$$

Die wesentlichen Optimierungsvariablen stellen die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen, die Massenströme, die thermischen Leistungen sowie die verursachten CO₂-Emissionen dar. Temperaturniveaus werden in den Gleichungen mit einem großen Buchstaben **T** und in den Quellcodeauszügen mit der Silbe **temp** beschrieben. Für Massenströme entspricht einem **m** in den Gleichungen der englische Ausdruck **mass_flow** im Quellcode. Für thermische Leistungen steht das Symbol **Q**, wohingegen elektrische Leistungen mit **P** ausgedrückt werden. Im Quellcode sind die thermischen Leistungen entsprechend der vorherigen Benennung **heat_flows**.

Die Indizierung der Variablen erfolgt so, dass als erster Index immer die englische Abkürzung der Komponente - hier **chp** - vorangestellt wird. Darauf folgt, durch ein Komma getrennt, bei den Temperaturen der Buchstaben **s** für **supply** oder ein **r** für **return**, was ausdrückt, ob es sich um eine Vorlauf- oder Rücklauftemperatur handelt. Die Abhängigkeit einer Variablen von der Zeit wird über einen angehängten Buchstaben **t** ausgedrückt. Einige Variablen zur Abbildung des Wärmespeichers enthalten einen angehängten Index: **ch** für **charge** oder **disch** für **discharge**.

Auch im Quellcode wird eine ähnliche Schreibweise verwendet: Aus dem Ausdruck **temp** wird beispielsweise **temp_chp_s**. Die Zeitabhängigkeit erfolgt hier über die Indizierung mit dem Parameter **timestep**, der dem Variablennamen über eckige Klammern angehängt wird. Einer vom aktuellen Zeitschritt abhängigen Variable, wird das Objekt **model** vorangestellt, das zu Beginn der Optimierung als konkretes Modell in Pyomo erzeugt wird. Das heißt, dass jede solcher Variablen ein Attribut des Objektes **model** darstellt und somit Teil der Optimierung wird:

→ `model.temp_chp_s[timestep]`

Zur Veranschaulichung werden die beschriebenen Größen im weiteren Verlauf farblich hinterlegt. Rot hinterlegte Größen werden im Rahmen der Simulation konstant gehalten. Variable Größen, deren Werte über die Laufzeit veränderbar sind, erhalten einen grünen Kasten und binäre Variablen, zur Darstellung der Anlagenbetriebszustände, werden in einem gelben Kasten dargestellt. Alle blau hinterlegten Größen, wie beispielsweise die Gesamtheizleistung des Technologiezentrums, stellen die historischen und berechneten Zeitreihen der Eingangsdaten dar, die in das Modell einfließen. Die Werte aller eingehenden Parameter sowie die definierten Grenzen der Variablen, innerhalb derer sie veränderbar sind, orientieren sich an den realen Heizungskomponenten am Technologiezentrum. Im Folgenden werden sie, aufgeteilt nach den Bereichen Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung und Wärmeverbrauch, näher erläutert.

Wärmeerzeugung

Die in das BHKW-Modell eingehenden Größen sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Die emittierte CO_2 -Menge m_{chp,CO_2} ist zwischen den Grenzen 0 und plus unendlich definiert. Zu ihrer Bestimmung wird u.a. der Emissionsfaktor von Erdgas mit einem Wert von $0,247 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ herangezogen [1]. Die thermische Leistungsbestimmung erfolgt über den variablen Massenstrom \dot{m}_{chp} , die konstant angenommene Wärmekapazität von Wasser $c_p = 1,162 \text{ Wh/kgK}$ und der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf im Heizungssystem. Dabei variiert der Wärmestrom \dot{Q}_{chp} in den vom Hersteller angegebenen Leistungsgrenzen von 19-36 kW (vgl. Anhang 7.2, [33]).

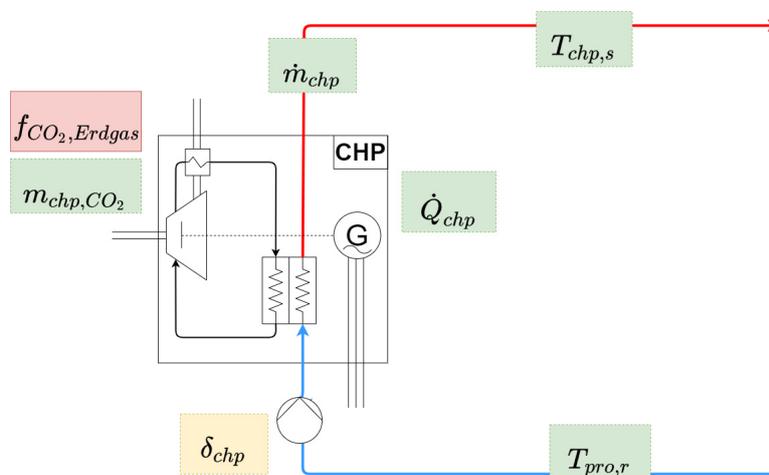


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der in das BHKW-Modell eingehenden Größen – Variable (grün), binäre Variable (gelb), Konstante (rot)

Ausgehend von dem realen Heizungssystem treten maximale Vorlauftemperaturen von 80°C auf. Für die Gewährleistung eines angenehmen Raumklimas sollten Temperaturen von 20°C nicht unterschritten werden, weshalb hier die Untergrenze aller Temperaturvariablen gezogen wird [19]. Der maximale Massenstrom, der von der Umwälzpumpe des BHKWs in den Messdaten zu beobachten ist, liegt bei etwa $2000 \text{ kg/h} \approx 2 \text{ m}^3/\text{h}$. Zur Darstellung der Betriebszustände des BHKWs dient die binäre Variable δ_{chp} , die Werte von 0 für Betriebsstopp und 1 für Betrieb annimmt. Weitere Hilfsvariablen werden innerhalb der Nebenbedingungen für jeden Zeitschritt neu berechnet, weshalb sie nicht eingegrenzt werden. Tabelle 4.1 fasst die relevanten Größen zusammen.

Tabelle 4.1: Parameter und Variablen - Wärmeerzeugung

Parameter	Einheit	Wert
Maximalleistung	kW	36
Minimalleistung	kW	19
CO ₂ -Emissionsfaktor Erdgas (Hi)	kgCO ₂ /kWh	0,247
Optimierungsvariablen	Einheit	Grenzen
Vorlauftemperatur	°C	20, 80
Rücklauftemperatur	°C	20, 80
Massenstrom	kg/h	0, 2000
Wärmestrom	kW	0, 36
Betriebsstatus	-	0, 1
CO ₂ -Emissionen	kg	0, $+\infty$
Hilfsvariablen	Einheit	Grenzen
Thermischer Wirkungsgrad	-	-
Leistungszahl	-	-
Elektrische Leistung	kW	-
Brennstoff Leistung	kW	-

Insgesamt stehen am Technologiezentrum 3 Wärmespeicher zur Verfügung. In Kapitel 5 wird der Einfluss der Speichergröße auf das Betriebsverhalten analysiert. Hierfür werden die Schichthöhe l_z sowie das Speichervolumen V_i in drei Größenordnungen variiert. In Kapitel 4.3.5 wird die Berechnung des aktuellen Speicherladestands näher erläutert, für die eine maximale Speichertemperatur des voll beladenen Schichtenspeichers von 80°C und eine minimale Speichertemperatur für den komplett entladenen Speicher von 20°C angenommen wird. Die Grenzen des Speicherstandes werden abhängig vom jeweiligen Simulationsschritt gewählt. Die spätere Berechnung der Temperaturänderung einer Speicherschicht bezieht die Wärmekapazität c_p , die Wärmeleitfähigkeit λ_w und die Dichte ρ_w von Wasser als konstant ein. Alle relevanten Größen sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Wärmeverbaucher

Alle relevanten Größen, die in das Verbraucher-Modell eingehen, sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Die eingehenden Daten der Heizleistung des Technologiezentrums im Jahresverlauf werden im nachfolgenden Abschnitt, Datenimporte, beschrieben. Die relevanten Größen zur thermischen Heizleistungsbestimmung, die Vorlauftemperatur $T_{tc,s}$, die Rücklauftemperatur $T_{tc,r}$ sowie der Verbrauchermassenstrom \dot{m}_{tc} werden wie schon zuvor als veränderliche Größen innerhalb der in Tabelle 4.3 angegebenen Grenzen definiert.

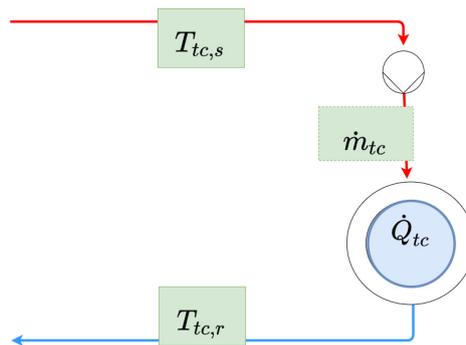


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der in das Verbraucher-Modell eingehenden Größen – Variable (grün), Datenimporte (blau)

Tabelle 4.3: Parameter und Variablen - Wärmeverbraucher

Optimierungsvariable	Einheit	Grenzen
Vorlauftemperatur	$^\circ\text{C}$	20, 80
Rücklauftemperatur	$^\circ\text{C}$	20, 80
Verbrauchermassenstrom	$^\circ\text{C}$	0, 2000

4.3.3 Ausgewählte Datenimporte

Zusätzlich zu den hinterlegten Größen werden historische und berechnete Zeitreihen aus CSV-Dateien in das Modell eingelesen. Im Rahmen der Grundoptimierung handelt es sich dabei um die Zeitreihen der Gesamtheizleistung, der anfallenden Residuallast am Technologiezentrum sowie einem lokalen Gewichtungsfaktor für Bergedorf. Die Datenreihe der berechneten Niedertemperaturquelle spielt erst bei der Integration der Wärmepumpe eine Rolle und wird in Kapitel 4.4.1

näher beschrieben. Die messtechnisch bestimmten Datenimporte, die in das Hauptprogramm eingelesen werden, weisen in ihren Verläufen teilweise starke Ausreißer oder physikalisch unlogische Werte auf, wie beispielsweise negative Heizleistungen. Deshalb wird vor dem Einlesen eine polynomische Glättung der Datensätze durchgeführt.

Strommixfaktor für Bergedorf

Für die Bestimmung der CO₂-Emissionen durch den Netzstrombezug am Technologiezentrum wird der durchschnittliche CO₂-Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland $\bar{f}_{Strommix,D}$ des Jahres 2018 von 515 g/kWh [29] mit einem Strommixfaktor für Bergedorf $f_{Strommix,BD}(t)$ gewichtet.

$$\bar{f}_{Strommix,D} \cdot (1 + f_{Strommix,BD}(t)) \quad (4.2)$$

Dieser Gewichtungsfaktor wird vorab in einem Zusatzprogramm über den Jahresverlauf 2020 in 15-Minuten Zeitschritten berechnet. Für seine Bestimmung wird die Differenz aus der Stromnachfrage und Stromerzeugung [51]. von Bergedorf gebildet und durch den auftretenden Maximalwert geteilt.

$$Restlast_{BD,t} = P_{Last,BD}(t) - P_{Erzeugung,BD}(t) \quad (4.3)$$

Diese Normierung ist nur möglich, wenn der Betrag des Minimalwertes nicht größer ausfällt als der Maximalwert. So wird sichergestellt, dass für die spätere Berechnung der CO₂-Emissionen durch den Netzstrombezug, der Gewichtungsfaktor nur Werte zwischen -1 und 1 annehmen kann und der Term 4.2 keine negativen Werte annimmt.

$$f_{Strommix,BD}(t) = \frac{Restlast_{BD}(t)}{Max(Restlast_{BD}(t))} \quad (4.4)$$

Nicht zu verwechseln ist der hier als $Restlast_{BD}(t)$ bezeichnete Parameter mit der sogenannten Residuallast. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage auf lokaler Ebene konnten keine Zeitreihen für den Residuallastverlauf in Bergedorf ermittelt werden. Dabei wird die Residuallast auf ähnliche Weise aus der Differenz der Last und der Erzeugung aus erneuerbaren Energien bestimmt. Ihre Ermittlung bedarf aber einer genauen Kenntnis der zu jedem Zeitpunkt einspeisenden Erzeuger und deren Leistungsniveaus. Dies wurde nicht weiter verfolgt.

Im Rahmen dieser Arbeit wäre eine Aussage über die Residuallast auf lokaler Ebene zwar hilfreich. So wäre es möglich, die Zeitfenster, in denen die Erzeugung aus erneuerbaren Energien im lokalen Stromnetz einen Stromüberschuss (negative Residuallast) verursachen, klar einzugrenzen. In diesen Zeiträumen wäre ein Betrieb der Wärmepumpe zur Deckung des Wärmebedarfs besonders primärenergiesparend. Andererseits wäre es möglich in Zeitfenstern mit einem Strommangel (positive Residuallast) auf lokaler Ebene bevorzugt das Blockheizkraftwerk (BHKW) zu betreiben, um den Primärenergiebedarf im Vergleich zu einer nicht gekoppelten Erzeugung von Wärme und Strom am Technologiezentrum zu reduzieren. Wie Decher [17] näher analysierte, kann bei der Bildung der Differenz zwischen Stromnachfrage und -erzeugung in Bergedorf aber angenommen werden, dass, je negativer die Differenz ausfällt, desto höher der Anteil an erneuerbaren Energien ist, die in diesem Zeitrahmen eingespeist werden. Im Umkehrschluss kann davon ausgegangen werden, dass zu Zeiten sehr positiv ausfallender Differenzen der Anteil ein-

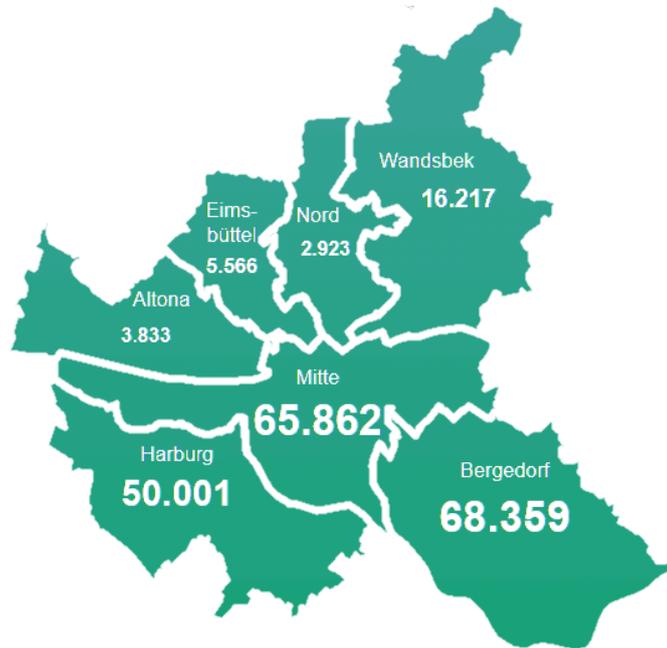


Abbildung 4.6: Installierte Leistung in Kilowatt erneuerbarer Energien in den Bezirken Hamburgs nach [51]

gespeister erneuerbarer Energien sehr gering ausfällt. Diese Aussage ist möglich, da der Anteil an erneuerbaren Energien in Bergedorf mit einer installierten Leistung von etwa 68 MW der auftretenden Höchstlast von 66 MW (2020) in dem Bezirk entspricht [51] (siehe Abbildung 4.6).

Gesamtheizleistung des Technologiezentrums

Die Rohdaten der Heizleistung weisen einen typischen Jahresverlauf von hohen Werten während der Heizperiode von Oktober bis April und niedrigen Werten über die Sommermonate auf, wie Abbildung 4.7 veranschaulicht. Die höchste Heizleistung von 67 kW wird im Dezember registriert, wohingegen die niedrigsten Heizleistungen im Sommer nur wenige Kilowatt betragen. Die Daten liegen in einer Auflösung von 15 Minuten für das Jahr 2020 vor. Somit ergeben sich insgesamt 35.136 eingehende Heizleistungswerte. Diese wurden messtechnisch über die Vorlauf- und Rücklauf-temperaturmessungen sowie die Volumenstrommessung in den fünf Heizkreisen am Technologiezentrum ermittelt.

Residuallast des Technologiezentrums

Die Residuallast resultiert aus der Differenz zwischen der Stromlast am Technologiezentrum und der Stromerzeugung aus der Photovoltaikanlage auf dem Dach. Ihr Jahresverlauf unterliegt starken Schwankungen zwischen Werten von über 40 kW bis minus 7 kW. Abbildung 4.8 zeigt, dass negative Residuallasten bei einem Überschuss von erneuerbarem Strom vermehrt über die sonnenreicheren Sommermonate auftreten. Aber auch an sonnigen Wintertagen wird dieser Zustand vereinzelt erreicht. Jedoch beschränken sich die Zeitfenster auf wenige Stunden meist über die Mittagszeit.

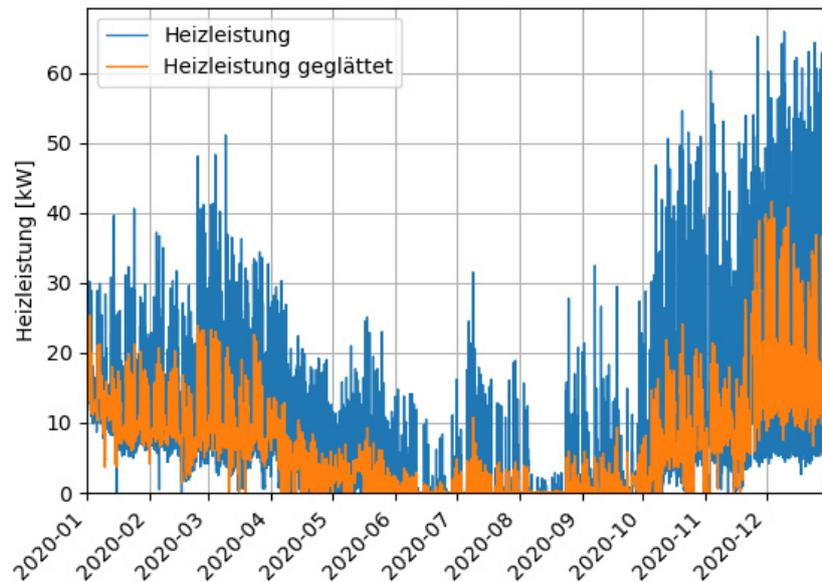


Abbildung 4.7: Heizleistungsverlauf des Technologiezentrum 2020

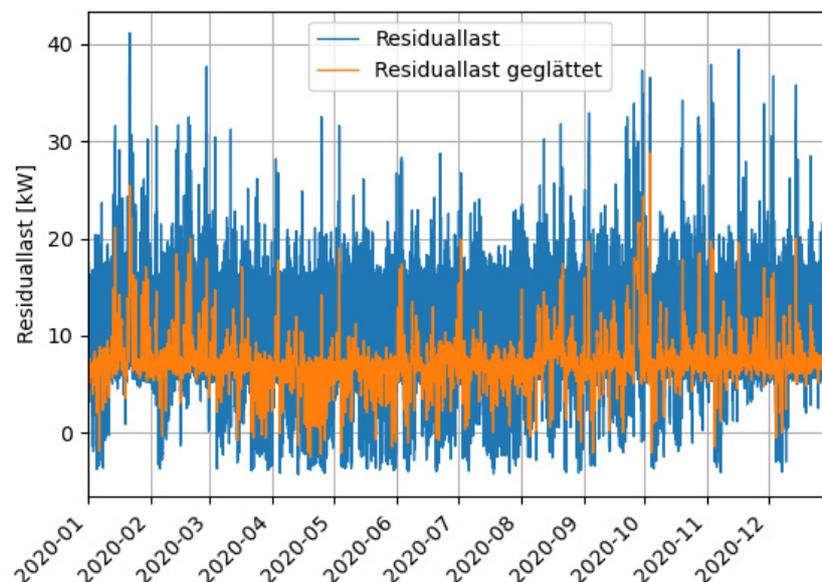


Abbildung 4.8: Residuallastverlauf des Technologiezentrum 2020

4.3.4 Zielfunktion

In diesem Unterkapitel werden die mathematischen Zusammenhänge der Zielfunktion sowie die Umsetzung mit der Programmiersprache Python beschrieben. Die Zielfunktion besteht aus zwei Termen, die summiert werden. Der erste Term $m_{chp,CO_2}(t)$ beschreibt die absolut auftretenden CO_2 -Emissionen in jedem Zeitschritt durch den Betrieb des BHKWs. Der zweite Term $m_{grid,CO_2}(t)$ enthält die absolute Menge an CO_2 -Emissionen für jeden Zeitschritt, die durch den Strombezug am Technologiezentrum aus dem externen Stromnetz entstehen. Die Zielfunktion gilt es zu minimieren.

$$Z(m_{chp,CO_2}(t), m_{grid,CO_2}(t)) = m_{chp,CO_2}(t) + m_{grid,CO_2}(t) \quad (4.5)$$

Bei der programmiertechnischen Umsetzung in Python wird die Zielfunktion als Funktion mit dem Namen *obj* definiert. Ihr wird der Parameter *model* übergeben. Innerhalb der Funktion wird der Rückgabewert *result* zu Beginn auf null gesetzt. In dem Modell wird der Term $m_{grid,CO_2}(t)$ durch die Variable *mass_co2_grid* und der Term $m_{chp,CO_2}(t)$ durch die Variable *mass_co2_chp* beschrieben. Für jeden Zeitschritt des Modells wird dann über eine For-Schleife die Summe aus den Termen gebildet und im Rückgabewert aufsummiert. Im Anschluss wird eine sogenannte Zielfunktions-*expression* erzeugt. Eine *expression* stellt dabei eine bestimmte Klasse von Pyomo-Objekten dar [46]. Beim Aufruf der Klasse wird die zuvor definierte Funktion als Regel (*rule*) zugewiesen. Weiterhin wird über den Parameter *sense* angegeben, dass die Zielfunktion minimiert werden soll.

```

"""OBJECTIVE"""
def obj(model):
    result = 0
    for timestep in model.timeSteps:
        result+= model.mass_co2_chp[timestep]+model.mass_co2_grid[timestep]
    return result

model.min_co2 = Objective(rule=obj, sense=minimize)
    
```

4.3.5 Nebenbedingungen

In diesem Unterkapitel werden die mathematischen Zusammenhänge der Nebenbedingungen und ihre Umsetzung mit der Programmiersprache Python beschrieben. Insgesamt besteht die Grundoptimierung aus 13 Nebenbedingungen. Einige Nebenbedingungen, wie beispielsweise die zur Änderung der Schichttemperaturen, ähneln sich stark im Aufbau, weshalb hier nur eine Auswahl beschrieben wird.

Leistungsbereich des BHKWs

Die thermische Leistungsbestimmung eines Wärmeerzeugers (in diesem Fall des BHKWs) wird im Programm durch drei Nebenbedingungen umgesetzt. Sie dienen zum einen der Bestimmung der Höhe der thermischen Leistung und schränken andererseits diese innerhalb ihrer Leistungsgrenzen ein. Analog dazu erfolgt die thermische Leistungsbestimmung und -eingrenzung für die Wärmepumpe. Nach Gleichung 4.6 wird die thermische Leistung $\dot{Q}_{chp}(t)$ zu jedem Zeitschritt als Produkt aus dem BHKW-Massenstrom $\dot{m}_{chp}(t)$, der Wärmekapazität von Wasser c_p und der Temperaturdifferenz zwischen BHKW-Vorlauf- und Rücklauf-temperatur ($T_{chp,s}(t) - T_{chp,r}(t)$) bestimmt. Das heißt, dass im Rahmen der Optimierung die variable Größe der thermischen Leistung zu jedem Zeitschritt diesem Produkt entsprechen muss.

$$\dot{Q}_{chp}(t) = \dot{m}_{chp}(t) \cdot c_p \cdot (T_{chp,s}(t) - T_{chp,r}(t)) \quad (4.6)$$

Die Ungleichung 4.7 schränkt den Leistungsbereich der Erzeugungsanlage anhand des vom Hersteller gegebenen thermischen Leistungsbereichs ein. Die untere Leistungsgrenze von 19 kW wird über den Parameter $\dot{Q}_{chp,min}$ und die obere Leistungsgrenze von 36 kW über $\dot{Q}_{chp,max}$

jeweils mit der binären Variable $\delta_{chp}(t)$ multipliziert, die den Wert null oder eins annehmen kann. Ist der Wärmeerzeuger für einen gegebenen Zeitschritt in Betrieb ($\delta_{chp}(t) = 1$), muss sich die thermische Leistung zwischen $\dot{Q}_{chp,min}$ oder $\dot{Q}_{chp,max}$ bewegen. Durch eine ausgeschaltete Anlage ($\delta_{chp}(t) = 0$) erzwingt die Ungleichung, dass die thermische Leistung ebenfalls den Wert null annimmt.

$$\dot{Q}_{chp,min} \cdot \delta_{chp}(t) \leq \dot{Q}_{chp}(t) \leq \dot{Q}_{chp,max} \cdot \delta_{chp}(t) \quad (4.7)$$

In Pyomo werden diese Zusammenhänge über drei Nebenbedingungen, eine Gleichung und zwei Ungleichungen modelliert.

```

"""Rules"""
# Heat flow of CombinedHeat&Power (CHP)
def heat_flow_chp_rule1(model, timestep):
    return model.heat_flow_chp[timestep] == model.mass_flow_chp[timestep] *
        ↪ CP * (model.temp_chp_s[timestep] - model.temp_pro_r[timestep])

# Lower bound heat flow CHP
def heat_flow_chp_rule2(model, timestep):
    return model.heat_flow_chp[timestep] >= heat_flow_chp_min *
        ↪ model.status_chp[timestep]

# Upper bound heat flow CHP
def heat_flow_chp_rule3(model, timestep):
    return model.heat_flow_chp[timestep] <= heat_flow_chp_max *
        ↪ model.status_chp[timestep]
    
```

Emissionen aus dem Brennstoffeinsatz

Die nachfolgende Nebenbedingung dient zur Ermittlung der Menge an CO₂-Emissionen, die durch das BHKW in jedem Zeitschritt verursacht wird. Diese wird vermittelt über den thermischen Wirkungsgrad und den thermischen Wärmestrom bestimmt. Der thermische Wirkungsgrad definiert den Zusammenhang zwischen der thermischen Leistung und dem zugehörigen Brennstoffeinsatz.

Allgemein ist zu erkennen, dass die Effizienz des BHKWs im Teillastbereich variiert. Abbildung 4.9 veranschaulicht aktuelle Messdaten des elektrischen, thermischen und Gesamtwirkungsgrads des verwendeten BHKW-Modells G16+ über die thermische Leistung (nach Anhang 7.4). Unter Vollast erreicht das BHKW einen elektrischen Wirkungsgrad von 31 %. Mit sinkender thermischer Leistungsbereitstellung sinkt auch der elektrische Wirkungsgrad auf bis knapp unter 20 % ab, wo der sogenannte Kleinstlastpunkt erreicht ist, unterhalb dem die Anlage abgeschaltet wird [47]. Währenddessen steigt der thermische Wirkungsgrad von etwa 68 % auf bis zu 80 % an, was jedoch nur eine geringe Auswirkung auf den Gesamtwirkungsgrad hat. Dieser schwankt über den gesamten Lastbereich mit wenigen Prozentpunkten Abweichung um einen durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrad von 97 %.

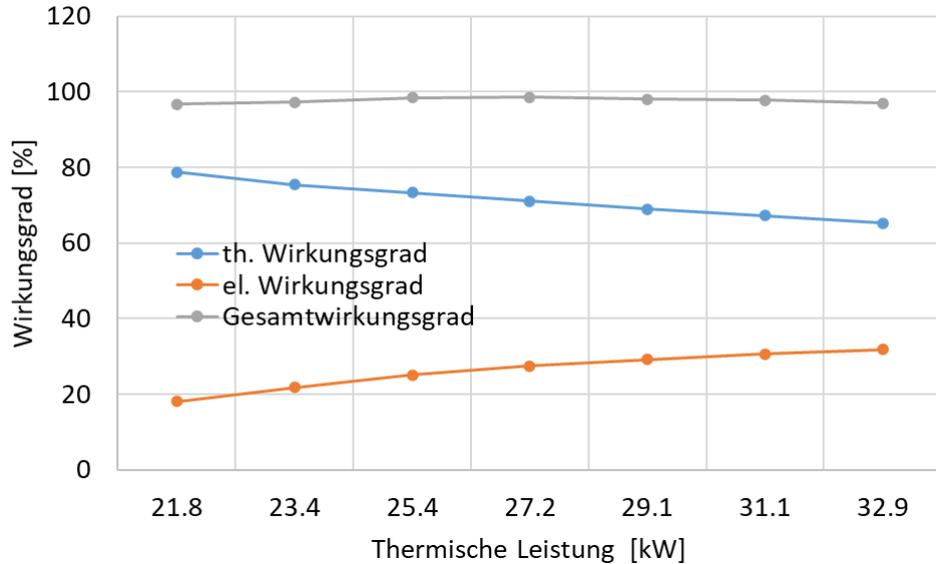


Abbildung 4.9: Effizienz des BHKWs Mephisto G16+ der Firma Kraftwerk nach Anhang 7.4, [2]

Über verschiedene Ansätze lässt sich der Wirkungsgradverlauf im Modell abbilden. Eine konstante Abbildung stellt die einfachste Möglichkeit dar, die aber wie Steck [49] zeigt, keinen Anreiz gibt, das Kraftwerk im vorteilhaften Nennlastpunkt zu betreiben. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass der Zusammenhang sich gut über folgende Geradengleichung einer linearen Regression annähern lässt (vgl. Anhang 7.5).

$$\eta_{chp,th}(t) = -0,0117 \cdot \dot{Q}_{chp}(t) + 1,0323 \quad (4.8)$$

Die Menge an CO₂-Emissionen des BHKWs gehen als ein bedeutender Teilterm in die Gesamtemissionen ein, die durch die Optimierung minimiert werden sollen. Sie werden nach Gleichung 4.9 über das Produkt des CO₂-Emissionsfaktors von Erdgas f_{Erdgas} und der zugeführten Brennstoffenergie E_{Br} gebildet. Die Brennstoffenergie lässt sich dann über die umgestellte Grundgleichung aus Kapitel 2 durch die thermische Leistung $\dot{Q}_{chp}(t)$, den thermischen Wirkungsgrad $\eta_{chp,th}(t)$ und die Schrittweite Δt abbilden.

$$m_{chp,CO_2}(t) = E_{Br} \cdot f_{Erdgas} = P_{Br} \cdot \Delta t \cdot f_{Erdgas} = \frac{\dot{Q}_{chp}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{chp,th}(t)} \cdot f_{Erdgas} \quad (4.9)$$

Die Umsetzung in Pyomo geschieht über die Funktion `mass_co2_chp_rule`. Erst erfolgt für den gegebenen Zeitschritt die Berechnung des thermischen Wirkungsgrades aus der Regressionsgeraden, der dann in der Rückgabe in die umgesetzte Gleichung aus 4.9 eingeht.

```
# CO2-emissions from CHP
def mass_co2_chp_rule(model, timestep):
    eta_chp = -0.0117 * model.heat_flow_chp[timestep] + 1.0323
    return model.mass_co2_chp[timestep] ==
        ↪ (((model.heat_flow_chp[timestep]) / (eta_chp)) * d_time) *
        ↪ f_CO2_natural_gas
```

CO₂-Emissionen aufgrund des Netzstrombezuges

In dieser Nebenbedingung wird die Menge der CO₂-Emissionen $m_{grid,CO_2}(t)$ durch den Netzstrombezug am Technologiezentrum für jeden Zeitschritt bestimmt. Dies geschieht vermittelt über die elektrische Leistung $P_{chp,el}(t)$ des BHKWs, die mit Hilfe der leistungsbezogenen Stromkennzahl σ_p für den Teil- und Volllastbetrieb ermittelt wird. Die leistungsbezogene Stromkennzahl definiert das Verhältnis zwischen thermischer Leistung $\dot{Q}_{chp}(t)$ und elektrischer Leistung des BHKW.

Wie bereits in Abbildung 4.9 gezeigt wurde, variiert die energetische Effizienz des BHKWs im Teillastbereich. Mit abnehmender Last steigt im Teillastbereich der thermische Wirkungsgrad η_{th} während der elektrische Wirkungsgrad η_{el} der Anlage stärker sinkt. Dies hat nach Gleichung 4.10 auch ein Sinken der Stromkennzahl zur Folge.

$$\sigma_p = \frac{P_{chp,el}(t)}{\dot{Q}_{chp}(t)} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (4.10)$$

Abbildung 4.10 veranschaulicht den Verlauf der Stromkennzahl im Teillastbereich in Abhängigkeit von der thermischen Leistung.

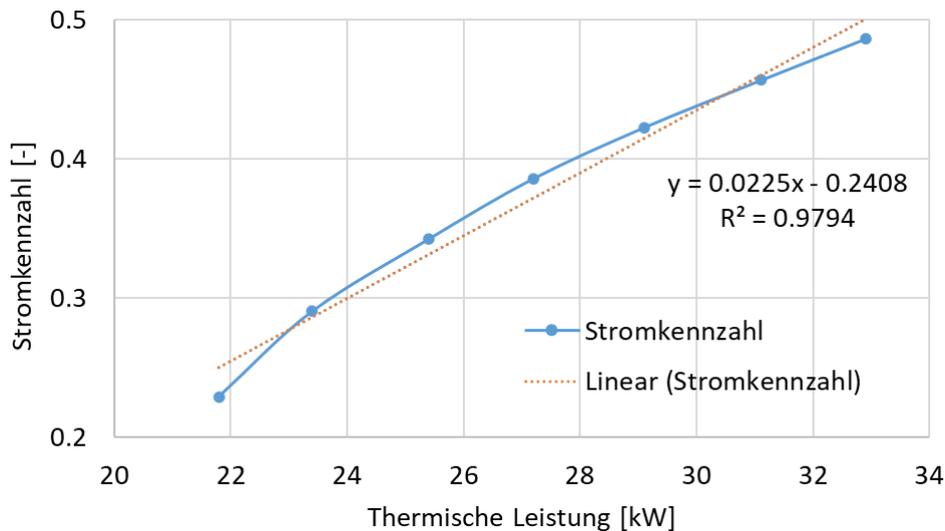


Abbildung 4.10: Thermische Leistung in Abhängigkeit von der Stromkennzahl – BHKW Mephisto G16+ der Firma Kraftwerk nach Anhang 7.4, [2]

Der Verlauf kann durch Gleichung 4.11 einer linearen Regression angenähert werden. Im Modell wird die elektrische Leistung somit nach Gleichung 4.12 in Abhängigkeit von der aktuellen thermischen Leistung bestimmt.

$$\sigma_p(t) = 0,0225 \cdot \dot{Q}_{chp}(t) - 0,2408 \quad (4.11)$$

$$P_{chp,el}(t) = \sigma_p(t) \cdot \dot{Q}_{chp}(t) \quad (4.12)$$

Die Menge der emittierten CO₂-Emissionen durch den Netzstrombezug am Technologiezentrum geht als Teilterm in die zu minimierende Zielfunktion ein. Zu ihrer Ermittlung wird die zu beziehende elektrische Energie E_{tc} während eines Zeitschrittes mit dem Emissionsfaktor $f_{Strommix}$ multipliziert. Für die Abschätzung dieses Emissionsfaktors wird der durchschnittliche

Emissionsfaktor des deutschen Strommixes $\bar{f}_{Strommix,D}$ mit dem in Kapitel 4.3.3 beschriebenen lokalen Stromnetzfaktor für Bergedorf $f_{Strommix,BD}(t)$ gewichtet. Der in die Berechnung eingehende Faktor $f_{Strommix}$ fällt auf maximal null bei einer hohen Menge an überschüssig produziertem Strom in Bergedorf, wohingegen er maximal bis auf das Doppelte des durchschnittlichen Emissionsfaktors Deutschlands im Falle eines lokalen Strommangels im Bergedorfer Stromnetz ansteigt.

Die zuvor bestimmte elektrische Leistung des BHKWs geht in die Berechnung der zu beziehenden elektrischen Energie jedes Zeitschrittes mit ein, indem sie von der Residuallast am Technologiezentrum $P_{rl,tc}(t)$ abgezogen wird. Somit ist es möglich, dass die emittierten CO₂-Emissionen durch den Netzstrombezug negative Werte annehmen, wenn die elektrische Leistung des BHKWs den Leistungsbedarf des Technologiezentrums übersteigt. Dies kommt einer Gutschrift an CO₂-Emissionen gleich, wenn das BHKW Überschussstrom in das öffentliche Stromnetz einspeist.

$$\begin{aligned} m_{netz,CO_2}(t) &= E_{rl,tc} \cdot f_{Strommix} \\ &= (P_{rl,tc}(t) - P_{chp,el}(t)) \cdot \Delta t \cdot \bar{f}_{Strommix,D} \cdot (1 + f_{Strommix,BD}(t)) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Im Optimierungsmodell wird die Menge der emittierten CO₂-Emissionen durch den Netzstrombezug am Technologiezentrum durch die Funktion `mass_co2_grid_rule` umgesetzt. Zuerst erfolgt analog zu Gleichung 4.11 und 4.12 die elektrische Leistungsbestimmung durch den variabel definierten Wärmestrom `heat_flow_chp` des BHKWs. Die Nebenbedingung ist dann erfüllt, wenn die variabel definierten CO₂-Emissionen `m_co2_el` dem Produkt aus elektrischer Energie und dem gewichteten Strommixfaktor entsprechen. Die Zeitreihe der Residuallast am Technologiezentrum sowie die Zeitreihe des lokalen Stromnetzfaktors für Bergedorf werden als Datenimport aus einer CSV-Datei eingelesen. Der Übergabeparameter `timestep` ist ein zu Beginn des Programms definiertes Set und beschreibt in dem Pyomomodell den Zeitschritt t .

```
# CO2-emissions from grid purchase
def mass_co2_grid_rule(model, timestep):
    sigma_pl = 0.0225 * model.heat_flow_chp[timestep] - 0.2408
    P_chp_el = sigma_pl * model.heat_flow_chp[timestep]
    return model.mass_co2_grid[timestep] == ((model.res_load_tc[timestep] -
    ↪ P_chp_el) * d_time) * (f_CO2_d * (1 +
    ↪ model.load_factor_bd[timestep]))
```

Ladestand des Wärmespeichers

Der State of charge $SOC(t)$ oder Ladestand stellt eine relative Größe dar, die es ermöglicht zu jedem Zeitschritt nachzuvollziehen, ob der Speicher beladen oder entladen wird. Er wird für eine gegebene Temperaturverteilung zu jedem Zeitschritt über die mittlere Speichertemperatur $\bar{T}_{sp}(t)$ der drei Speicherschichten nach Gleichung 4.14 berechnet.

$$\bar{T}_{sp}(t) = \frac{T_{oben}(t) + T_{mitte}(t) + T_{unten}(t)}{n} \quad (4.14)$$

Dabei gilt der Speicher nach Gleichung 4.15 als voll beladen ($SOC(t) = 100\%$), wenn in allen Speicherschichten das maximale Temperaturniveau $T_{sp,voll}$ von 80°C herrscht. Vollständig entladen ist der Speicher in den Zeitschritten, für die alle Schichttemperaturen auf das minimale Niveau $T_{sp,leer}$ von 30°C abgesunken sind.

$$SOC(t) = \frac{\bar{T}_{sp}(t) - T_{sp,leer}}{T_{sp,voll} - T_{sp,leer}} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

Die Umsetzung in Pyomo erfolgt in der Funktion `soc_rule`. Der zuerst ermittelte Wert der mittleren Speichertemperatur des jeweiligen Zeitschritts wird in die Rückgabegleichung basierend auf Gleichung 4.15 eingesetzt.

```
# Charging level of ThermalEnergyStorage (TES)
def soc_rule(model, timestep):
    temp_mean = (model.temp_tes_top[timestep] +
        ↪ model.temp_tes_mid[timestep] + model.temp_tes_bot[timestep]) / 3
    return model.soc_tes[timestep] == (temp_mean -
        ↪ TEMP_CHARGING_LEVEL_EMPTY) / (TEMP_CHARGING_LEVEL_FULL -
        ↪ TEMP_CHARGING_LEVEL_EMPTY) * 100
```

Wie bereits erwähnt, werden die Grenzen des Speicherstandes abhängig vom jeweiligen Simulationsschritt gezogen. Zu Beginn einer Simulation ist es notwendig, eine Anfangstemperatur der Speicherschichten vorzugeben, um die Simulation starten zu können. Sie beträgt zu Beginn 20°C . Für den letzten Zeitschritt einer Simulation werden die Grenzen des Ladestandes zwischen 0 und 10 % gewählt, damit der Speicher am Ende einer Simulation weitestgehend entladen ist. Während der anderen Simulationsschritte kann er Werte zwischen 0 und 100 % annehmen. In Pyomo lassen sich wechselnde Grenzen von Optimierungsvariablen über eine sogenannte *bound – rule* umsetzen, die für die Optimierung über die Funktion `soc_bound_rule` implementiert und der Variable des Ladestandes zugewiesen wird.

```
# bound rule
def soc_bounds_rule(model, timestep):
    if timestep == (len(heat_demand) - 1):
        return (0, 10) # SOC of last timestep must be between 0 & 10 %
    else:
        return (0, 100) # SOC bounds of other timesteps
```

Änderung der Speichertemperatur

Die nachfolgende Nebenbedingung beschreibt die Modellierung der Temperaturänderung des Heizwassers im Wärmespeicher. Ausgehend von der in Kapitel 2 vorgestellten Gesamtbilanz für eine Speicherschicht, kann unter Anwendung des Vorwärtsdifferenzenverfahrens die Speichertemperatur $T_{sp,i}$ für jede einzelne Schicht zum Zeitpunkt t aus den Werten des vorherigen Zeitschritts $t - 1$ wie folgt bestimmt werden:

$$\begin{aligned} T_{sp}(t) &= T_{sp}(t - 1) + \Delta T(t) \\ &= T_{sp}(t - 1) + \frac{\Delta t}{mc} \cdot (\dot{Q}_{kond}(t) + \dot{Q}_{konv}(t) - \dot{Q}_v(t)) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Die Änderung der Schichtentemperaturen ist dabei abhängig von den unvermeidlichen Wärmeverlusten durch die Speicherwand und den auftretenden Wärmeleitungs- und Konvektionströmen.

```
#Temperature difference in top layer for charging and discharging
def temp_tes_top_rule(model, timestep):
    if timestep == 0:
        temp_prior_mid = temp_prior_top = 20
    else:
        temp_prior_mid = model.temp_tes_mid[timestep - 1]
        temp_prior_top = model.temp_tes_top[timestep - 1]
    # Conduction in water
    heat_flows_cond_top = CROSS_SECTIONAL_AREA_HOR * (THERMAL_COND_WATER /
    ↪ HEIGHT_LAYER) * (temp_prior_mid - temp_prior_top)
    # Heat loss: conduction through wall and cover
    heat_flows_loss_top = (HEAT_TRANSFER_COEF_COVER *
    ↪ CROSS_SECTIONAL_AREA_HOR + HEAT_TRANSFER_COEF_WALL * HEIGHT_LAYER)
    ↪ * (temp_prior_top - TEMP_SUR)
    # Convection by water flow: During charging
    heat_flows_conv_top_ch= model.mass_flow_tes[timestep] * CP_ *
    ↪ (model.temp_chp_s[timestep] - temp_prior_top) *
    ↪ model.status_tes[timestep]
    # Convection by water flow: During discharging
    heat_flows_conv_top_disch = (model.mass_flow_tes[timestep]) * CP_ *
    ↪ (temp_prior_mid - temp_prior_top)*(1-model.status_tes[timestep])
    # Convection in timestep
    heat_flows_conv_top=heat_flows_conv_top_ch+heat_flows_conv_top_disch
    # Energy balance to calculate temperature change
    temps_diff_layer_top = (d_time / (CP_ * VOL_LAYER * DENSITY_WATER)) *
    ↪ (heat_flows_cond_top + heat_flows_conv_top - heat_flows_loss_top)

    return model.temp_tes_top[timestep] == temp_prior_top +
    ↪ temps_diff_layer_top
```

Die Abbildung im Modell geschieht durch drei Nebenbedingungen, eine für jede Speicherschicht. Exemplarisch für die Umsetzung in Pyomo ist die Funktion *temp_tes_top_rule* dargestellt, welche die Temperaturänderung der oberen Speicherschicht beschreibt. Zu Beginn der Funktion werden die Parameter *temp_prior_mid* und *temp_prior_top* über eine if-Abfrage für den ersten Zeitschritt auf 20°C gesetzt. Diese Definition eines vollständig entladenen Wärmespeichers als Anfangszustand ist als Vorgehensweise notwendig, da sich die Speichertemperatur für den ersten Zeitschritt aus den Werten des vorherigen Zeitschrittes errechnet und bei $t = 0$ noch nicht bekannt ist. Für alle anderen Zeitschritte entsprechen die Parameter dem Wert der jeweiligen Speichertemperaturvariable des vorherigen Zeitschrittes.

Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Wärmeleitung in dem Parameter *heat_flows_cond_top* und die Ermittlung der Wärmedurchgangsverluste in dem Parameter *heat_flows_loss_top*. Die auftretende Wärmekonvektion durch die externen Anschlüsse, dargestellt im Parameter *heat_flows_conv_top*, setzt sich aus der Summe des Beladewärmestroms *heat_flows_conv_top_ch* und des Entladewärmestroms *heat_flows_conv_top_disch* zusammen. Die Darstellung des Betriebszustandes einer Beladung erfolgt in der Berechnung des Beladewärmestroms über die Multiplikation des Terms mit der binären Variable *status_sp*. Nimmt die Variable den Zustand eins an wird der Speicher beladen. Nimmt die Variable andernfalls den Wert null an, wird der Speicher entladen oder ruht. Dies wird erreicht, indem der Term des Entladewärmestroms mit $(1 - status_sp)$ multipliziert wird. Zuletzt werden die Ergebnisse der Teilterme im Parameter *temps_diff_layer_top* zusammengeführt. Die Nebenbedingung ist nur dann erfüllt, wenn der Temperaturwert der oberen Speicherschicht des aktuellen Zeitschrittes der Summe der Speichertemperatur des letzten Zeitschrittes *temp_prior_top* und der zuvor berechneten Temperaturdifferenz *temps_diff_layer_top* entspricht.

Effektiver Massenstrom des Wärmespeichers

In dieser Nebenbedingung erfolgt die Ermittlung des effektiven Speichermassenstroms \dot{m}_{sp} jedes Zeitschrittes nach der Massenstrombilanz:

$$\dot{m}_{sp} = (\dot{m}_{chp} - \dot{m}_{tc}) \cdot \delta_{sp} + (\dot{m}_{tc} - \dot{m}_{chp}) \cdot (1 - \delta_{sp}) \quad (4.17)$$

Im Falle einer Speicherbeladung (erster Teilterm) ergibt sich der Speichermassenstrom aus der Differenz zwischen dem Belademassenstrom des BHKWs \dot{m}_{chp} und dem Entlademassenstrom \dot{m}_{tc} zum Verbraucher. Die Massenbilanz dreht sich im Falle einer Speicherentladung (zweiter Teilterm). Abbildung 4.11 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Um eindeutig festzulegen, dass in einem Zeitschritt entweder eine Beladung oder eine Entladung des Speichers stattfindet, wird der Beladungsterm mit der binären Variable δ_{sp} multipliziert, wohingegen der Entladungsterm mit $(1 - \delta_{sp})$ multipliziert wird. Dadurch kann in einem Zeitschritt nur einer der beiden Terme einen Wert ungleich null annehmen. Beide Terme werden schließlich addiert.

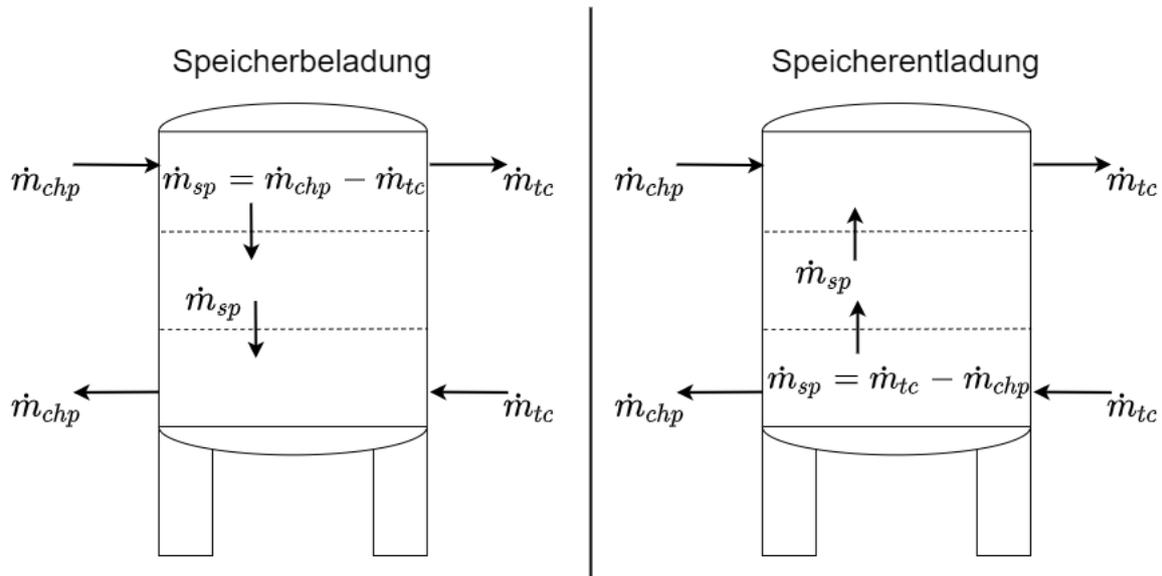


Abbildung 4.11: Externe und speicherinterne Massenströme des Wärmespeichers

Die programmiertechnische Umsetzung in Pyomo erfolgt in der Funktion `mass_flow_sp_rule`:

```
# Effective mass flow through TES
def mass_flow_tes_rule(model, timestep):
    return model.mass_flow_tes[timestep] == \
        (model.mass_flow_chp[timestep] - model.mass_flow_tc[timestep]) *
        → model.status_tes[timestep] + \
        (model.mass_flow_tc[timestep] - model.mass_flow_chp[timestep]) *
        → (1 - model.status_tes[timestep])
```

Thermische Leistungsbilanz der Knotenpunkte

In dieser Nebenbedingung wird exemplarisch die thermische Leistungsbilanz der oberen Speicherschicht beschrieben, in dem die auftretenden Wärmeströme zusammenlaufen. Im Modell wird daneben eine zweite Energiebilanz nach dem selben Schema für die untere Speicherschicht implementiert. Auch für die spätere Integration der Wärmepumpe wird das gleiche Vorgehen angewendet. Nach Gleichung 4.18 müssen zu jedem Zeitschritt die Summe der in den Bilanzraum eintretenden Wärmeströme ($\dot{Q}_{chp,s}$ und $\dot{Q}_{tes,disch}$) der Summe der austretenden Wärmeströme ($\dot{Q}_{tc,s}$ und $\dot{Q}_{tes,ch}$) entsprechen. Die Höhe der Wärmeströme ist abhängig von den jeweiligen Massenströmen und Temperaturdifferenzen. Für die Eindeutigkeit, ob in einem gegebenen Zeitschritt ein Entladewärmestrom $\dot{Q}_{tes,disch}$ oder ein Beladewärmestrom $\dot{Q}_{tes,ch}$ in die Bilanz mit eingeht, werden sie mit der binären Variable δ_{sp} multipliziert. Dabei steht $(1 - \delta_{sp})$ für das Entladen und δ_{sp} für das Beladen.

$$\dot{Q}_{chp,s} + \dot{Q}_{tes,disch} \cdot (1 - \delta_{sp}) = \dot{Q}_{tc,s} + \dot{Q}_{tes,ch} \cdot \delta_{sp} \quad (4.18)$$

Die Umsetzung in Pyomo erfolgt über die Funktion `power_balance_tes_top` analog zur Gleichung 4.18. Die berechneten Wärmeströme werden zuerst in vier Parametern definiert. Da für alle Wärmeströme die Wärmekapazität c_p sowie das Referenztemperaturniveau identisch sind,

beschränkt sich die Berechnung auf das Produkt aus dem Massenstrom und seinem Temperaturniveau. Über die Rückgabe ist definiert, dass die Nebenbedingung nur dann erfüllt ist, wenn die Summe der eintretenden Wärmeströme, der Summe der austretenden Wärmeströme entspricht.

```
# Power-Balance top layer
def power_balance_tes_top(model, timestep):
    Q_chp_s = model.mass_flow_chp[timestep] * model.temp_chp_s[timestep]
    Q_tes_disch = model.mass_flow_tes[timestep] *
        ↪ model.temp_tes_top[timestep] * (1 - model.status_tes[timestep])
    Q_tes_ch = model.mass_flow_tes[timestep] * model.temp_chp_s[timestep] *
        ↪ model.status_tes[timestep]
    Q_tc_s = model.mass_flow_tc[timestep] * model.temp_tc_s[timestep]
    return Q_chp_s + Q_tes_disch == Q_tes_ch + Q_tc_s
```

Thermische Lastdeckung

Die bereits beschriebene thermische Leistungsbilanz an den Knotenpunkten im Wärmespeicher werden durch die Nebenbedingung der thermischen Lastdeckung ergänzt. Hierdurch wird sichergestellt, dass ein Gleichgewicht zwischen thermischen Erzeugern und Verbrauchern in dem modellierten Heizungssystem besteht. Gleichung 4.19 definiert, dass das Produkt der variablen Größen des Massenstroms $\dot{m}_{tc}(t)$ und der Temperaturdifferenz $(T_{tc,s}(t) - T_{tc,r}(t))$ sowie der Wärmekapazität von Wasser c_p der Heizleistung $\dot{Q}_{tc}(t)$ des Technologiezentrums zu jedem Zeitschritt entsprechen muss.

$$\dot{m}_{tc}(t) \cdot c_p \cdot (T_{tc,s}(t) - T_{tc,r}(t)) = \dot{Q}_{tc}(t) \quad (4.19)$$

Im Pyomomodell wird die thermische Lastdeckung durch die Funktion `heat_flow_tec_rule` analog zu Gleichung 4.20 umgesetzt. Die Zeitreihe der Gesamtheizleistung des Technologiezentrums geht als Datenimport einer CSV-Datei in die Nebenbedingung mit ein.

```
# Heat flow of Technologie-Centrum
def heat_flow_tc_rule(model, timestep):
    return model.mass_flow_tc[timestep] * CP * (model.temp_tc_s[timestep] -
        ↪ model.temp_tc_r[timestep]) == model.heat_demand[timestep]
```

4.4 Erweitertes Optimierungsmodell

Das erweiterte Optimierungsmodell stellt eine Ergänzung des Grundoptimierungsmodells dar. Abbildung 4.12 veranschaulicht, dass gegenüber dem Grundmodell eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe als zweiter Wärmeerzeuger neben dem Blockheizkraftwerk fungiert. Wie in der derzeit vorhandenen hydraulischen Anbindung am Technologiezentrum speisen beide Wärmeerzeuger über einen gemeinsamen Zulauf ihre Wärme in die oberste Schicht der Wärmespeicher ein, bevor die Verbraucherkreisläufe über einen zweiten externen Ablauf in der oberen Speicherschicht

versorgt werden. Dabei kann die Wärmepumpe die Rücklauf­temperatur aus dem Speicher innerhalb ihrer Leistungsgrenzen auf ein höheres Vorlauf­temperaturniveau heben. Dazu nutzt sie frei zur Verfügung stehende Umweltwärme aus dem oberflächennahen Erdreich, die vermittelt über die elektrische Verdichterarbeit Vorlauf­temperaturen des Heizungssystems bis maximal 60°C ermöglicht (vgl. Anhang 7.7). Weiterhin gelten die in Kapitel 4.3.1 getroffenen Vereinfachungen. Neben der Erweiterung des Grundmodells um ausgewählte Variablen und Parameter zur Integration der Wärmepumpe wird eine zusätzliche Datenreihe der Niedertemperaturquelle in das Modell eingelesen. Dazu erfolgt der Ausbau bestehender Nebenbedingungen des Grundmodells, welcher nachfolgend erläutert wird.

4.4.1 Erweiterte Auswahl von Variablen und Parametern

In diesem Abschnitt werden die zusätzlich ausgewählten Parameter und Variablen eingeführt (vgl. Abbildung 4.12), die für eine Integration der Wärmepumpe in das bestehende Grundmodell notwendig sind. Die zur thermischen Leistungsbestimmung der Wärmepumpe relevante Größe des Massenstroms \dot{m}_{hp} wird als Variable in den Grenzen von 0 - 2000 kg/h angenommen. Die Temperaturspreizung ΔT_{hp} zwischen Vor- und Rücklauf­temperatur der Wärmepumpe wird mit einem konstanten Wert von 5 K angenommen. Ist die Wärmepumpe in Betrieb, lässt sich die Vorlauf­temperatur $T_{hp,s}$ für jeden Zeitschritt aus der Summe von Speicherrücklauf­temperatur $T_{pro,r}$ und der Temperaturspreizung ermitteln. Um zu gewährleisten, dass beide Wärmeerzeuger über einen gemeinsamen Zulauf ihre Wärme in die oberste Schicht der Wärmespeicher einspeisen, werden die variablen Größen der Verbrauchervorlauf­temperatur $T_{pro,s}$ und des Verbrauchermassenstroms \dot{m}_{pro} definiert. Die Grenzen der Verbrauchervorlauf­temperatur werden zwischen der minimalen Bezugstemperatur der Umgebung von 20°C und maximal auftretenden Vorlauf­temperatur des BHKWs von 80°C festgelegt. Der Massenstrom kann zwischen den Grenzen 0 - 2000 kg/h variieren, was innerhalb der maximal auftretenden Förderströme der Wärmeerzeuger am Technologiezentrum liegt. Für die Darstellung des Betriebszustandes der Wärmepumpe wird die binäre Variable δ_{hp} definiert.

4.4.2 Erweiterte Datenimporte

Für die Modellierung der Wasser-Wasser-Wärmepumpe wird die Solevorlauf­temperatur als zusätzlicher Eingangswert in das Hauptprogramm eingelesen. Aufgrund des langen Stillstandes der Wärmepumpe steht keine ausreichende Datengrundlage basierend auf Messwerten zur Verfügung. Grundlage zur Abschätzung des Jahresverlaufs der Niedertemperaturquelle am Standort in Bergedorf werden die Simulationsergebnisse einer geothermischen Leistungsprognose für Energiepfähle ausgewertet, die vor dem Neubau des Forschungsgebäudes durchgeführt wurden [34].

Hintergrund des Gutachtens sind u.a. die unvorteilhaften Baugrundbedingungen am Standort, die eine Tiefengründung des Gebäudes mittels Pfählen notwendig machten. In diesem Zusammenhang wurde das Potenzial der geothermischen Aktivierung dieser Gründungspfähle als Energiepfähle untersucht. Die Berechnung der Temperaturverläufe in dem Gutachten wurde mit dem für Energiepfähle und Erdwärmesonden entwickelten Berechnungsprogramm Earth Energy Designer (EED 3.16) durchgeführt. Die verwendete Simulationssoftware ermöglicht es verschiedene Anlagenkonfigurationen zu vergleichen und wirtschaftlich zu optimieren. Anhand einer

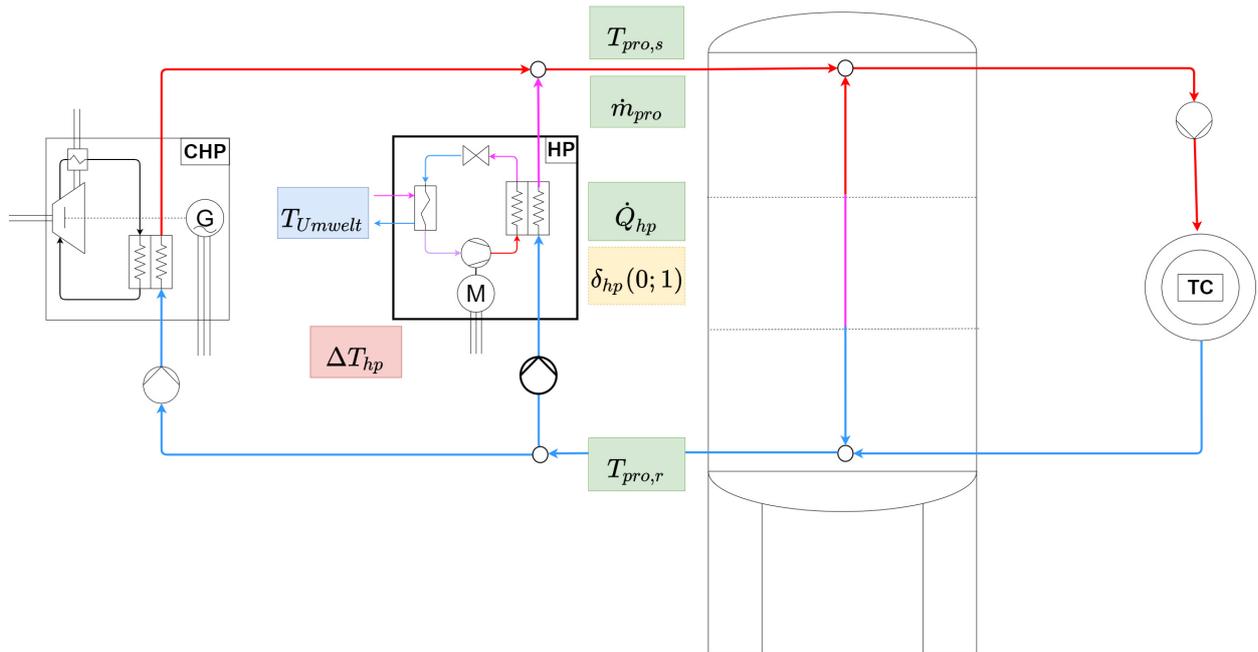


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der erweiterten Optimierung bestehend aus BHKW, Wärmepumpe, Schichtenspeicher und Verbraucher

Vielzahl von Eingangsparametern wird außerdem die Auswirkung der Wärmeentnahme und Wärmeeinlagerung in den Untergrund untersucht und die resultierende Vorlauftemperatur der Niedertemperaturquelle prognostiziert [34].

Laut des Gutachtens ist der Grundlastbetrieb mit Energiepfählen am wirtschaftlichsten, trotzdem werden in der Simulation einige Stunden pro Monat im Spitzenlastbetrieb angenommen. Weiterhin wird das für die Simulation als Bemessungskriterium im Kühlbetrieb die obere Temperaturgrenze auf 18°C gesetzt, um sicherzustellen, dass im Sommer eine passive Kühlung möglich ist [34].

Um übermäßiges Auskühlen oder Erwärmen der Untergrundes zu verhindern, muss möglichst ein Ausgleich zwischen dem Wärmeeintrag in den Untergrund über die Sommerzeit und dem Wärmeentzug aus dem Untergrund während der Heizperiode im Winter sichergestellt werden. Diese geschieht durch die Annahme einer ausgeglichenen Jahresheizarbeit und Jahreskühlarbeit von jeweils 20 MWh. Bei einer Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 3 sowie einer Entzugsleistung von 10 kW ergeben sich die in Abbildung 4.13 veranschaulichten Verläufe der mittleren Fluidtemperatur im geforderten Betrachtungszeitraum von 25 Jahren [34].

Ausgehend von der mittleren ungestörten Erdreichtemperatur von $10,5^{\circ}\text{C}$ steigt die simulierte Fluidtemperatur über die Sommermonate bis auf etwa 18°C , bevor sie in der Heizperiode bis unterhalb der ungestörten Erdreichtemperatur fällt. Es lässt sich außerdem der deutlichste Auskühlungseffekt von Jahr 1 zu Jahr 2 während der Heizperiode von Januar bis etwa April erkennen. In den darauf folgenden Jahren verläuft die mittlere Fluidtemperatur der Niedertemperaturquelle relativ gleichmäßig etwa auf dem Niveau von Jahr 2.

Der lange Stillstand der Wärmepumpe führt zu der Annahme, dass bei der Wiederinbetriebnahme der wahrscheinlichste Temperaturverlauf dem von Jahr 1 entspricht. Deshalb wird die in Gleichung 4.20 dargestellte polynomische Regression fünften Grades benutzt um den Verlauf anzunähern.

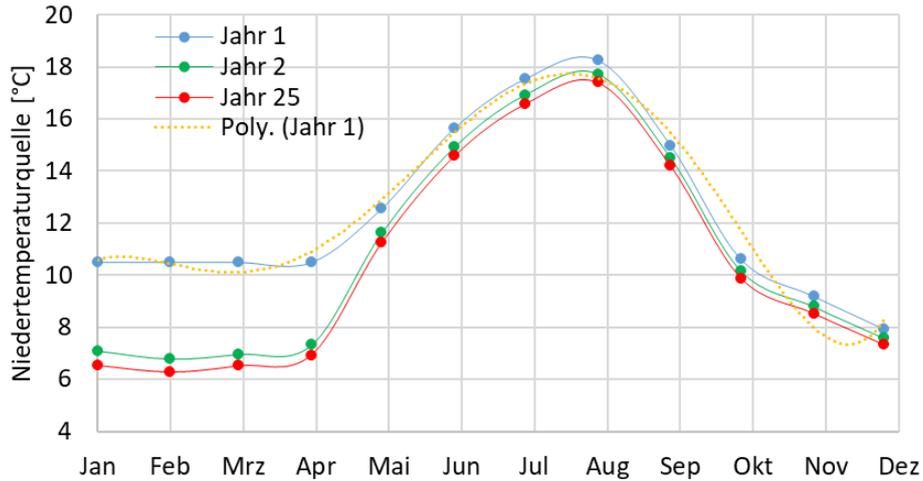


Abbildung 4.13: Niedertemperaturquelle im Jahresverlauf nach [34]

$$T_{u,s}(t) = 1 \cdot 10^{-20}t^5 - 9 \cdot 10^{-16}t^4 + 2 \cdot 10^{-11}t^3 - 1 \cdot 10^{-7}t^2 + 3 \cdot 10^{-7}t + 11,073 \quad (4.20)$$

4.4.3 Erweiterung der Nebenbedingungen

CO₂-Emissionen durch den Wärmepumpenbetrieb

In dieser Nebenbedingung wird die Menge der CO₂-Emissionen m_{hp,CO_2} durch den Wärmepumpenbetrieb für jeden Zeitschritt bestimmt. Dies geschieht vermittelt über die reale Leistungszahl im Teillastbereich ε_{tl} und die elektrische Leistung $P_{hp,el}$ des Verdichtens, die notwendig ist, um die Umweltwärme aus dem oberflächennahen Erdreich auf das jeweilige Vorlauftemperaturniveau des Heizungssystems zu heben.

Der elektrische Leistungsbedarf der Wärmepumpe wird in drei Schritten ermittelt. Zuerst erfolgt die Berechnung der Koeffizienten m_{reg} und b_{reg} einer linearen Regressionsgeraden zur Abschätzung der realen Leistungszahl. Abbildung 4.14 veranschaulicht hierzu die Herstellerkennzahlen der Leistungszahl über den Teillastbereich für verschiedene Heizungsvorlauftemperaturen in Abhängigkeit von der Quellentemperatur (vgl. Anhang 7.5, [16]).

Dabei verläuft die Leistungszahl im realen Betrieb immer unterhalb der idealen Leistungszahl ε_c , die nach Carnot über die Vorlauftemperatur der Niedertemperaturquelle T_u und der zu erreichenden Vorlauftemperatur $T_{hp,s}$ des Heizungssystems charakterisiert ist. Hohe Leistungszahlen sind nach Gleichung 4.21 durch eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Vorlauftemperatur des Heizkreises und Quellentemperatur erreichbar, was die realen Verläufe der Leistungszahl in Abbildung 4.14 widerspiegelt. Bei einer niedrigen Heizungsvorlauftemperatur von 35°C erreicht die Wärmepumpe Leistungszahlen mit einem Wert um 4, wohingegen bei höheren Heizungsvorlauftemperaturen von 45°C und 55°C die Leistungszahl bis auf unter 2,5 herabsinkt.

$$\varepsilon_c = \frac{T_{hp,s}}{T_{hp,s} - T_u} \quad (4.21)$$

Mit steigender Quellenvorlauftemperatur steigt die reale Leistungszahl je nach Heizungsvorlauftemperatur unterschiedlich stark an. Für die drei gegebenen Heizungsvorlauftemperaturnive-

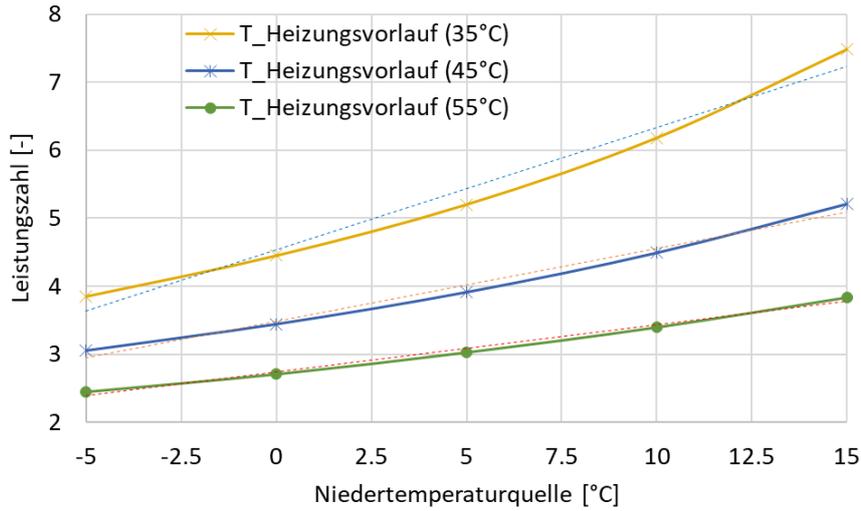


Abbildung 4.14: Leistungszahl Smart Heat classic über Quellenvorlaufstemperatur nach Anhang 7.5, [16]

aus lassen sich die Verläufe jeweils über eine lineare Regression annähern. Um nun die jeweiligen Koeffizienten der linearen Regressionsgeraden zwischen diesen Temperaturstufen zu ermitteln, werden die zwei Regressionsgeraden aus dem bekannten Koeffizienten nach Gleichung 4.22 und 4.23 gebildet (vgl. Anhang 7.8).

$$m_{reg} = -0,0897 \cdot T_{hp,s} + 7,6215 \quad (4.22)$$

$$b_{reg} = -0,0055 \cdot T_{hp,s} + 0,3673 \quad (4.23)$$

Nach dem Einsetzen des jeweiligen Heizungstemperaturniveaus in Gleichung 4.22 und 4.23 werden die ermittelten Koeffizienten im zweiten Schritt für die Berechnung der zugehörigen realen Leistungszahl in Gleichung 4.24 unter Einbeziehung der Niedertemperaturquelle genutzt.

$$\varepsilon_{tl} = m_{reg} \cdot T_{u,s}(t) + b_{reg} \quad (4.24)$$

Im letzten Schritt ergibt sich der elektrische Leistungsbedarf $P_{hp,el}(t)$ der Wasser-Wasser-Wärmepumpe nach 4.25 aus dem nutzbaren Wärmestrom $\dot{Q}_{hp}(t)$ durch die jeweilige Leistungszahl ε_{tl} .

$$P_{hp,el}(t) = \frac{\dot{Q}_{hp}(t)}{\varepsilon_{tl}} \quad (4.25)$$

Anschließend geht der elektrische Leistungsbedarf der Wärmepumpe mit einem positiven Vorzeichen in die bereits beschriebene Nebenbedingung zur Bestimmung der CO_2 -Emissionen aufgrund des Netzstrombezuges ein. Gleichung 4.26 zeigt die ergänzte Funktion.

$$\begin{aligned} m_{netz,CO_2}(t) &= E_{tc} \cdot f_{Strommix} \\ &= (P_{rl,tc}(t) - P_{chp,el}(t) + P_{hp,el}(t)) \cdot \Delta t \cdot \bar{f}_{Strommix,D} \cdot (1 + f_{Strommix,BD}(t)) \end{aligned} \quad (4.26)$$

5 Ergebnisse der simulierten Fahrpläne

Auf Grundlage der in Kapitel 4 entwickelten Modelle werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der simulierten Fahrpläne dargestellt. Hierzu wird zuerst die Plausibilität einzelner Programmteile überprüft. Daran anschließend wird die Jahresauswertung der Grundoptimierung (BHKW/Speicher/Verbraucher) der der erweiterten Optimierung (BHKW/Wärmepumpe/ Speicher/Verbraucher) gegenübergestellt.

5.1 Plausibilität des Modells

In diesem Unterkapitel wird die Plausibilität einzelner Programmteile überprüft. Hierzu wurden zuerst Testdaten des Gewichtungsfaktors für Bergedorf generiert. Die Testdaten weisen ein stündlich wechselndes Muster zwischen -1 (lokaler Stromüberschuss) und 1 (lokaler Strommangel) auf und werden wie die anderen Datenimporte über eine CSV-Datei in das Skript des Hauptprogrammes eingelesen (vgl. Abbildung 5.1). Im Anschluss wird nun das Verhalten des Modells für einen Wintertag im Januar in 96 Simulationsschritten für dieses Testmuster veranschaulicht. Neben der visuellen Kontrolle wird eine kurze rechnerische Prüfung der sich ergebenden Speichertemperaturverläufe durchgeführt.

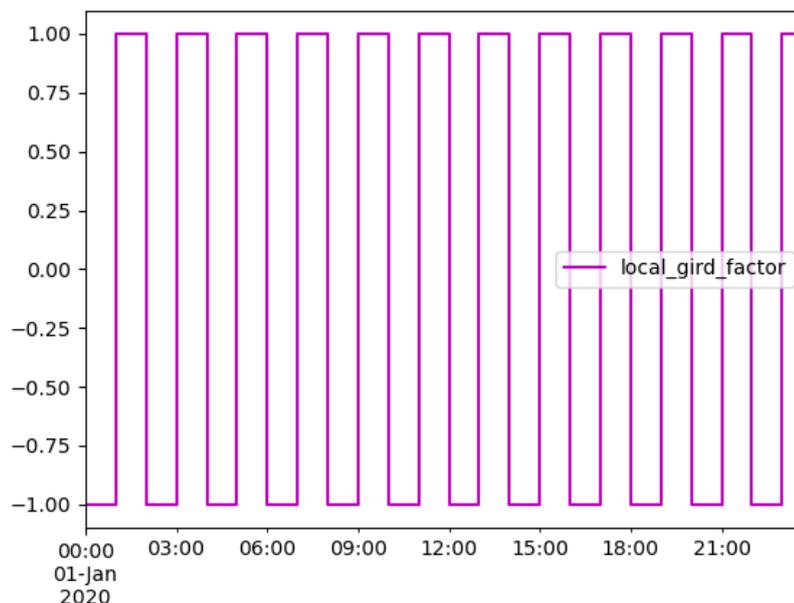


Abbildung 5.1: Testdaten des Gewichtungsfaktors für Bergedorf

Zur Erinnerung: Der Gewichtungsfaktor geht vermittelt über die CO_2 -Emissionen durch den Netzstrombezug in die Zielfunktion ein und beeinflusst dadurch das Betriebsverhalten der Wärmeerzeuger. In Kapitel 4.3.3 wurde beschrieben, wie der Faktor berechnet wird. Es wurde deut-

lich, dass er Werte zwischen -1 und 0 annimmt, solange die Stromerzeugung den Stromverbrauch in Bergedorf übersteigt und Werte zwischen 0 und 1 für den Fall eines Strommangels auf lokaler Ebene. Wird nun der durchschnittliche Emissions-Faktor des deutschen Strommixes mit dem lokalen Faktor gewichtet, nimmt der Gesamt-Emissionsfaktor Werte zwischen 0 und $2\bar{f}_{Strommix,D}$ an. Das heißt, dass der Gesamt-Emissionsfaktor zur Berechnung der CO₂-Emissionen durch den Netzstrombezug gegen null strebt im Falle eines lokalen Stromüberschusses und gegen $2\bar{f}_{Strommix,D}$ bei einem Strommangel in Bergedorf.

Plausibilität des Modellverhaltens

Zur Vereinfachung wurde für diesen Testdurchlauf ein konstanter Wärmebedarf von 20 kW und eine konstante Residuallast des Technologiezentrums von 10 kW gewählt. Als Startzustand des Wärmespeichers wird ein vollständig entladener Speicher mit einer Schichttemperatur von 20°C angesetzt. Der Ladestand des Speichers muss im letzten Zeitschritt der Simulation zwischen 0 und 10 % liegen.

Durch die Definition der Nebenbedingung müssen die Massenströme des Blockheizkraftwerkes und der Wärmepumpe dem Erzeugermassenstrom zu jedem Zeitschritt entsprechen. Neben den Massenstrombilanzen erzwingen die Leistungsbilanzen ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen den Wärmeströmen der Wärmeerzeuger, des Speichers und des Verbrauchers zu jedem Zeitschritt. Die Graphen in Abbildung 5.2 zeigen das beschriebene Verhalten der Massen- und Wärmeströme in ihren definierten Grenzen auf. Der Speicher geht als vollständig entladen in die Simulation ein. Am Ende des Tages ist er nahezu entladen. Zudem wird ersichtlich, wie sich das stündlich wechselnde Muster des lokalen Gewichtungsfaktors auf die Variablen auswirkt.

Graph 1 von Abbildung 5.2 verdeutlicht: In Stunden eines lokalen Stromüberschusses (Stunden 1, 3, 5, usw.), liegt ein hoher Wärmepumpenmassenstrom (orangefarbene Fläche) vor. Der BHKW-Massenstrom (blaue Fläche) fällt sehr gering aus oder beträgt null. In Stunden eines lokalen Strommangels (Stunden 2, 4, 6, usw.) ist die Wärmepumpe meist außer Betrieb, ihr Massenstrom sinkt aber nicht immer auf null. Die Summe beider Massenströme entspricht zu jedem Zeitschritt dem Verbrauchermassenstrom (rote Linie). Ab etwa 16 Uhr ist nur noch ein Wärmepumpenmassenstrom zu beobachten. Der BHKW-Massenstrom ist ab diesem Zeitpunkt null.

Graph 2 von Abbildung 5.2 verdeutlicht: Es zeigt sich ähnlich wie zuvor das markante Muster des stündlich wechselnden Gewichtungsfaktors. In Stunden eines lokalen Stromüberschusses deckt ausschließlich die Wärmepumpe (orangefarbene Fläche) den Wärmebedarf des Technologiezentrums, wohingegen während eines lokalen Strommangels das Blockheizkraftwerk (blaue Fläche) betrieben wird. Entsprechend seiner oberen thermischen Leistungsgrenze wird das BHKW zumeist unter Vollast bei 36 kW betrieben, wobei der zu deckende Wärmebedarf (rote Linie) von 20 kW meist übertroffen wird. Der überschüssige Wärmestrom wird zum Laden des Speichers verwendet. Aufgrund des zu geringen Leistungsniveaus der Wärmepumpe (maximal 10 kW) wird der Speicher nur zu Zeiten des Wärmepumpenbetriebes entladen. Gegen 16 Uhr erreicht der Speicher seinen höchsten Ladestand von etwa 50 %. Ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende des Tages decken Wärmespeicher und Wärmepumpe den gesamten Wärmebedarf ab. Es kommt zu einem kontinuierlichen Entladeprozess.

Graph 3 von Abbildung 5.2 verdeutlicht: Das Verhalten des Ladestandes wird durch die in Graph 3 dargestellten Temperaturverläufe des Schichtenspeichers weiter gestützt. Al-

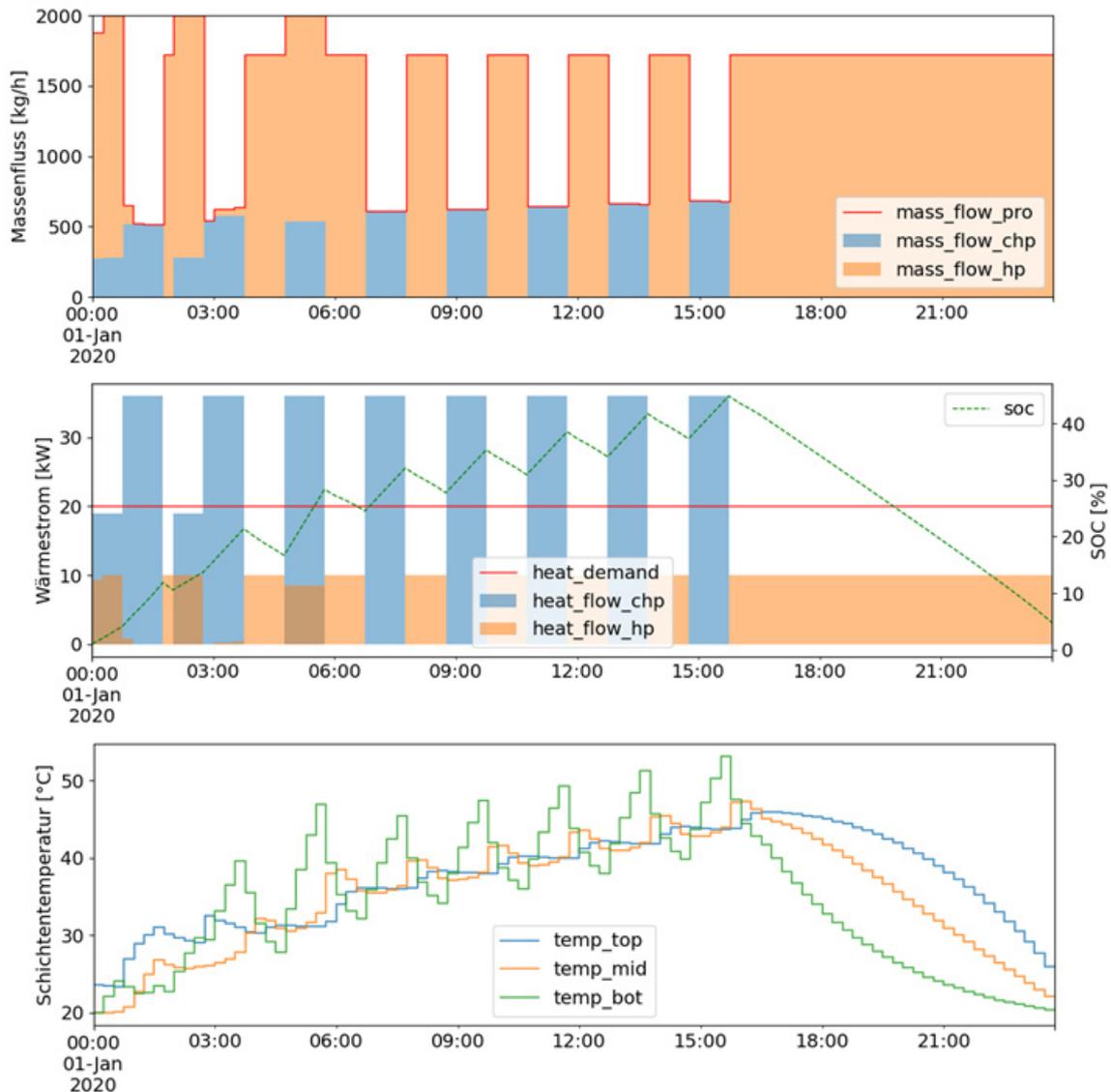


Abbildung 5.2: Simulationsergebnisse der Plausibilitätsprüfung des Modells - Graph 1: Verlauf der Massenströme, Graph 2: Verlauf der Wärmeströme, Graph 3: Verlauf der Speichertemperaturen

le drei Schichttemperaturen steigen, wenn ein überschüssiger Wärmestrom des BHKWs zur Verfügung steht und sinken zu Zeiten eines Wärmestrommangels seitens der Wärmepumpe. Es kommt also über den Tagesverlauf zu mehreren kurzen Lade- und Entladesituationen im Speicher. Anders als erwartet steigt jedoch die Schichttemperatur während einer Beladung (lokaler Strommangel in den Stunden 1, 3, 5, usw.) in der untersten Schicht (grüne Linie) zuerst und stärker an als die der mittleren und oberen Speicherschicht (orange und blaue Linie). Hingegen erscheint das Verhalten während der kontinuierlichen Speicherentladung ab 16 Uhr plausibel. Hier sinkt zuerst die unterste Schichttemperatur durch den kälteren Rücklauf, gefolgt von der mittleren und oberen Temperatur. Die Schichtung bleibt bestehen. Aus einer Auswertung der Rücklauftemperaturen wurde ersichtlich, dass der Speicher von unten nach oben durch den Rücklauf beladen wird. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um mögliche Fehlerquellen zu beseitigen.

Auswirkungen einer konstanten Rücklauftemperatur auf den Schichtenspeicher

Aufgrund seines widersprüchlichen Ladeverhaltens werden für eine genauere Prüfung des Speichermodells die Eingangsdaten weiter manipuliert. Zum einen wird der Gewichtungsfaktor über einen Zeitraum von 6 Stunden a 24 Simulationsschritten konstant gewählt und wie zuvor zwischen -1 und 1 variiert. Zudem wird die Rücklauftemperatur des Verbrauchers konstant bei einem Wert von 20°C gehalten. Die Grenzregel der Ladestandsvariablen wird so ausgelegt, dass im letzten Simulationsschritt der Ladestand im Speicher mindestens 80 % betragen muss.

Die Simulation eines Tagesverlaufs ergibt die in Abbildung 5.3 veranschaulichten Schichttemperaturverläufe. Zwischen 0 und ca. 6 Uhr wird der Speicher beladen, zwischen 6 und 15 Uhr entladen und für den Rest des Tages nicht genutzt. Im Vergleich zu Abbildung 5.2 lässt sich nun ein plausibles Ladeverhalten des Schichtenspeichermodells erkennen. Die Temperatur in der obersten Schicht steigt am schnellsten bis auf die maximale Speichertemperatur von 80°C an, gefolgt von den Temperaturen in den Schichten darunter. Während der Entladung zeigt sich das Schichtungsverhalten, indem die Temperatur in der obersten Schicht über die Zeit der Entladung relativ konstant bleibt und erst gegen 15 Uhr stark absinkt. Dahingegen sinkt die untere Speichertemperatur schneller durch das kältere, vom Verbraucher zurückströmende Heizwasser. Wird der Speicher nicht durchströmt, bleibt die Schichtung bei einer allmählichen Abkühlung bestehen. Eicker ermittelt mit ihrem Schichtenspeichermodell ähnliche Belade- und Entladeverläufe, weshalb das Speichermodell als plausibel bewertet wird [22].

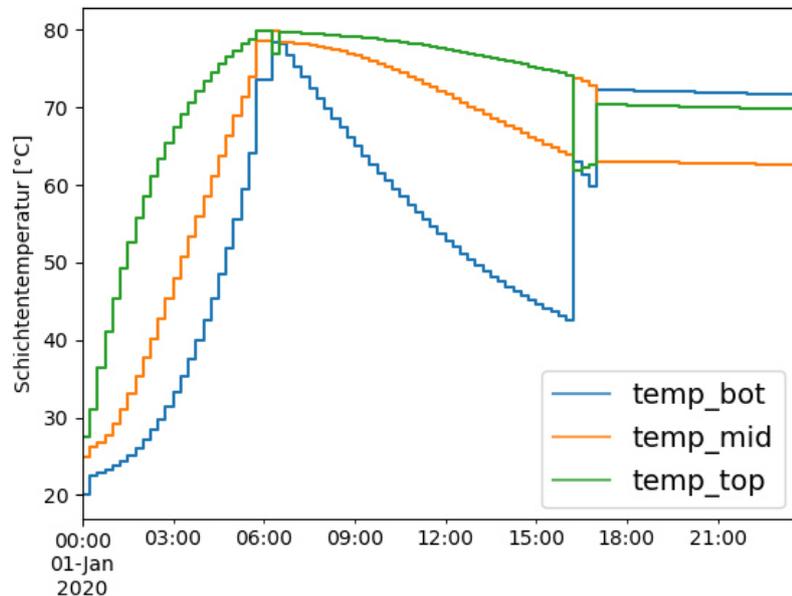


Abbildung 5.3: Testverläufe der Schichtentemperaturen

Eine rechnerische Prüfung der oberen Schichtentemperatur lässt sich nach der Gleichung 5.1 durchführen. Die oberste Schicht wird im ersten Zeitschritt mit einem effektiven Speichermassenstrom von 1000 kg/h bei einer Fluidtemperatur von 50°C beladen ($\delta = 1$). Der Wärmedurchgangskoeffizient der Deckenwand beträgt 0,3575 W/m²K und die effektive Wärmeleitfähigkeit liegt bei 1 W/mK. Die Schichtenhöhe beträgt 2 m, bei einer Querschnittsfläche von 0,5 m². Die Umgebungstemperatur sowie die Anfangstemperatur der Speicherschichten beträgt 20°C. In der

Berechnung entfallen die Terme der effektiven Wärmeleitfähigkeit und der Speicherverluste, da die Temperaturniveaus für diesen Zeitschritt ausgeglichen sind. Im ersten Zeitschritt von 15 Minuten ergibt sich eine Temperaturerhöhung der obersten Schicht von $7,5^\circ\text{C}$, was zu einer neuen Schichttemperatur von $27,5^\circ\text{C}$ führt.

$$T_{top}(t) = T_{top}(t-1) + \Delta T(t)$$

$$\Delta T(t) = \underbrace{\Delta t}_{0,25h} / \left(\underbrace{\rho_w}_{998 \frac{kg}{m^3}} \underbrace{V}_{1m^3} \underbrace{c_p}_{1,162 \frac{Wh}{kgK}} \right) \cdot \left(\begin{array}{l} \left(\underbrace{A_q}_{0,5m^2} \cdot \underbrace{\lambda_{eff}}_{1 \frac{W}{mK}} / \underbrace{l_z}_{2m} \right) \cdot \left(\underbrace{T_{mid}(t-1)}_{20^\circ C} - \underbrace{T_{top}(t-1)}_{20^\circ C} \right) + \\ \underbrace{\delta}_{0;1} \cdot \left(\underbrace{\dot{m}_{sp}}_{1000 \frac{kg}{h}} \cdot \underbrace{c_p}_{50^\circ C} \left(\underbrace{T_{pro}}_{50^\circ C} - \underbrace{T_{top}(t-1)}_{20^\circ C} \right) \right) - \\ \left(\underbrace{U_D}_{0,3575 \frac{W}{m^2K}} \cdot A_q + \underbrace{U_Z}_{1 \frac{W}{mK}} \cdot \underbrace{l_z}_{2m} \right) \left(\underbrace{T_{top}(t-1)}_{20^\circ C} - \underbrace{T_u}_{20^\circ C} \right) \end{array} \right)$$

$$T_{top}(t) = 20^\circ C + 7,5^\circ C = 27,5^\circ C \tag{5.1}$$

5.2 Analyse und Vergleich der Fahrpläne im Jahresverlauf

Nach der Plausibilitätsprüfung wird nun das Modellverhalten im Jahresverlauf auf Grundlage der realen Eingangsdaten analysiert. Hierzu werden jeweils 365 Fahrpläne für das Jahr 2020 für die Grundoptimierung (BHKW/Speicher/Verbraucher) und für die erweiterte Optimierung (BHKW/Wärmepumpe/Speicher/Verbraucher) durchgeführt. Ziel ist es, das Gesamtjahresverhalten beider Fahrplanvarianten in Bezug auf ihre technische Effizienz und ihre ökologische Nachhaltigkeit zu vergleichen.

Umsetzung

Bei der Durchführung der Jahresauswertung der beiden Fahrplanvarianten konnte nur an einer begrenzten Anzahl der Tage ein optimaler Fahrplan gefunden werden. Es stellte sich heraus, dass die Findung eines optimierten Fahrplans durch das Variieren einzelner Eingangsparameter verbessert werden konnte. Auf dieser Grundlage wurde ein automatisiertes Skript für das Variieren der Eingangswerte im Falle eines Abbruchs entwickelt und erfolgreich für beide Jahressimulationen der Grundoptimierung und der erweiterten Optimierung durchgeführt. Abbildung 5.4 zeigt das Flussdiagramm der programmiertechnischen Umsetzung.

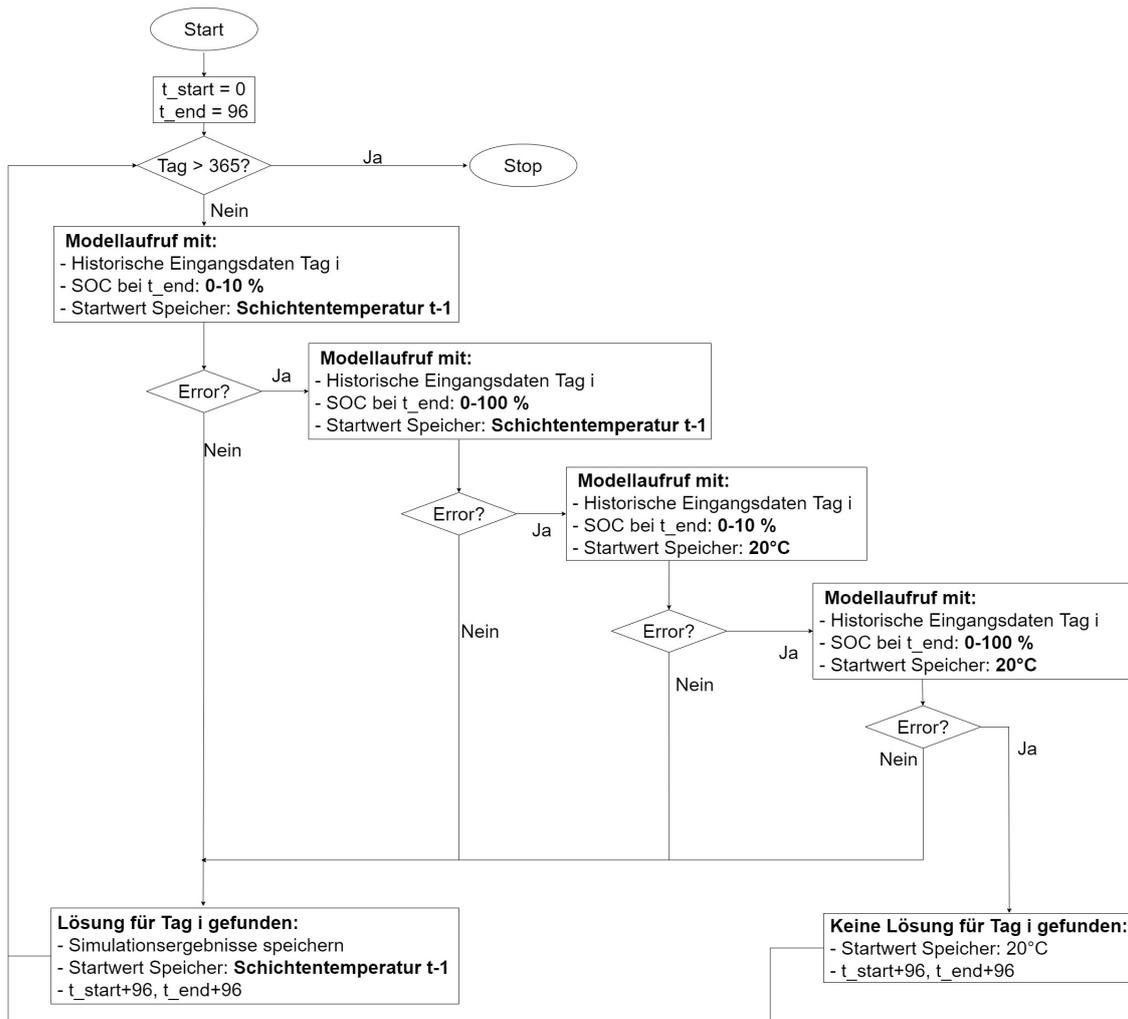


Abbildung 5.4: Flussdiagramm für Programmablauf der Jahresauswertung

Der Startwert für die Schichttemperaturen der Fahrplansimulation des ersten Tages wird mit jeweils 20°C gewählt, was einen vollständig entladenen Wärmespeicher bedeutet. Der Ladezustand des Speichers im letzten Zeitschritt dieser Fahrplanerstellung wird zwischen 0 und 10 % festgelegt, damit der Speicher am Ende der Tagessimulation möglichst wieder entladen ist und keine Wärmeenergie verloren geht. Im Falle eines Abbruchs wird die obere Grenze des Ladezustands für den letzten Zeitschritt auf 100 % gesetzt und die Tagessimulation wiederholt. Kommt es dennoch zu einem Abbruch wird der Initialwert der Schichttemperatur des Wärmespeichers verändert. Die Wiederholung der Simulation mit veränderten Initialwerten führte häufig zu einer erfolgreichen Fahrplanoptimierung. Endgültig kein Fahrplan ergab sich für den jeweiligen Tag, an dem selbst die Änderung der Eingangsparameter keine Lösung des Optimierungsproblems erbrachte. Diese Tage werden übersprungen. Wird die Fahrplanerstellung erfolgreich umgesetzt, werden die Ausgangswerte der aktuellen Simulation zu den Eingangswerten des nächsten Tages. Dieser Prozess wiederholt sich für das gesamte Jahr, bevor die Simulation stoppt.

5.2.1 Allgemeine Analyse

Allgemein ergab die Auswertung der Jahressimulation, dass für einzelne Tage keine optimale Lösung gefunden werden konnte. Abbildung 5.5 veranschaulicht eine Übersicht über die Anzahl der erfolgreich simulierten Fahrpläne für die Grundoptimierung und die erweiterte Optimierung. Für die erweiterte Optimierung konnte an insgesamt 80 % der Tage des Jahres 2020 ein optimaler Fahrplan bestimmt werden, wohingegen eine Fahrplanerstellung mit der Grundoptimierung an 63 % der Tage durchführbar war. Auffällig ist, dass über die Sommermonate für beide Varianten am wenigsten Fahrpläne erfolgreich erstellt werden konnten.

Ein kompletter Durchlauf der Jahressimulation der Grundoptimierung konnte nach einer Rechenzeit von 4,28 Stunden abgeschlossen werden. Aufgrund der höheren Komplexität erhöht sich die Rechenzeit für die erweiterte Optimierung um etwas mehr als 30 Minuten auf insgesamt 5,03 Stunden. Durchschnittlich beträgt die Rechenzeit zur Erstellung eines einzelnen Fahrplans für beide Varianten weniger als eine Minute. Zur Vergleichbarkeit beider Fahrplanvarianten werden die Ergebnisse in der Auswertung auf ein Jahr beziehungsweise den jeweiligen Jahresabschnitt (Winter, Frühling, Sommer oder Herbst) hochgerechnet.

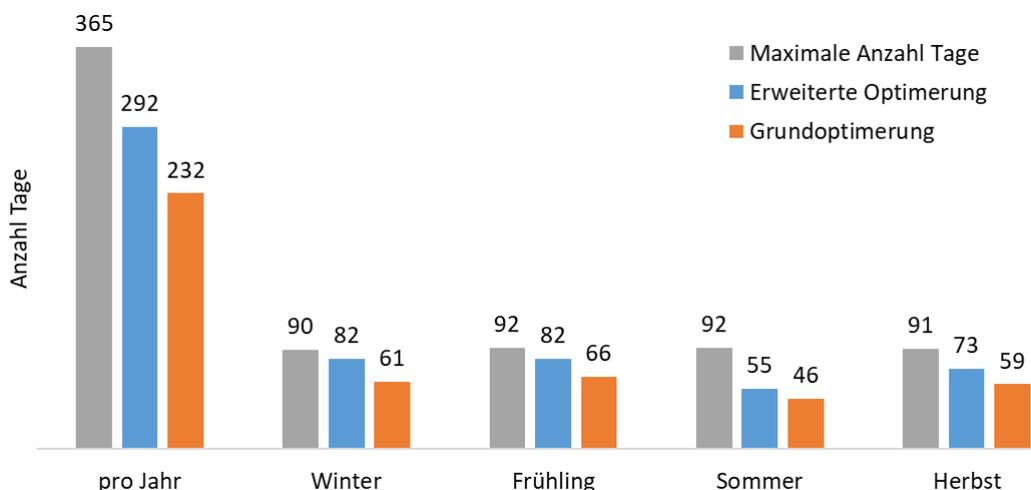


Abbildung 5.5: Anzahl der erfolgreich simulierten Fahrpläne für die Grundoptimierung und die erweiterte Optimierung

5.2.2 Visuelle Analyse

Die visuelle Auswertung der Fahrpläne beider Fahrplanvarianten wird exemplarisch an einem ausgewählten Jahresabschnitt veranschaulicht. Abbildung 5.6 zeigt den Fahrplan vom 24.02.2020 bis zum 26.02.2020 der Grundoptimierung. Auf der linken Ordinate wird der BHKW-Wärmestrom (blaue Fläche) abgebildet. Er variiert in seinen Leistungsgrenzen zwischen 19 bis 36 kW. Die beiden rechten Ordinaten drücken den Gewichtungsfaktor (lila Linie) sowie den Ladestand des Wärmespeichers (grün gestrichelte Linie) aus. Der Gewichtungsfaktor variiert in dem betrachteten Zeitraum zwischen -0,5 (lokaler Stromüberschuss) und 0,4 (lokaler Strommangel). Zu Beginn eines neuen Fahrplans (jeweils um 0 Uhr) liegt der Ladestand erzwungenermaßen zwischen 0 und 10 %. Zu allen anderen Zeitschritten variiert er frei zwischen 0 und 100 %. Der höchste Ladestand wird meist während hoher Wärmebedarfe um die Mittagszeit erreicht und beträgt in diesem Fall 80 %. Das Blockheizkraftwerk wird vornehmlich unter Volllast während Zeiten eines positiven Gewichtungsfaktors für Bergedorf (lokaler Strommangel) gefahren. Zu Zeiten negativer Gewichtungsfaktoren (lokaler Stromüberschuss) wird vornehmlich der Speicher entladen oder bei zu geringem Ladestand das BHKW im Teillastbereich betrieben. Zu erkennen ist außerdem, dass das BHKW in Zeitschritten eines lokalen Stromüberschusses mehrfach getaktet wird, was auf das Optimierungsziel der Minimierung der CO₂-Gesamtemissionen am Technologiezentrum zurückzuführen ist. Der Wärmebedarf (rote Linie) wird von dem BHKW-Wärmestrom und dem Wärmespeicher zu jedem Zeitpunkt abgedeckt.

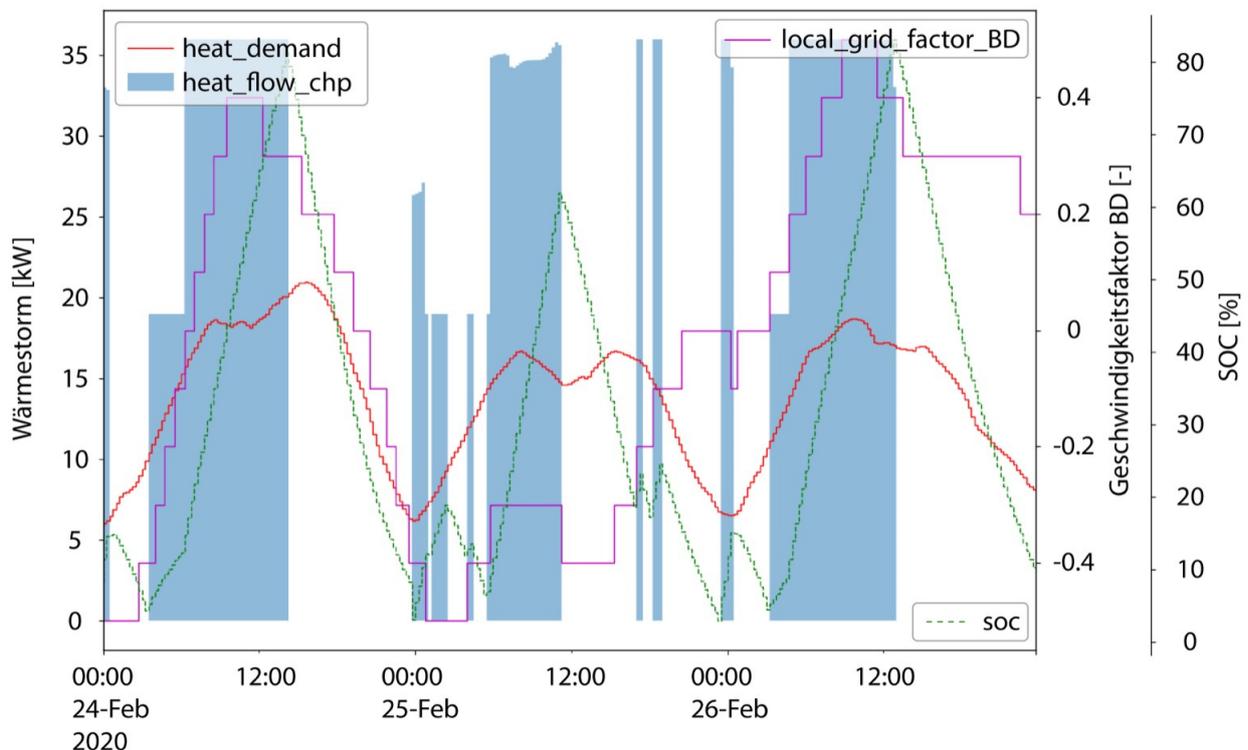


Abbildung 5.6: Fahrplan der Grundoptimierung am 24.02.2020

In der visuellen Darstellung (Abbildung 5.7) der erweiterten Optimierung im selben Zeitraum wird das System durch die Wärmepumpe ergänzt (orangefarbene Fläche). Der Wärmestrom der Wärmepumpe variiert zwischen 0 und 10 kW. Sie wird vornehmlich zu Zeiten negativer Gewichtungsfaktoren (lokaler Stromüberschuss) betrieben. Im Vergleich zum Fahrplan der Grundopti-

mierung wird das BHKW durch den zusätzlichen Erzeuger der Wärmepumpe kürzer betrieben und weniger stark getaktet. Ebenfalls wird der Speicher weniger stark durch das BHKW beladen als in der Grundoptimierung (vgl. 25.02.2020, 12 Uhr). Eine Beladung des Wärmespeichers durch die Wärmepumpe findet nur geringfügig statt, was auf die meist niedrigen Rücklaufstemperaturniveaus (20-55°C) zu den Wärmeerzeugern und die geringe Temperaturspreizung der Wärmepumpe von 5 K zurückzuführen ist.

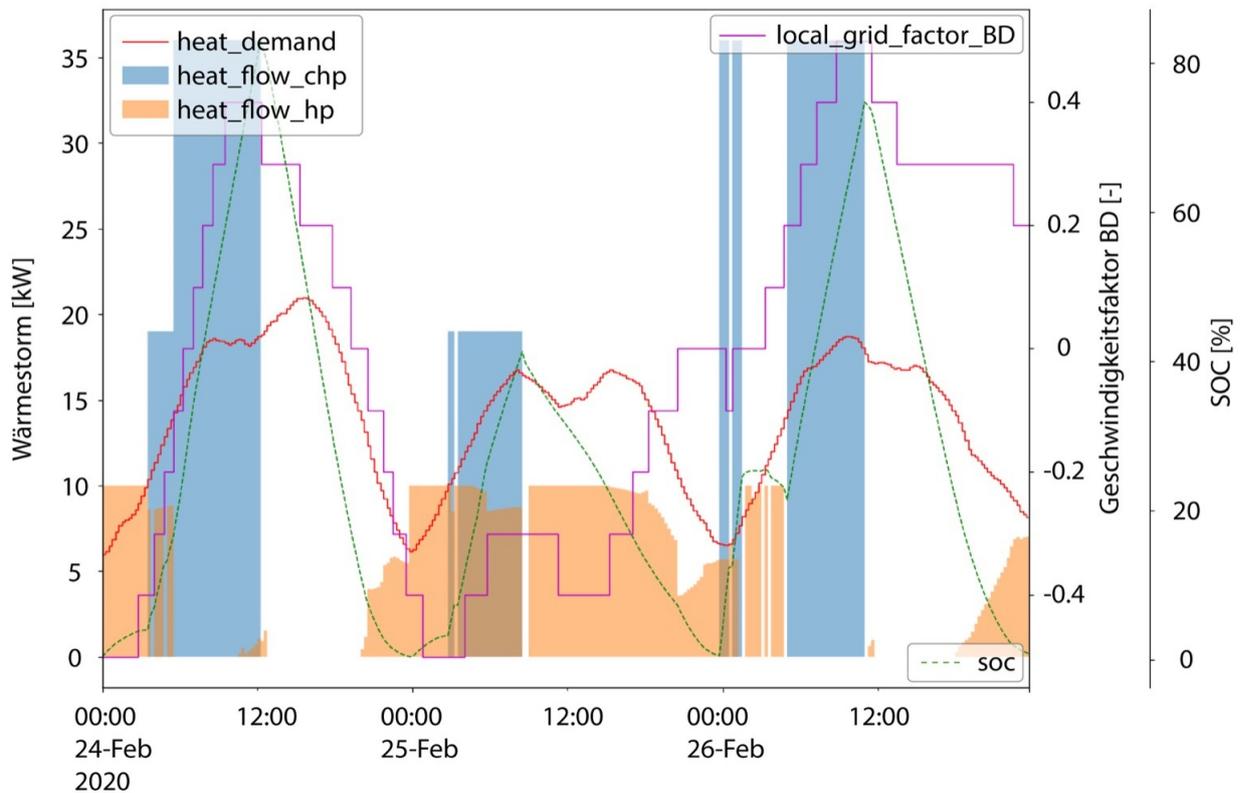


Abbildung 5.7: Fahrplan der erweiterte Optimierung am 24.02.2020

5.2.3 Analyse der Betriebsparameter

Das Ergebnisse der Analyse der Gesamtwärmeproduktion für die erweiterte Optimierung ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Bei einer Gesamtwärmeproduktion knapp über 46 MWh für die Anzahl der Simulierten Tage im Jahr 2020 werden 61 % durch das BHKW und 39 % durch die Wärmepumpe abgedeckt.

Gesamtwärmeproduktion: 46.374 kWh

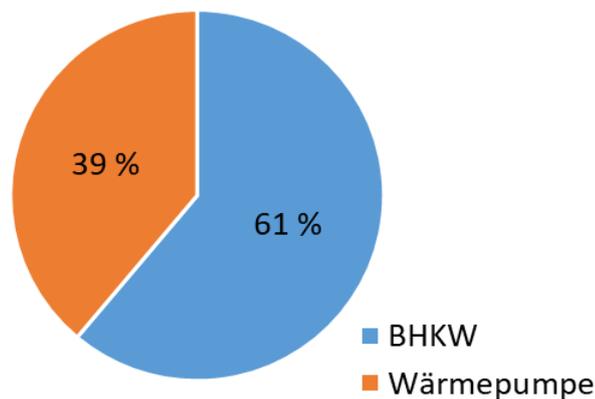


Abbildung 5.8: Relative Verteilung der Wärmeerzeugung bei der erweiterten Optimierung

Betriebsstunden

Bei der Analyse der Betriebsstunden lässt sich feststellen, dass erwartungsgemäß die meisten Betriebsstunden beider Wärmeerzeuger auf die Wintermonate und die wenigsten auf die Sommermonate entfallen. Im Gesamtjahresverlauf erreicht das BHKW in der Fahrplanvariante Grundoptimierung eine Gesamtlauzeit von 1880 Betriebsstunden. Dahingegen sinken die BHKW-Betriebsstunden in der erweiterten Optimierung um etwa die Hälfte auf nur noch 983 Betriebsstunden. Die Wärmepumpe wiederum erreicht in der erweiterten Optimierung 3421 Betriebsstunden. Abbildung 5.9 zeigt zudem, dass sich der BHKW-Betrieb in der erweiterten Optimierung besonders stark im Sommer (um 99%) gegenüber der Grundoptimierung reduziert.

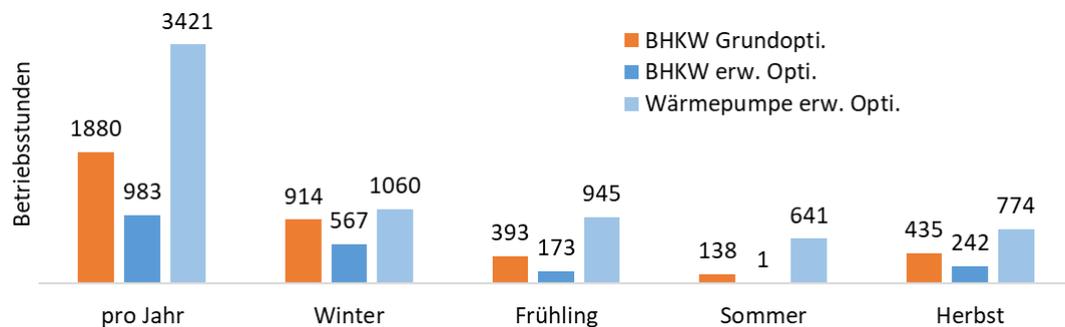


Abbildung 5.9: Anzahl durchschnittlicher Betriebsstunden der Wärmeerzeuger in verschiedenen Jahreszeiten

Betriebsstarts

Analog zu der Analyse der Betriebsstunden der Wärmeerzeuger wird aus Abbildung 5.10 ersichtlich, dass die Anzahl der meisten Betriebsstarts beider Wärmeerzeuger auf die Wintermonate und die wenigsten auf die Sommermonate entfallen. Die Anzahl der Betriebsstarts des BHKWs schwankt im Jahresverlauf stärker als die der Wärmepumpe. Beim Vergleich der beiden Fahrplanvarianten zeigt sich, dass sich die Betriebsstarts des BHKWs in der erweiterten Optimierung gegenüber der Grundoptimierung über das Jahr gesehen fast halbiert haben. Die stärkste Reduzierung der BHKW-Betriebsstarts entfällt auf die Sommermonate.

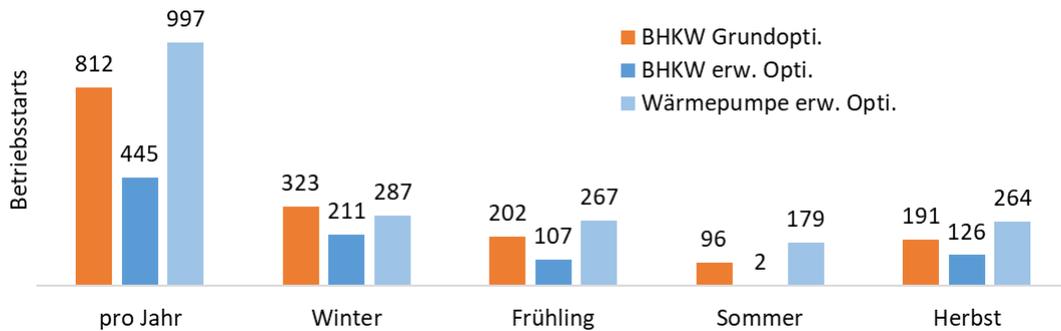


Abbildung 5.10: Anzahl der Betriebsstarts der Wärmeerzeuger in verschiedenen Jahreszeiten

Anhand der analysierten Betriebsstarts und Betriebsstunden der Wärmeerzeuger lässt sich die durchschnittliche Laufzeit berechnen, bei der die Wärmeerzeuger ohne Unterbrechung in Betrieb sind. Entsprechend der höheren Anzahl an Betriebsstunden und Betriebsstarts liegt die durchschnittliche Laufzeit der Wärmeerzeuger im Winter höher als im Sommer. Im Jahresdurchschnitt läuft das BHKW in beiden Fahrplanvarianten etwa 2 Stunden. Die Wärmepumpe wird im Jahresdurchschnitt durchgängig 3 Stunden betrieben.

Teil- und Vollastverhalten

Neben den Betriebsstarts, den Betriebsstunden und der durchschnittlichen Laufzeit der Wärmeerzeuger wird nun das Teil- und Vollastverhalten der Wärmeerzeuger anhand ihrer Jahresdauerlinien analysiert. Abbildungen 5.11, 5.12 und 5.13 zeigen die auftretenden thermischen Leistungen und die jeweiligen Jahresdauerlinien für das BHKW in der Grundoptimierung sowie für BHKW und Wärmepumpe in der erweiterten Fahrplanvariante.

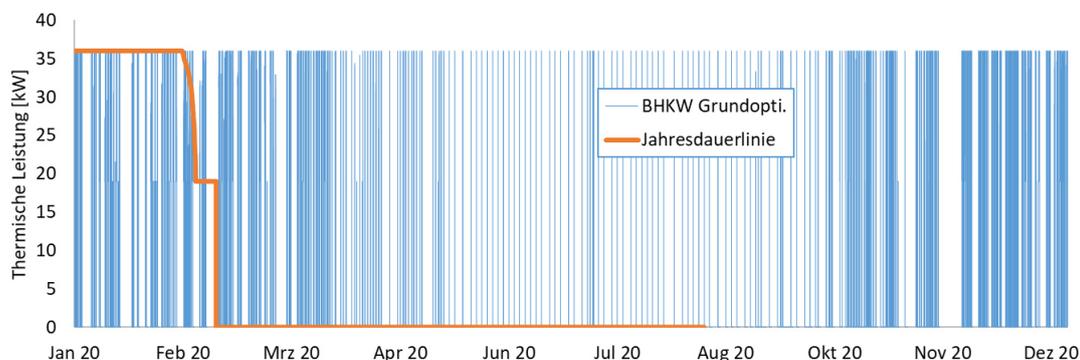


Abbildung 5.11: Thermische Leistung und Jahresdauerlinie - BHKW, Grundoptimierung

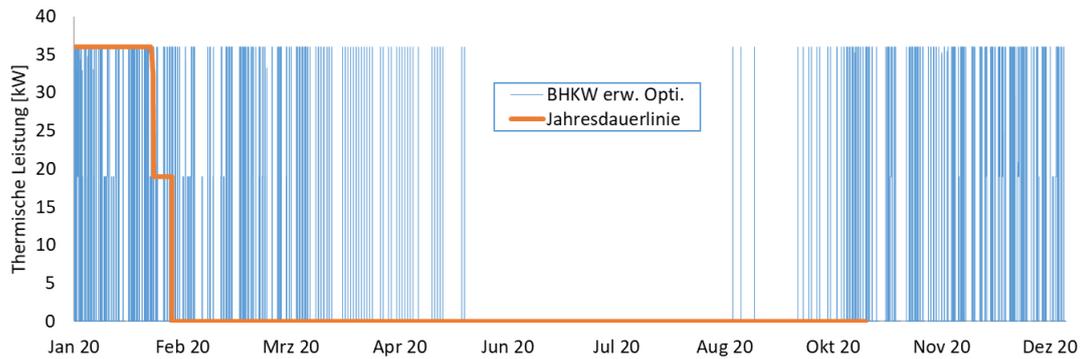


Abbildung 5.12: Thermische Leistung und Jahresdauerlinie - BHKW, erweiterte Optimierung

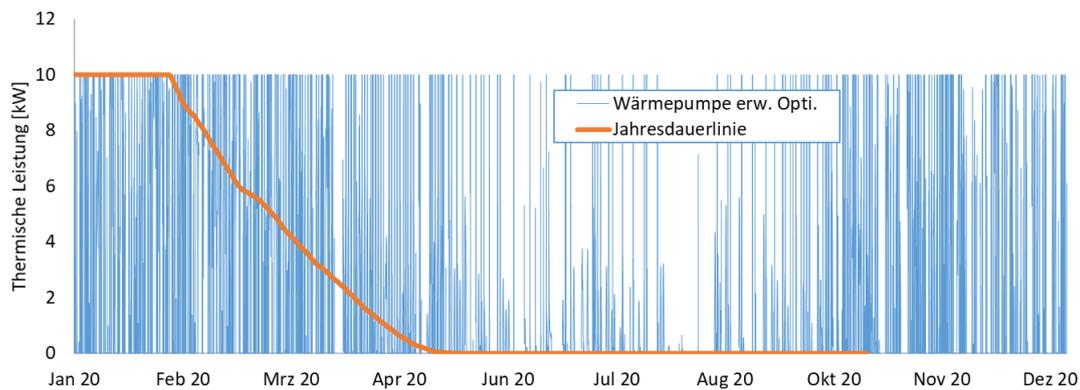


Abbildung 5.13: Thermische Leistung und Jahresdauerlinie - Wärmepumpe, erweiterte Optimierung

Die Analyse der Jahresdauerlinien der Wärmeerzeuger ergibt, dass das BHKW in beiden Varianten zu etwa 70% der Betriebszeit in Volllast und nur 30 % der Zeit in Teillast gefahren wird, um die CO₂-Emissionen im Gesamtsystem zu minimieren. Dahingehend wird die Wärmepumpe 3 mal häufiger in Teil- als in Volllast betrieben. Zudem ist die Variation der Teillastzustände stärker über den Leistungsbereich verteilt als bei dem BHKW, welches vor allem in Volllast oder im Mindestlastpunkt betrieben wird. Die Teillastzustände der Wärmepumpe sind verstärkt über die Sommermonate bei geringem Wärmebedarf zu beobachten.

Kennzahlen der Wärmeerzeuger

Tabelle 5.1 bietet einen Überblick über die sich aus der Simulation ergebenden durchschnittlichen Kennzahlen der Wärmeerzeuger. Die Erkenntnisse über das Voll- und Teillastverhalten der Wärmeerzeuger aus der Auswertung der Jahresdauerlinie schlagen sich ebenfalls in der Analyse der Kennzahlen nieder. So lässt sich feststellen, dass sich die durchschnittlichen Kennzahlen des BHKWs in beiden Fahrplanvarianten nicht wesentlich voneinander unterscheiden und dass das BHKW einen niedrigen thermischen Wirkungsgrad (Grundoptimierung: 0,64; erw. Optimierung: 0,65) und einem hohen elektrischen Wirkungsgrad (Grundoptimierung: 0,32; erw. Optimierung: 0,31) bei der gleichen durchschnittlichen Stromkennzahl von 0,5 erreicht. Dies lässt sich auf den überwiegenden Volllastbetrieb des Kraftwerks zurückzuführen. Dabei liegen die höchsten und niedrigsten Kennzahlen der Wärmeerzeuger leicht unter oder über den vom Hersteller angegebenen Kennwerten. Dieses Verhalten ist auf die lineare Annäherung an die tatsächlichen Wirkungsgrads- und Leistungszahlverläufe zurückzuführen.

Tabelle 5.1: Durchschnittliche Kennzahlen der Wärmereizerger

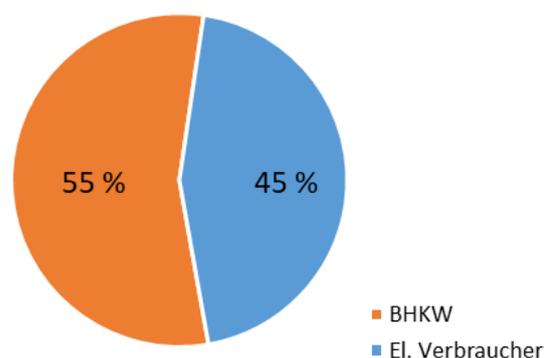
	Zeitraum	η_{th}	η_{el}	η_{ges}	σ_p	ε/JAZ
Grundoptimierung	Jahr	0,64	0,32	0,96	0,50	-
	Winter	0,66	0,30	0,96	0,48	-
	Frühling	0,64	0,32	0,96	0,51	-
	Sommer	0,62	0,34	0,96	0,56	-
	Herbst	0,63	0,33	0,96	0,54	-
Erweiterte Optimierung	Jahr	0,65	0,31	0,96	0,50	7,90
	Winter	0,66	0,30	0,96	0,47	7,53
	Frühling	0,63	0,33	0,96	0,54	7,81
	Sommer	0,61	0,35	0,96	0,57	8,90
	Herbst	0,63	0,33	0,96	0,53	7,80

Die über das Jahr gemittelte Leistungszahl der Wärmepumpe, auch Jahresarbeitszahl (JAZ) genannt, erreicht einen Wert von 7,9. Dabei tritt die höchste Leistungszahl von 9,4 im August auf, während die niedrigste Leistungszahl Ende Oktober verzeichnet wird. Eine Erklärung hierfür liefert der angenommene Jahresverlauf der Solevorlauftemperatur, der Höchstwerte um 17°C im August und Tiefstwerte um 8°C im Oktober annimmt.

Bilanz der CO₂-Emissionen

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Technologiezentrum als Bilanzraum für die anfallenden CO₂-Gesamtemissionen im Jahr 2020 angenommen. Dabei werden die elektrischen Verbraucher einschließlich der Wärmepumpe sowie das BHKW in die Bilanzierung einbezogen, da sie die wesentlichen CO₂-Emittenten darstellen.

Gesamt CO₂-Emissionen Grundoptimierung: 46,7 t


 Abbildung 5.14: CO₂-Gesamtemissionen Grundoptimierung

Die Auswertung der anfallenden Gesamtemissionen beider Fahrplanvarianten im Jahresverlauf ergibt, dass die Gesamtemissionen durch den Wärmepumpenbetrieb um etwa 1 % reduziert werden können. In der Grundoptimierung fallen insgesamt 46,7 Tonnen CO₂ pro Jahr an, wohingegen auf die erweiterte Optimierung nur 46,2 Tonnen entfallen.

Eine genauere Betrachtung der anfallenden Emissionen veranschaulichen die Kreisdiagramme

in Abbildung 5.14 und 5.15. Es wird deutlich, dass die erweiterte Fahrplanvariante in absoluten Zahlen zwar zu keiner bedeutenden Reduktion der CO₂-Emissionen im Gesamtsystem führt, jedoch verschieben sich die Verhältnisse der Emissionsverursacher gegenüber der Grundoptimierung deutlich.

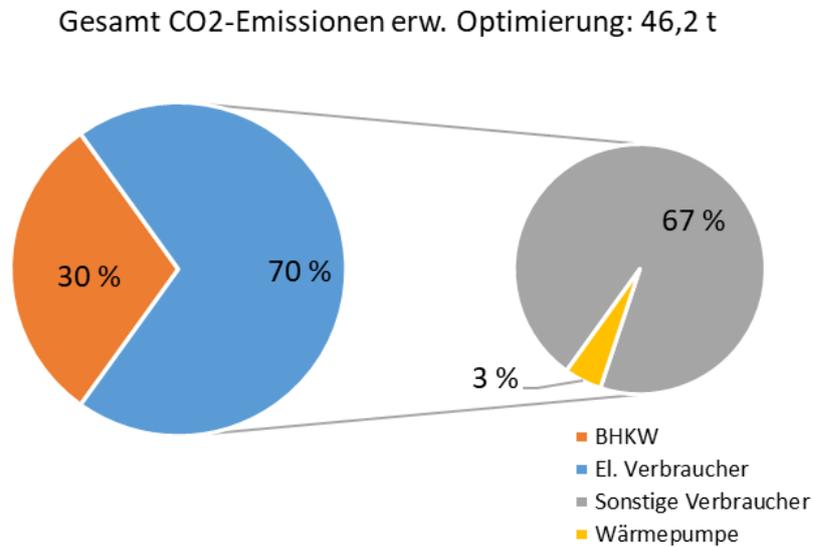


Abbildung 5.15: CO₂-Gesamtemissionen erweiterte Optimierung

Gehen bei der Grundoptimierung noch 55 % der anfallenden CO₂-Emissionen auf das Konto des BHKWs, sinken sie in der erweiterten Optimierung auf 30 % herab. Demgegenüber erhöht sich der Anteil der CO₂-Emissionen durch die elektrischen Verbraucher von etwa 45 % für die Grundoptimierung auf bis zu 70 % in der erweiterten Variante. Nur etwa 3 % des Anteils der elektrischen Verbraucher haftet dabei der Wärmepumpe an, wohingegen auf die sonstigen Verbraucher 67 % der Emissionen entfallen.

6 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Die Entwicklung und Testung eines dynamischen Optimierungsmodells der Wärmeversorgung am Technologiezentrum konnte im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich umgesetzt werden. Unter den eingangs gestellten Voraussetzungen an einen energiesystemdienlichen Betrieb der Wärmeerzeuger wurden zwei Fahrplanvarianten auf Basis von historischen Messdaten entwickelt und über das Jahr 2020 miteinander verglichen.

Die These, dass die Integration einer Wärmepumpe in das bestehende Heizungssystem eine Reduktion der CO₂-Emissionen begünstigt, wurde durch die Analyse der Ergebnisse in Kapitel 5 wenn auch nur geringfügig bestätigt. Im Folgenden werden einzelne Aspekte der Ergebnisse diskutiert.

6.1 Verschiebung der CO₂-Emissionen

Die Analyse in Kapitel 5 ergab eine geringfügige Reduktion der CO₂-Emissionen um 1 % bei der erweiterten Optimierung gegenüber der Grundoptimierung. Daneben wurde eine signifikante Verschiebung der Emissionsverursachung festgestellt. Gegenüber der Grundoptimierung reduzieren sich die CO₂-Emissionen, verursacht durch das BHKW in der erweiterten Optimierung um 15 %.

Diese Verschiebung in der Bilanzierung ist durch die Reduktion der BHKW-Laufzeit erklärbar. So betragen die Betriebsstunden des BHKWs in der erweiterten Optimierung nur noch etwa die Hälfte. Dementsprechend kleiner fallen die hierdurch verursachten Emissionen aus. Andererseits sorgt der geringere Anteil an erzeugtem BHKW-Strom und die zusätzlich positivere Residuallast durch den Wärmepumpenbetrieb für eine Erhöhung der Emissionen durch den Netzstrombezug. Ausschlaggebend für die CO₂-Emissionen, verursacht durch den Netzstrombezug sind die historischen Messdaten der Residuallast des Technologiezentrums sowie der lokale Gewichtungsfaktor für Bergedorf.

In Bezug auf die Residuallast des Technologiezentrums wurde aus Kapitel 4 ersichtlich, dass für einen Großteil des Jahres der Bedarf der elektrischen Verbraucher die Erzeugung aus der Photovoltaikanlage überwiegt. Abhängig von der Quantität einer solchen positiven Residuallast erhöht sich die CO₂-Bilanz. Nur in kurzen Zeitfenstern, vermehrt in den Sommermonaten aber auch vereinzelt an kalten, sonnigen Wintertagen fällt aufgrund eines Überschusses an Photovoltaikstrom die Residuallast des Technologiezentrums negativ aus. In diesem Fall wird Strom in das öffentliche Netz eingespeist. Dieser in der Fachsprache als Verdrängungsstrom bezeichnete Anteil geht negativ in die CO₂-Bilanz ein. Der BHKW-seitig erzeugte Strom übersteigt regelmäßig die Residuallast des Technologiezentrums. Der so entstehende Stromüberschuss wird ebenfalls in das öffentliche Netz eingespeist und reduziert in den Modellen die Gesamtbilanz der CO₂-Emissionen. Bei der Betrachtung der CO₂-Emissionen aus der KWK-Anlage (BHKW) steht

grundsätzlich das Problem im Raum, wie die verursachten Emissionen auf beide Kopplungsprodukte der elektrischen Arbeit und der Nutzwärme aufgeteilt werden. Im wissenschaftlichen Kontext werden hierzu verschiedene Allokationsmethoden zur CO₂-Bewertung von KWK-Anlagen angewandt. Eine einheitliche Methodik ist jedoch nicht vorhanden [42]. In dieser Arbeit kommt in abgewandelter Form die sogenannte Stromgutschriftsmethode zum Tragen. Mauch et. al. und Meller geben hierzu eine gute Übersicht über die Anwendung weiteren Allokationsmethoden [42], [43].

Bezüglich des Einflusses des lokalen Gewichtungsfaktors auf die Höhe der CO₂-Bilanz wurde in Kapitel 5 gezeigt, dass ein hoher Stromüberschuss auf lokaler Ebene zu einem niedrigen Gesamt-Emissionsfaktor für den Netzstrombezug führt. Das beünstigt den Wärmepumpenbetrieb. Ein lokaler Strommangel hingegen befördert den BHKW-Betrieb.

6.2 Interpretation der Wärmepumpenkennzahlen

Die sich ergebenden Werte der durchschnittlichen Leistungszahlen und der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe lassen sich mit Literaturwerten vergleichen. Bei der Simulation verschiedener Wärmepumpentypen für eine modellbasierte Potentialanalyse einer sektorengekoppelten Wärmeversorgung in Schleswig-Holstein ergab die Auswertung von Engels für die Gemeinde Flensburg Minimalwerte der Leistungszahl für Sole-Wasser-Wärmepumpen von 1,71 und Maximalwerte von 6,99, bei einer Jahresarbeitszahl von 4,82 [39]. Damit liegen die Kennwerte in dieser Arbeit leicht höher. Dies ist besonders auf zwei Faktoren zurückzuführen.

Einerseits nimmt Engels einen niedrigeren Verlauf der Solevorlauftemperatur auf Grundlage einer Feldstudie des Fraunhofer ISE von 2005 bis 2010 für Erdreich-Wärmepumpen an. In der vorliegenden Arbeit werden die beschriebenen Simulationsergebnisse einer geothermischen Leistungsprognose für Energiepfähle als Datengrundlage für den berechneten Jahresverlauf der Niedertemperaturquelle genutzt.

Andererseits nutzt Engels ein rein leistungsbezogenes Modell, in dem die Wärmeerzeuger BHKW und Wärmepumpe jeweils mit einem Speichersystem getrennt voneinander mit fest vorgegebenen Temperaturniveaus modelliert werden. Hingegen werden in der vorliegenden Arbeit die Wärmeerzeuger BHKW und Wärmepumpe in einem Heizungsmodell mit variablen Massenströmen, Temperaturniveaus und Wärmeströmen modelliert. So geht beispielsweise die Rücklauf-temperatur zu den Wärmeerzeugern, vermittelt über ihre thermische Leistung in die Zielfunktion ein. Dies hat zur Folge, dass die Wärmepumpe überwiegend während niedriger Rücklauf-temperaturen des Heizungssystems betrieben wird.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Höhe der Leistungszahl ist die Temperaturspreizung. Diese wurde mit einem konstanten Wert von 5 K gewählt, was bedeutet, dass die Wärmepumpe im Betriebsfall die Rücklauf-temperatur immer um 5 K anheben kann. Die Auswahl dieser niedrigen Temperaturspreizung basiert auf den Erkenntnissen des Studienprojektes von Hahn et al., die eine effiziente Integration der Wärmepumpe am Technologiezentrum in das bestehende Wärmenetz untersuchen. Aus Testläufen der Speicherbeladung durch die Wärmepumpe im Zeitraum vom 31.03.2021 - 05.04.2021 ging hervor, dass diese den Rücklauf des Heizkreises im Unterschied zum BHKW nicht direkt auf die Solltemperatur aufheizt sondern nur um wenige Kelvin anhebt.

Das hat zur Folge, dass das gesamte Speichervolumen mehrere Male umgewälzt wird, bevor die Solltemperatur erreicht ist [35]. In der VDE-Studie „Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050“ nehmen die Autoren bei der Modellierung von Wasser-Wasser-Wärmepumpen höhere Temperaturspreizungen von 15 oder 30 K an [23]. Auf Grundlage der geringen Leistungsgröße der Wärmepumpe und der Messdaten der Testläufe am Technologiezentrum erscheint die Annahme einer geringen Temperaturspreizung jedoch gerechtfertigt. Eine genauere Untersuchung der realen Wärmepumpenparameter könnte hier Aufschluss geben.

Die sich aus der Jahresauswertung der erweiterten Optimierung ergebenden Vorlauftemperaturen der Wärmepumpe sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Die sortierte Jahreslinie der Vorlauftemperatur macht deutlich, dass die Wärmepumpe zu etwa 82 % bei Vorläufen unterhalb von 30°C betrieben wird. Unter Berücksichtigung der vorangestellten Argumentation bezüglich der maßgeblichen Faktoren für hohe Leistungszahlen einer Wärmepumpe werden die simulierten Kennzahlen als plausibel erachtet.

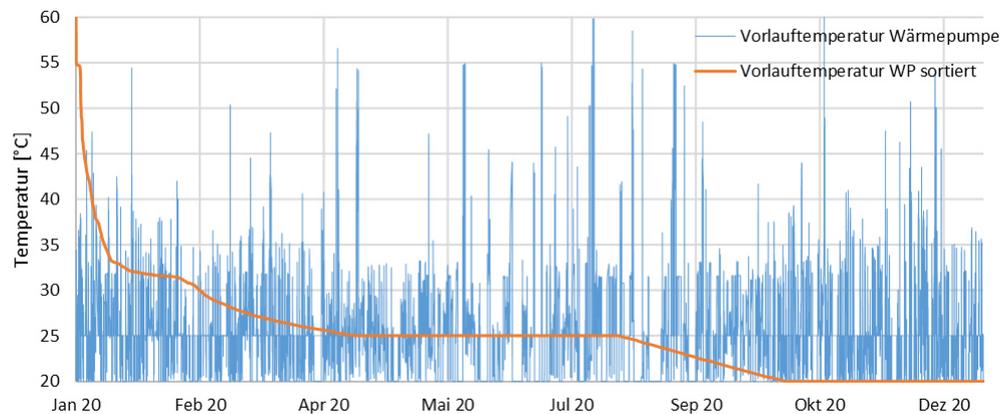


Abbildung 6.1: Vorlauftemperatur und Jahresdauerlinie der Wärmepumpe, erweiterte Optimierung

In Bezug auf real zu erreichende Arbeits- und Leistungszahlen von Wärmepumpen muss jedoch konstatiert werden, dass sich in bisherigen Feldstudien deutlich niedrigere Kennzahlen ergaben. So erreichten die Erdreichanlagen in einem Feldtest des Fraunhofer ISE von 2007 bis 2010 mittlere Arbeitszahlen von 3,9, wobei für einzelne Anlagen Effizienzkennwerte zwischen 2,3 und 5,1 ermittelt wurden [45]. In einem weiteren Feldtest von 2006 bis 2013 erreichten die Erdkollektor-Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von 4,7, die Erdsonden-Wärmepumpen 5,1 und solarunterstützte Wärmepumpen sogar Werte bis 5,8 [5].

Die Analyse zeigt, dass die Wärmepumpe im Sommer die höchsten durchschnittlichen Leistungszahlen erreicht. Da die Wärmepumpe am Technologiezentrum aber reversibel betrieben wird, also zur passiven Kühlung des Gebäudes beiträgt, spielt der Heizbetrieb in diesem Zeitraum keine Rolle. Abgesehen von den Sommermonaten ergeben sich die höchsten Leistungszahlen im Frühjahr und im Herbst. Daher wird der Betrieb der Wärmepumpe in dieser Jahreszeit zukünftig empfohlen. Wichtig hierfür ist aber eine sinnvolle Einbindung der Wärmepumpe in das bestehende hydraulische Konzept des Technologiezentrums.

6.3 Empfohlene Betriebsweise der Wärmeerzeuger

Durch die Analyse in Kapitel 5 konnte gezeigt werden, dass sowohl die Betriebsstunden als auch die Betriebsstarts des BHKWs durch den zusätzlichen Betrieb der Wärmepumpe um etwa die Hälfte reduziert werden können. Außerdem wurde ersichtlich, dass das BHKW vornehmlich während Zeiten positiver Gewichtungsfaktoren (lokaler Strommangel) möglichst bei Vollast betrieben werden sollte, um die CO₂-Emissionen im Gesamtsystem gering zu halten. Der Teillastbetrieb des BHKWs sollte dabei aber nicht ausgeschlossen werden.

Die Wärmepumpe sollte vornehmlich während Zeiten negativer Gewichtungsfaktoren (lokaler Stromüberschuss) betrieben werden. Durch den Einsatz der Wärmepumpe ließe sich die Deckung des Wärmebedarfs durch das BHKW um etwa 39 % reduzieren. Hierbei müsste sichergestellt werden, dass die Wärmepumpe sowohl in Teil- als auch in Vollast betrieben werden kann, wobei die Teillastzustände dominieren.

Abgesehen von den Sommermonaten könnte die Integration der Wärmepumpe die Betriebsstarts und Betriebsstunden des BHKWs am effektivsten in den Übergangszeiten im Frühjahr und im Herbst reduzieren. Somit trägt sie dazu bei, die Einschalthäufigkeit des BHKWs mit kurzen Betriebsintervallen zu reduzieren. Fisch et al. weisen darauf hin, dass die anfallenden CO₂-Emissionen beim An- und Abfahrvorgang des Wärmeerzeugers bis zu 5-mal so groß wie die Werte bei stationärem Betrieb ausfallen. Eine erhöhte Einschalthäufigkeit mit kurzen Betriebsintervallen führt zu dem Verschleiß der Wärmeerzeuger. Andererseits steigen die Wärmeverluste durch das häufige Aufheizen und Abkühlen. Daher sollte eine solche Betriebsweise vermieden werden[25].

Abbildung 6.2 zeigt einen Ausschnitt der erweiterten Fahrplanvariante für den Zeitraum vom 24. bis 27. März 2020. Es lassen sich vermehrt kurze 15-minütige An- und Abfahrvorgänge sowohl der Wärmepumpe als auch des BHKWs beobachten.

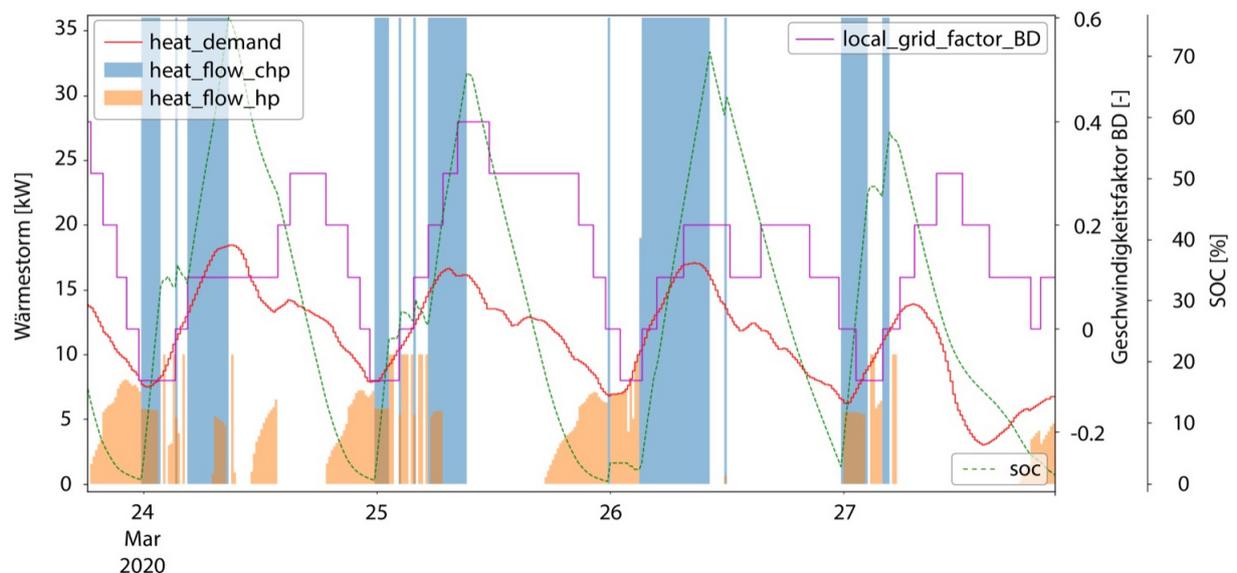


Abbildung 6.2: Optimierter Fahrplan der erweiterten Optimierung vom 24. bis 27. März 2020

Daher ist es von Vorteil, die Modellierung der Fahrplanvarianten um sogenannte Mindeststillstandzeiten und Mindestlaufzeiten durch Nebenbedingungen zu ergänzen. Die Gleichungen zur Modellierung solcher Nebenbedingungen für die Mindeststillstandzeiten und Mindestlaufzeiten

lassen sich beispielsweise aus der Dissertation von Steck zur Entwicklung und Bewertung von Algorithmen zur Einsatzplanerstellung virtueller Kraftwerke entnehmen [49]. Eine andere Möglichkeit, übermäßiges Takten der Erzeugeranlagen zu unterbinden, besteht in der Festlegung einer Nebenbedingung, die eine maximale Startanzahl festlegt. Auch hier liefert die Dissertation von Sreck [49] Aufschluss.

6.4 Erklärungsansatz für Simulationsabbrüche

Während der Entwicklung des gemischt-ganzzahlig nicht linearen Optimierungsmodells kam es immer wieder zu Simulationsabbrüchen. Die allgemeine Analyse in Kapitel 5 zeigt, dass durch ein schrittweises Anpassen des Optimierungsprogramms, beispielsweise durch das Variieren der Eingangsparameter und Startwerte, die Anzahl an erfolgreich durchgeführten Tagessimulationen erhöht werden konnte. Die gewonnenen Erkenntnisse führen zu dem Schluss, dass bestimmte Kombinationen von Eingangswerten ein lösbares System verhindern. Zwei identifizierte Szenarios für einen Abbruch sind:

- Der Wärmebedarf ist höher als die Maximalleistung des BHKWs und der Ladestand des Speichers ist zu niedrig, um den Wärmebedarf zu decken.
- Der Wärmebedarf ist geringer als die Mindestleistung des BHKWs. Der Wärmespeicher besitzt keine freie Speicherkapazität und kann nicht bis zum Ende des Fahrplans auf unter 10% entladen werden.

Ein möglicher Lösungsansatz stellt die Ergänzung des Modells um eine alternative Wärmequelle oder -senke dar. Steck schlägt vor, die Verwendung einer solchen alternativen Wärmequelle oder -senke im Modell mit hohen "Strafkosten" zu versehen. So könne in der Auswertung dann eine unlösbare Problemstellung identifiziert werden, bei der es nicht möglich ist, die thermische Last zu decken [49].

Neben diesem Erklärungs- und Lösungsansatz ergab die Literaturrecherche, dass das Auftreten einer nicht differenzierbaren Stelle in der Zielfunktion oder den Nebenbedingungen ein Abbruchkriterium für den verwendeten Solver IPOPT darstellt [7]. Ein klassisches Beispiel einer nicht differenzierbaren Funktion ist die Betragsfunktion $f(x) = |x|$, die an der Stelle $x_0 = 0$ zwar stetig, aber nicht differenzierbar ist. Um der Nichtdifferenzierbarkeit einer Funktion innerhalb der Optimierung eines MINLPs vorzubeugen, schlagen Bragalli et al. [7] vor, die eingehenden Datenreihen zu glätten.

Auf Grundlage dieser These wurden die Eingangsdaten der Heizleistung und der Residuallast polynomial geglättet. Abbildung 6.3 zeigt die häufig auftretenden Richtungswechsel im Kurvenverlauf, die durch die Glättung minimiert werden konnte. Tatsächlich ergab die Überprüfung, dass die geglätteten Eingangsdaten in manchen Fällen zu einer Lösbarkeit des Optimierungsproblems führten. Eine eindeutige Begründung für die Simulationsabbrüche konnte jedoch in Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden

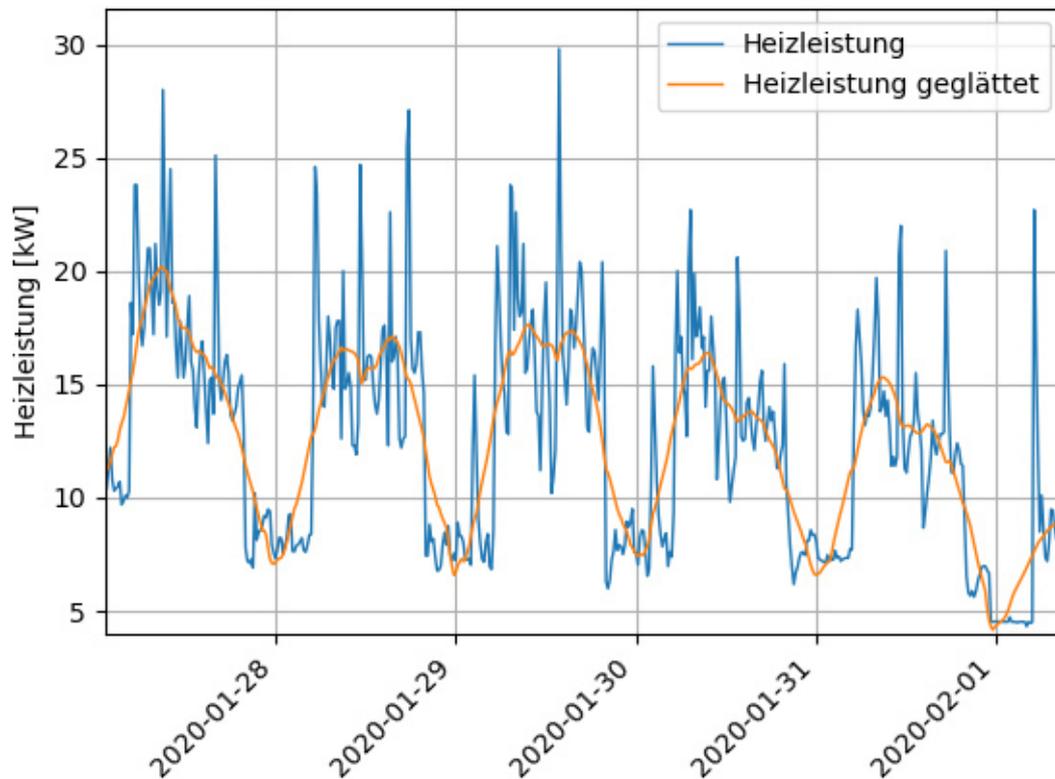


Abbildung 6.3: Abschnittsweiser Verlauf der Heizleistung des Technologiezentrum 28.01. bis 01.02.2020

Güte der Optimierung

Trotz dieser offen gebliebenen Frage bezüglich der Handhabung von MINLP-Modellen lässt sich feststellen, dass die Laufzeiten zum Lösen einer Tagessimulation mit den entwickelten Modellen als praktikabel bewertet werden, um damit zukünftig einen fahrplangesteuerten Betrieb der Wärmeerzeugung am Technologiezentrum zu realisieren.

Als vorteilhaft bei der Verwendung von MINLP-Modellen wird die Möglichkeit gesehen, das Temperaturverhalten in Wärmespeichern realistisch abzubilden. Die Umsetzung eines Schichtenspeichermodells wird im Rahmen der Überprüfung in Kapitel 5 als plausibel bewertet und kann zukünftig als Grundlage für weitere Modellierungen dienen.

Die Bewertung der Güte der gefundenen Fahrplanoptimierungen ist abschließend nicht möglich. Wie bereits in Kapitel 2 verdeutlicht wurde, ist die Konvexität der Zielfunktion und der Nebenbedingungen ein wichtiges Kriterium, ob ein globales Optimum eines MINLPs auf Basis der heutigen Algorithmen gefunden werden kann. Wie auch in dieser Arbeit sind die Zielfunktion und die Nebenbedingungen nur an einigen Stellen bekannt. Über ihren Verlauf im gesamten Simulationszeitraum liegen keine Informationen vor. Somit kann keine Aussage getroffen werden, ob die simulierten Fahrpläne ein globales Optimum darstellen [58]. Wunsch weist darauf hin, dass der Start der Optimierung an verschiedenen Startpunkten die Wahrscheinlichkeit für das Finden eines globalen Optimums erhöht, aber niemals sicherstellt [58].

6.5 Potential zur Ergänzung der Fahrplanvarianten

In dieser Arbeit wurde ein Fokus auf die Modellentwicklung der Wärmeerzeuger und des Wärmespeichers gelegt. Das verbraucherseitige Modell der beiden Fahrplanvarianten ist jedoch stark vereinfacht, da es lediglich aus einem einzigen Gesamtverbraucher besteht. Zudem wird die Vorlauftemperatur nicht vorgegeben. Sie kann als Optimierungsvariable von dem Lösungsalgorithmus in den definierten Grenzen von 20°C bis 80°C in Abhängigkeit von der Heizleistung frei gewählt werden. Wie in Kapitel 3 näher erläutert, setzt sich das Heizungssystem des Technologiezentrums aber aus insgesamt fünf Heizkreisen zusammen. Jeder dieser Heizkreise wird einzeln geregelt, da er unterschiedliche Temperaturniveaus anfordert. Die Höhe der Vorlauftemperatur hängt im realen Heizungssystem von der Raum- oder Außentemperatur ab. Beispielsweise werden die Vorlauftemperaturen des Obergeschosses, des Erdgeschosses und der Betonkernaktivierung direkt über spezifische Heizkurven geregelt. Für einen energiesparenden Betrieb erfolgt außerdem im Tageszyklus eine Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur durch eine Parallelverschiebung der Heizkurven. Weitere saisonale Anpassungen können durch das Facility Management durchgeführt werden. Eine Möglichkeit zur Ausdifferenzierung der Verbraucherseite könnte also die Darstellung der einzelnen Heizungskreisläufe und die Ermittlung ihres Temperaturniveaus, vermittelt über die Außentemperatur sein.

Hierbei wird es wichtig sein, das Potential der Betonkernaktivierung genauer zu untersuchen. Die thermische Aktivierung erfolgt durch die in Böden, Decken und Wänden verlegten Rohrsysteme, in denen das Heizwasser zirkuliert. Hierbei wird die Speicherfähigkeit der Betonkerns ausgenutzt. Die Betonmasse nimmt die Wärme des zirkulierenden Wassers auf. Die gespeicherte Wärme wird dann zeitversetzt an die umliegenden Räume abgegeben. Deshalb gilt eine BTA als ein sehr träges System. Aufgrund der großen Übertragungsflächen einer solchen Heizung wird sie mit niedrigen Vorlauftemperaturen von nur 25°C betrieben [50]. Die BTA bietet somit das Potential, die Wärmepumpe möglichst kostengünstig und energieeffizient in das bestehende Heizungssystem zu integrieren. Die niedrigen Vorlauftemperaturen der BTA würden lange und durchgehende Betriebszeiten der Wärmepumpe bei hohen Leistungszahlen ermöglichen. Hahn et al. kommen bei ihrer Untersuchung zu dem Ergebniss, dass die Wärmepumpe am Technologiezentrum ab einer Außentemperatur von 11,2°C das EG und OG kosteneffizienter und CO₂-schonender heizt als das BHKW (Annahmen: $\epsilon=5,3$, $\Delta T = 28^\circ\text{C}$, konstante Niedertemperaturquelle 10°C) [35]. Der Betrieb der BTA wäre also schon bei niedrigeren Außentemperaturen effizienter.

Hieran anschließend müsste die praktische Umsetzung der Integration der Wärmepumpe in das bestehende hydraulische System weitergeführt werden. Im derzeitigen Heizungssystem arbeiten beide Wärmeerzeuger auf unterschiedlichen Temperaturniveaus und speisen ihre Wärme vermittelt über die Wärmespeicher in einen gemeinsamen Heizverteiler. Bei der derzeitigen hydraulischen Einbindung hätte dies ein Mischen der Temperaturniveaus zur Folge und würde die Effizienz des Gesamtsystems reduzieren. Laut Hahn et al. ist eine direkte Versorgung der BTA durch die Wärmepumpe deshalb nicht möglich. Die Autoren schlagen daher drei Varianten zur Einbindung der Wärmepumpe vor [35].

Eine wichtige Ergänzung des entwickelten Modells wäre die Abbildung der vorhandenen Heizstäbe in den Wärmespeichern. Eine Vielzahl von Studien, die sich mit den Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele beschäftigen sehen in der verstärkte Nutzung von erneuerbaren Strom

zur Wärmebereitstellung im Gebäudesektor einen wichtigen Beitrag, um den fossilen Primärenergiebedarf für den Gebäudesektor bis 2050 (2045) auf -80 % zu senken [23]. Unter diesem Gesichtspunkt wäre es interessant zu untersuchen, wie stark eine energiesystemdienliche Nutzung der Wärmepumpe und der Heizstäbe die KWK-Anlage am Technologiezentrum weiter substituieren kann.

Neben diesen Ansätzen zur Fortführung der Forschungsarbeit steht die praktische Umsetzung der Live-Fahrplanregelung aus. Ein erster Schritt hin zu einem echtzeitgeregelten Fahrplanbetrieb der Wärmeversorgung ließe sich durch prognostizierte Verläufe der verwendeten Eingangsdaten umsetzen. In seiner Arbeit zur Deckung des Eigenverbrauchs des Wildparks Hamburg-Curslack beschäftigt sich Limburg u.a. mit der ausstehenden Thematik der Prognose. Außerdem entwickelt er die Live-Umsetzung eines optimierten Fahrplans mit Hilfe einer direkten Ansteuerung. Diese Arbeit könnte wichtige Hinweise liefern [36].

7 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Herausforderungen der Energiewende im Wärmesektor wurde im Rahmen dieser Arbeit ein gemischt-ganzzahlig nichtlineares Optimierungsmodell eines modernen Heizungssystems entwickelt. Das Modell, bestehend aus KWK-Anlage, Wärmepumpe, Wärmespeicher und Verbraucher bildet Technologien ab, die für das Gelingen der Energiewende im Wärmesektor eine zentrale Rolle spielen. Hierfür dient die Wärmeversorgung des Technologiezentrums Bergedorf die reale Modellvorlage. Ziel der auf historischen Messdaten basierenden Optimierungen ist es, die CO₂-Emissionen im Gesamtsystem minimal zu halten. Dabei wird eine wärmebedarfsdeckende und effiziente Betriebsweise der Wärmeerzeuger umgesetzt, die sich nach dem lokalen Stromüberschuss oder -mangel in Bergedorf richtet. Das Modell bildet die Grundlage für einen zukünftigen prognosebasierten Fahrplanbetrieb der Wärmeversorgung am Technologiezentrum Bergedorf.

Zur Untersuchung der eingangs aufgestellten These, dass die Integration einer Wärmepumpe in das bestehende Heizungssystem am Technologiezentrum die Reduktion der CO₂-Emissionen begünstigt, wurden zwei Varianten des Optimierungsmodells definiert und anhand der Simulationsergebnisse für das Jahr 2020 ausgewertet und miteinander verglichen.

In dem umgesetzten Optimierungsprogramm wurden die Wärmeerzeuger so modelliert, dass Betriebszustände und Leistungsbereiche abgebildet werden. Eine möglichst realistische Abbildung des Wärmespeichers erfolgt durch eine Schichtenspeichermodell. Die Darstellung der Betriebszustände und des dynamischen Belade- und Entladeverhaltens des Wärmespeichers machen es notwendig, auf eine gemischt-ganzzahlige nichtlineare Optimierung zurückzugreifen. Zur Verbindung von Wärmeerzeugern, Wärmespeicher und Verbraucher werden variable Massenströme und Temperaturniveaus zwischen den Komponenten in festgelegten Grenzen definiert.

In die Modellentwicklung gehen insgesamt vier Zeitreihen historischer Messdaten ein. Hierzu zählen die Gesamtheizleistung und die Residuallast des Technologiezentrums, die Vorlauftemperatur der Niedertemperaturquelle der Wärmepumpe, sowie ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter Emissions-Gewichtungsfaktor für den Bezirk Bergedorf. Grundlage hierfür sind Messwerte über die Stromnachfrage und den -verbrauch im Bezirk im Jahr 2020. Anhand des Faktors kann der Betrieb der Wärmeerzeuger an den lokalen Stromüberschuss oder Strommangel orientiert werden. Er geht als zentrale Stellgröße in die zu minimierende Zielfunktion ein. Mit Einbeziehung der Eingangsdaten und unter Berücksichtigung getroffener Annahmen und Vereinfachungen werden die Zielfunktion sowie die einschränkenden Nebenbedingungen für beide Optimierungsmodelle, der Grundoptimierung (BHKW/Wärmespeicher/Verbraucher) und der erweiterten Optimierung (BHKW/Wärmepumpe/Wärmespeicher/Verbaucher) definiert.

Zur Überprüfung der Plausibilität einzelner Programmbestandteile wurden Testdaten des lokalen Gewichtungsfaktors generiert. Das vom Gewichtungsfaktor abhängige Betriebsverhalten der Wärmeerzeuger wurde als überwiegend plausible bewertet. Massen- und Energiebilanzen ergeben im betrachteten Testzeitraum ein ausgeglichenes Verhältnis. Die Leistungsgrenzen der

Wärmeerzeuger wurden eingehalten und die Betriebszustände konnten abgebildet werden. Als teilweise unplausibel ergab sich das Belade- und Entladeverhalten des Wärmespeichers, der auffälligerweise ausschließlich über den Rücklauf des Wärmeverbrauchers beladen wurde. Das Schichtungsverhalten und die Höhe der Temperaturänderung in den jeweiligen Speicherschichten konnte nach einer Überprüfung aber als plausibel bewertet werden.

Die Testung und Durchführung einer Jahresauswertung beider Optimierungsmodelle konnte auf Grundlage der realen Messwerte erfolgreich umgesetzt werden. Die Evaluierung der Jahressimulation ergab eine geringfügige Reduktion der CO₂-Emissionen durch eine Integration der Wärmepumpe in das Optimierungsmodell. Jedoch konnte eine signifikante Verschiebung der Emissionsverursachung festgestellt werden. Durch die Einbindung der Wärmepumpe sanken demnach die CO₂-Emissionen durch den kürzeren BHKW-Betrieb um etwa 15 %. Andererseits führte der geringere Anteil an erzeugtem BHKW-Strom sowie die höhere Residuallast am Technologiezentrum durch den Wärmepumpenbetrieb zu einer Erhöhung der CO₂-Emissionen durch den Netzstrombezug.

Die Analyse der Betriebsparameter ergab, dass das BHKW möglichst unter Vollast zu Zeiten eines lokalen Strommangels in Bergedorf betrieben werden sollte. Zu Zeiten eines lokalen Stromüberschusses wäre der Einsatz der Wärmepumpe sowohl in Teil- als auch in Vollast insgesamt emissionsärmer. Die Volllastzustände dominieren den BHKW-Betrieb mit 70 %, wohingegen das BHKW im Teillastbetrieb überwiegend im Mindestlastpunkt gefahren wird. Das BHKW verzeichnet deshalb über das gesamte Jahr 2020 eine gleichbleibend hohe energetische Effizienz mit einem durchschnittlichen Gesamtwirkungsgrad von 96 %. Vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen in diesem Modell erreicht auch die Wärmepumpe das gesamte Jahr über hohe Leitungszahlen von 7,5 im Winter und bis zu 8,9 im Sommer. Somit ergibt sich eine Jahresarbeitszahl von 7,9. Durch eine solche Betriebsweise könnte die Deckung des BHKWs am Wärmebedarf um bis zu 39 % gesenkt und die BHKW-Betriebsstunden sowie -Betriebsstarts um etwa die Hälfte verringert werden. Die hohen Leistungszahlen können im Wesentlichen auf zwei Faktoren zurückgeführt werden. Einerseits trägt der Verlauf der in das Modell eingehenden Niedertemperaturquelle zu den Ergebnissen bei. Andererseits wird durch die Analyse der im Jahresverlauf auftretenden Vorlauftemperaturen der Wärmepumpe deutlich, dass die Wärmepumpe zu 82 % unterhalb von 30°C operiert. Der Vergleich der simulierten Leistungszahlen mit Feldtests zeigt, dass im realen Betrieb wesentlich niedrigere Jahresarbeitszahlen um einen Wert von 4 zu erwarten sind.

Für die auftretenden Simulationsabbrüche während der Modellentwicklung konnte ein Erklärungsansatz gefunden werden, der die Grenzen von MINLP-Modellen aufzeigt. Eine abschließende Begründung für die Abbrüche konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht gefunden werden. Eine Weiterführung der Modellentwicklung besteht in der Ausdifferenzierung des verbrauchseitigen Modells, das im Rahmen dieser Arbeit vereinfacht dargestellt wird. Hieran anknüpfend müsste die Problemstellung der praktischen Umsetzung der Integration der Wärmepumpe in das bestehende hydraulische System fortgeführt werden. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist hier u.a. das Potential der Betonkernaktivierung genauer zu untersuchen, da dieser Verbraucherheizkreis die Bedingungen für einen kosten- und energieeffizienten Einsatz der Wärmepumpe erfüllt. Eine weitere ausstehende Thematik ist die Live-Umsetzung eines optimierten Fahrplans der Wärmeversorgung am Technologiezentrum.

Literaturverzeichnis

- [1] GEMIS, 06/2020. URL <http://iinas.org/>. 29.08.2021.
- [2] K.-W.-K. G. Alexander Gerlach. Aktuellsten Messungen Mephisto G16+: E-mailkorrespondenz, 15.04.2021.
- [3] Amany von Oehsen. *Entwicklung und Anwendung einer Kraftwerks- und Speicherinsatzoptimierung für die Untersuchung von Energieversorgungsszenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energieversorgungsszenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland*. Dissertation, Universitaet Kassel, 02.06.2012. URL <https://d-nb.info/1038379601/34>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [4] ASUE-Arbeitskreis. BHKW-Grundlagen, 06/2010. URL <https://asue.de/>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [5] F. Auer and H. Schote. Wärme aus der Umwelt auch gut für die Umwelt? Ergebnisse einer siebenjährigen Praxisuntersuchung: Erdgekoppelte Wärmepumpen sparen deutlich Primärenergie ein Kritische Bewertung von Luft-Wärmepumpen. 02/2014. URL <https://www.energiewende-erlangen.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [6] Behörde für Umwelt Klima Energie und Agrarwirtschaft. Leitfaden Erdwärmenutzung, 2021. URL www.hamburg.de/bukea. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [7] C. Bragalli, C. D’Ambrosio, J. Lee, A. Lodi, and P. Toth. On the optimal design of water distribution networks: a practical MINLP approach. *Optimization and Engineering*, 13(2): 219–246, 2012. ISSN 1389-4420. doi: 10.1007/s11081-011-9141-7.
- [8] M. Brautsch and R. Lechner. *Effizienzsteigerung durch Modellkonfiguration in BHKW-Anlagen: Abschlussbericht*, volume 2840 of *Forschungsinitiative Zukunft Bau F*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013. ISBN 9783816789321.
- [9] Bundesamt für Justiz. Verordnung über Arbeitsstätten(Arbeitsstättenverordnung - ArbStättV): ArbStättV, 12.08.2004. URL https://www.gesetze-im-internet.de/arbstaettv_2004/BJNR217910004.html. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [10] Bundesministerium für Umwelt. Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 11/2016. URL https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [11] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2020: unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (Stand: Februar 2021). 02/2021. URL <https://www.erneuerbare-energien.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].

- [12] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Energieeffizienz in Zahlen 2020: Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020. 09/2020. URL <https://www.bmwi.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [13] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Die Energieversorgung 2020 - Jahresbericht. 17.12.2020. URL <https://www.bdew.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [14] Bundesverfassungsgericht. Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich: Pressemitteilung Nr. 31/2021. 29.04.2021. URL <https://www.bundesverfassungsgericht.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [15] BWP Marketing & Service GmbH. Klimakarte nach DIN/TS 12831-1: Empirische Verteilungseigenschaften der deutschlandweiten Daten, 2021. URL <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/klimakarte/>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [16] Christoph Kufke, SmartHeat Deutschland GmbH. Anfrage zu genauen Kennlinienwerten: E-mailkorrespondenz, 07.04.2021.
- [17] S. Decher. *Simulationsbasierte Szenarioanalyse - Variabler Wasserstoffanteil im Gasnetz*. Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 18.03.2019.
- [18] Deutsche Energie-Agentur GmbH. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: dena-Leitstudie Integrierte Energiewende Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050: Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen. 07/2018. URL https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [19] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. Klima im Büro: Antworten auf die häufigsten Fragen. (DGUV Information 215-520), 12/2016. URL <https://www.vbg.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [20] Deutscher Bundestag. Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, 02.06.2021. URL <https://dserver.bundestag.de/btd/19/302/1930230.pdf>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [21] W. Eder and F. Moser. *Die Wärmepumpe in der Verfahrenstechnik*. Springer-Verlag Wien GmbH, Wien, 1979. ISBN 978-3-7091-2252-5.
- [22] U. Eicker. *Solare Technologien für Gebäude: Grundlagen und Praxisbeispiele*. Studium. Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2., vollständig überarbeitete Auflage edition, 2012. ISBN 9783834812810. doi: 10.1007/978-3-8348-8237-0. URL <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8237-0>.
- [23] ETG Taskforce Wärmemarkt. Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050: Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien: Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG). 06/2015. URL http://www.energiedialog2050.de/BASE/DOWNLOADS/VDE_ST_ETG_Warmemarkt_RZ-web.pdf. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].

- [24] Europäischer Rat. Tagung des Europäischen Rates (10. und 11. Dezember 2020) – Schlussfolgerungen: EUCO 22/20: CO EUR 17 CONCL 8. 11.12.2020. URL <https://www.consilium.europa.eu/media/47346/1011-12-20-euco-conclusions-de.pdf>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [25] N. Fisch and M. u. Bodamn. *Wärmespeicher*. TÜV-Verlag GmbH, Köln, 4., erweiterte und völlig überarbeitete Auflage edition, 2005. ISBN 3-8249-0853-0.
- [26] H. Frey. *Energieautarke Gebäude*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019. ISBN 978-3-662-57873-5. doi: 10.1007/978-3-662-57874-2.
- [27] R. O. u. Harthan. Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung: Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politiksznarien IX“)\“, 10/2020. URL <https://www.umweltbundesamt.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [28] F. Hein, J. Herreiner, P. Graichen, and T. Lenck. Die Energiewende im Corona-Jahr: Stand der Dinge 2020: Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2021, 01/2021. URL https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2020_01_-Jahresauswertung_2020/200_A-EW_Jahresauswertung_2020_WEB.pdf. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [29] P. Icha, D. Roßlau, and u.a. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020, 05/2021. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [30] Josef Kallrath. *Gemischt-ganzzahlige Optimierung Modellierung in der Praxis: Mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig Wiesbaden, 2002. ISBN 978-3-322-80220-0.
- [31] O. Keys. *Bestandsanalyse und Optimierungsmöglichkeiten für das experimentelle Heizungssystem am Technologiezentrum Energie-Campus Hamburg*. Bachelorarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 03.04.2018.
- [32] A. Koop and H. Mook. *Lineare Optimierung - eine anwendungsorientierte Einführung in Operations Research*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018. ISBN 978-3-662-56140-9. doi: 10.1007/978-3-662-56141-6.
- [33] kraftwerk GmbH. Brennwert-Blockheizkraftwerk MEPHISTO G16+ G20+: Handbuch, 03.05.2012. URL <https://kwk.info/mephisto-bhkw/aktuelle-modelle/>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [34] J. Kuhlmann and B. Oldorf. Vorläufige Geothermische Leistungsprognose für Energiepfähle: Bauvorhaben: EnergieCampus Hamburg Am Schleusengraben 24 D-21029 Hamburg: PROJEKTNR.: 2012/11/435, 25.07.2012.

- [35] Lennart Hahn, Antonia Lange, Kai Weindock. *Effiziente Implementierung und Verschaltung einer Wärmepumpe und von Wärmespeichern in das bestehende Wärmenetz am Technologiezentrum Energie-Campus Bergedorf*. Masterprojekt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2021.
- [36] W. Limburg. *Prognosebasierte Eigenverbrauchsoptimierung des Windparks Hamburg-Curslack mit dem parkinternen Batteriespeicher*. Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 17.08.2021.
- [37] C. Loreck, R. Harthan, W. Joerss, and L. Emele. Methodenpapier zur Bewertung von KWK-Anlagen in mittelfristiger Perspektive bis 2030: Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 17.07.2015. URL <https://www.oeko.de/oekodoc/2328/2015-497-de.pdf>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [38] Lukas Krohn. *Smart Heat Grid Hamburg: Entwicklung eines nachhaltigen Wärmeversorgungskonzeptes für ein Industrie- und Wohngebiet als Nukleus für einen späteren Fernwärmeanschluss*. Masterthesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 20.06.2019.
- [39] Marah Engels. *Modellbasierte Potenzialanalyse einer sektorengekoppelten Wärmeversorgung in Schleswig-Holstein*. Masterarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 24.11.2020.
- [40] R. Marek and K. Nitsche. *Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen – Anwendungen – Übungsaufgaben*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, auflage: 2., aktualisierte und erweiterte auflage edition, 2010.
- [41] Martin Schlobach. Normaußentemperatur, 12.11.2013. URL <https://www.haustechnikverstehen.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [42] W. Mauch and R. u. Corradini. Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen: ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN 55.Jg. (2010) Heft 9. pages 12–14, Ausgabe 09/2010. URL <https://www.ffe.de/publikationen/>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [43] M. Meller. *Untersuchung von Methoden zur Ermittlung des CO₂-Emissionsfaktors der Erzeugnisse Wärme und Strom in KWK-Anlagen: Masterprojekt*. Masterprojekt, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2020.
- [44] T. Mellouli and L. Suhl. *Optimierungssysteme*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-01579-3. doi: 10.1007/978-3-642-01580-9.
- [45] M. Miara, D. Günter, and T. u. Kramer. Fraunhofer ISE - Wärmepumpen Effizienz: Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, 05.05.2011. URL https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-effizienz//download/wp_effizienz_endbericht_langfassung.pdf. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [46] Sandia National Laboratories. Pyomo Modeling Components: Expressions, 2017. URL https://pyomo.readthedocs.io/en/stable/pyomo_modeling_components/Expressions.html. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].

- [47] G. Schaumann and K. W. Schmitz. *Kraft-Wärme-Kopplung*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-01424-6. doi: 10.1007/978-3-642-01425-3.
- [48] Siemens Schweiz AG. Regeln und Steuern von Heizungsanlagen. pages 18–20, 2019. URL <https://www.downloads.siemens.com/download-center/>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [49] Steck and Michael. *Entwicklung und Bewertung von Algorithmen zur Einsatzplanerstellung virtueller Kraftwerke*. Dissertation, Technische Universität München, 02.10.2012. URL <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1115636/1115636.pdf>.
- [50] I. Stober and K. Bucher. *Geothermie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014. ISBN 978-3-642-41762-7. doi: 10.1007/978-3-642-41763-4.
- [51] Stromnetz Hamburg GmbH. Energieportal Hamburg. URL <https://www.energieportal-hamburg.de/>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [52] D. E. B. u.a. Mixed Integer Nonlinear Decomposition Toolbox for Pyomo MindtPy. 2018. URL <https://www.sciencedirect.com>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [53] Umweltbundesamt. Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland: Sachstandspapier, 2020. URL <https://www.umweltbundesamt.de>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [54] United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris agreement. 2015. URL https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [55] Verein Deutscher Ingenieure e.V. Thermische Nutzung des Untergrundes Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte: VDI-Richtlinie 4640, Blatt 1 (2010), Blatt 2 (2019), 06/2019.
- [56] Volker Quaschnig. Sektorkopplung durch die Energiewende: Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung, 20.06.2016. URL <https://www.volker-quaschnig.de/publis/studien/sektorkopplung/-Sektorkopplungsstudie.pdf>. [zuletzt geprüft am 29.08.2021].
- [57] Volker Quaschnig. *Regenerative Energiesysteme*. Carl Hanser Verlag, München, 9 edition, 2015. ISBN 978-3-446-44267-2. URL <http://www.hanser-fachbuch.de>.
- [58] A. Wünsch. *Effizienter Einsatz von Optimierungsmethoden in der Produktentwicklung durch dynamische Parallelisierung*. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 14.12.2016.

Anhang

7.1 Überprüfung der Zirkulationsverluste in Rohrleitungen

Die in den Modellen getroffene Annahme verlustfreier Übertragung der Wärmeströme zwischen den Komponenten des Heizungssystems soll im Folgenden kurz überprüft werden.

In aufgeheizten Leitungen treten ständig thermischen Verluste durch den Wärmedurchgang nach außen auf. Die Höhe dieser Zirkulationsverluste in Rohrleitungen lässt sich durch ihre Länge, die Wärmedurchgangszahl der Rohrwand, die Zirkulationszeit und die Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgermedium und Außentemperatur nach

$$\dot{Q}_Z = U \cdot l \cdot t_z \cdot (T_w - T_u) \quad (7.1)$$

abschätzen.

Es wird angenommen, dass für die Zuleitung zwischen BHKW und Speicher ein 50 m langes Kupferrohr mit einem handelsüblichen Außendurchmesser von $d_{RA}=0,015$ m und einer Isolationdicke von 30 mm ($d_{LA}=0,075$ m) bei einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda=0,040$ W/mK verwendet wird. Für die Wärmeübergangszahl a wird ein typischer Wert von 10 W/m²K gewählt [57]. Die Wärmedurchgangszahl kann nach

$$U = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{LA}}{d_{RA}} + \frac{1}{a \cdot d_{LA}}} \quad (7.2)$$

auf $0,1465$ W/mK abgeschätzt werden. Mit der in den Modellen getroffene Annahme einer Außentemperatur bei 20°C und Vorlauftemperatur des BHKWs von 80°C , ergeben sich bei einer Zirkulationszeit von einer Stunde Zirkulationsverluste von $439,5$ Wh. Im Volllastbetrieb des BHKWs (36 kW) würden die Zirkulationsverluste $1,2$ % der zur Verfügung gestellten Wärmeenergie des BHKWs betragen. Unter diesen Voraussetzungen erscheint die Vernachlässigung der Zirkulationsverluste in dem Modell als gerechtfertigt. Genauere Abschätzungen mit den realen Maßen bedürfen weiterer Überprüfung.

7.2 Auszug aus BHKW-Handbuch

TECHNIK VON MEPHISTO

3. TECHNIK VON MEPHISTO

3.1 TECHNISCHE DATEN

Typ

- **Mephisto G16+**
mit geregelter Oxidationskatalysator
- **Mephisto G20+**
mit geregelter Drei-Wege-Katalysator

Hersteller

- **kraftwerk**
Kraft-Wärme-Kopplung GmbH
Zur Bettfedernfabrik 1
30451 Hannover

Leistung (regelbar)

- **Mephisto G16+**
elektrisch 5 bis 16 kW
thermisch 19 bis 35,3 kW
Gas 23 bis 50,8 kW H_i
- **Mephisto G20+**
elektrisch 8 bis 20 kW
thermisch 27 bis 46,7 kW
Gas 32,7 bis 63,5 kW H_i

Wirkungsgrad

- **Mephisto G16+** (Angaben für 16,0 kW_{el})
elektrisch 31,5 %
thermisch 69,5 % ($\vartheta_{\text{Rücklauf}} = 35 \text{ °C}$)
gesamt 101,0 % ($\vartheta_{\text{Rücklauf}} = 35 \text{ °C}$)
- **Mephisto G20+** (Angaben für 20,0 kW_{el})
elektrisch 31,5 %
thermisch 73,5 % ($\vartheta_{\text{Rücklauf}} = 35 \text{ °C}$)
gesamt 105,0 % ($\vartheta_{\text{Rücklauf}} = 35 \text{ °C}$)

Stromkennzahl

- **Mephisto G16+** 0,43
- **Mephisto G20+** 0,45

Primärenergiefaktor

(F_{PE,WV} nach EnEV 2007)

- **Mephisto G16+** 0,44
- **Mephisto G20+** 0,43

Brennstoff

- Erdgas der Gruppen H und L, Flüssiggas
- zusätzlich Klär- und Biogas bei Mephisto G16+

Gasanschlussleistung

- **Mephisto G16+** 50,5 kW H_i = 55,5 kW H_s
- **Mephisto G20+** 63,5 kW H_i = 70,4 kW H_s

Gasanschlussdruck

- 20 - 100 mbar

Heizungsanbindung

- zul. Betriebsüberdruck max. 3,0 bar (höhere Drücke auf Anfrage)
- Vorlauftemperatur max. 90 °C
- Rücklauftemperatur max. 70 °C, keine Rücklauftemperaturerhöhung notwendig

Elektroanbindung

- Vorsicherung 50 A gl NH00
- Zuleitung 16 mm² bis 25 m Länge für alle Verlegearten

Plattenwärmetauscher

- gelöteter Edelstahl-Kompaktwärmetauscher zur Trennung der Heizungsanlage vom BHKW-Motorwasserkreislauf

Schadstoffemissionen

- Mephisto G16+ und G20+ unterschreiten die strengen Emissionsgrenzwerte der im Jahr 2002 novellierten TA-Luft um 50 %.

Abgasleitung

- Abgasleitung D 80, Kunststoffrohr der Brandklasse B1 aus PPs, zugelassen als Abgasleitung für Brennwert-Wärmeerzeuger bis 120 °C Abgastemperatur
- Abgastemperatur thermostatisch auf max. 90 °C begrenzt

TECHNIK VON MEPHISTO

7.3 Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten - Wärmespeicher

Die U-Werte stellen ein Maß für den Wärmedurchgang durch einen festen Körper von einem Fluid in ein zweites dar, bedingt durch den Temperaturgradienten zwischen den Fluiden [40]. Diese werden im Folgenden abgeschätzt. Zur Vereinfachung der Berechnung werden die gewölbten Kugelkappen der Speichergeometrie durch flache Flächen angenähert.

Die U-Wert von Speicherdeckel und -boden, U_D und U_B sind abhängig von der Schichtdicke der Polyestervlies-Dämmung von $s_w=0,1$ m, der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von $\lambda_w=0,0375$ W/mK [40] und dem Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Dämmschicht und Luft $h_i = 0.13$ W/m²K [22]. Nach Formel 7.3 ergibt sich ein Wert von 0,38 W/m²K.

$$U_D = U_B = \left(\frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{1}{h_i} \right)^{-1} \quad (7.3)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizienten bezogen auf die Zylinderlänge U_Z ist ebenso durch die Wärmeleitfähigkeit der Isolierung, den Wärmeübergangskoeffizienten sowie von die Außendurchmesser des Speichers $d_{sp,a} = 0,79$ m und der Wärmedämmung $d_{w,a} = 0,99$ m bedingt. Nach [22] ist der Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Fluid und Speicherwand bei der Ermittlung von U_Z vernachlässigbar, wenn man annimmt, dass die Temperatur der Behälterwand der Speichertemperatur entspricht. Es ergibt sich nach Formel 7.4 ein Wert für U_Z von 1 W/m²K.

$$U_Z = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_{w,a}}{d_{sp,a}} + \frac{1}{h_i d_{sp,a}}} \quad (7.4)$$

7.4 Aktuelle Messdaten Mephisto G16+

Quelle:[2]

G16+	Messung	1	2	3	4	5	6	7
		5	6,8	8,7	10,5	12,3	14,2	16
Leistung	kW	5	6,8	8,7	10,5	12,3	14,2	16
Gas Leistung auf Brennwert Bezogen	kW	30,7	17,2	19,2	21,2	23,4	25,7	56,0
Gas Leistung auf Heizwert Bezogen	kW	27,7	15,5	17,3	19,1	21,1	23,2	50,4
thermische Gesamtleistung	kW	21,8	23,4	25,4	27,2	29,1	31,1	32,9
elektrischer Wirkungsgrad	%	18,0	21,8	25,1	27,5	29,2	30,6	31,8
thermischer Wirkungsgrad	%	78,7	75,4	73,3	71,1	68,9	67,2	65,2
gesamter Wirkungsgrad	%	96,7	97,2	98,4	98,6	98,0	97,8	97,0

7.5 Aktuelle Messdaten SmartHeat classic 010 WWi R

Quelle:[16]

Quelleingangstemp	Senkenvorlauftemp.	Pth gesamt	Pe gesamt	COP/EER
°C	°C	kW	kW	-
-5	35	3,33	0,86	3,85
0	35	3,88	0,87	4,45
5	35	4,50	0,87	5,20
10	35	5,21	0,84	6,18
15	35	6,00	0,80	7,48
-5	45	3,19	1,05	3,05
0	45	3,71	1,08	3,44
5	45	4,28	1,10	3,91
10	45	4,94	1,10	4,49
15	45	5,67	1,09	5,21
-5	55	3,05	1,25	2,45
0	55	3,52	1,30	2,71
5	55	4,05	1,34	3,03
10	55	4,64	1,37	3,40
15	55	5,32	1,39	3,84

7.6 Thermischer Wirkungsgrad und Leistung Mephisto G16+

Quelle:[2]

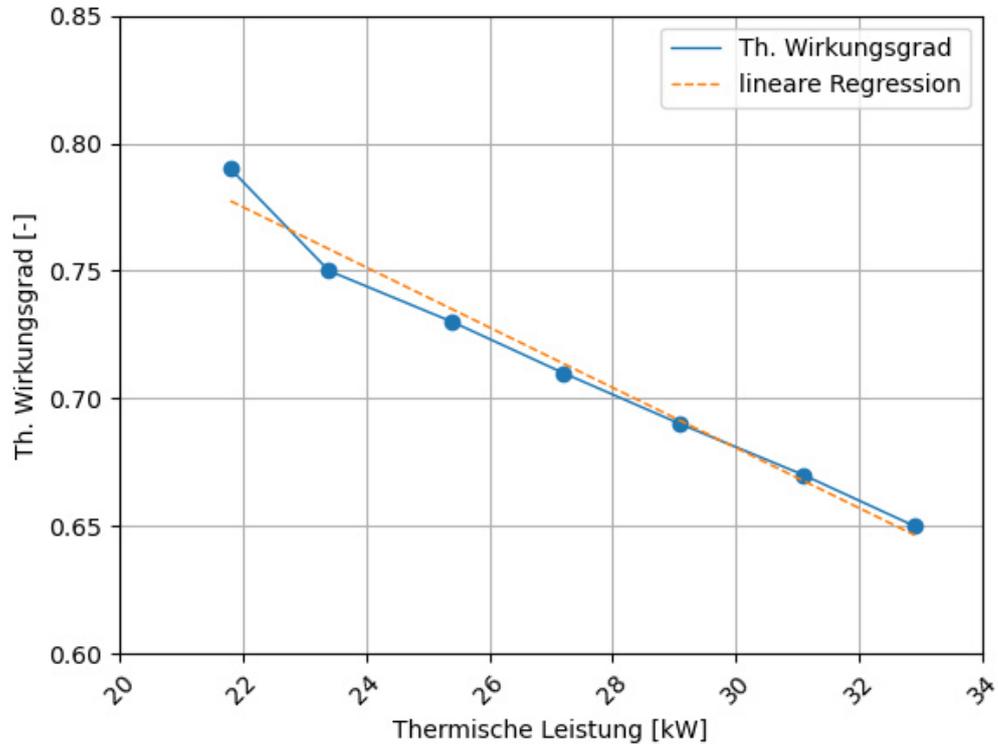


Abbildung 7.1: Themischer Wirkungsgrad über thermischer Leistung Mephisto G16+

7.7 Auszug aus Wärmepumpen-Datenblatt

Bezeichnung Description Bestellnummer Order number	Typ type			Kältemittel Refrigerant	Verdichtertyp Compressor		Betriebspunkt Operation point	Leistungsdaten Performance data 1)								Max. Betriebsstrom Max. current consumption [A]	Netzanschluss Power supply [V] / [Hz]	Max. Vorfluttemperatur Max. flow temperature [°C]	Hydraul. Anschlüsse hydraulic connections	Abmessungen Dimensions H x B x T [mm]	ca. Gewicht aprox. weight [kg]	Energieeffizienz energy label		Kältemittelmenge Refrigerant weight [kg]	Schalldruckpegel Sound power level [dB]
	Sole / Wasser brine/water	Wasser / Wasser water/water	inkl. aktiver Kühlung incl. active cooling		Inverter scroll inverter-scroll	Inverter Rollkollen inverter-rolary		Drehzahl Revolutions per second	Leistungsbereich Capacity range [kW]	Heizleistung Normal heating capacity [kW]	Leistungsaufnahme Power input [kW]	Betriebsstrom Current [A]	Leistungszahl COP	EER // Kühlung W(B)z/W35 max [l / h] // [kW]	Leistungsaufnahme Power supply [V] / [Hz]							Max. Vorfluttemperatur Max. flow temperature [°C]	Hydraul. Anschlüsse hydraulic connections		
SmartHeat classic 008 BWi							Bo/ W35	1,89 - 7,84	1,89 4,24 7,84	0,43 0,93 1,79	3,7 3,9 5	4,43 4,57 4,37	-	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	135	A++	A+++	2,7	42-52		
Ho55001008	x			R410a			Bo/ W55	1,70 - 7,2	1,7 3,81 7,2	0,64 1,34 2,6	5,5 5,8 7,4	1,66 2,84 2,77	-	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	135	A++	A+++	2,7	42-52		
SmartHeat classic 008 BWi R	x		x	R410a			Bo/ W35	1,85 - 7,68	1,85 4,15 7,68	0,42 0,91 1,76	3,7 3,9 5	4,34 4,48 4,28	5,12 // 8,35	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	140	A++	A+++	2,7	42-52		
Ho55006008	x		x	R410a			Bo/ W55	1,66 - 7,06	1,66 3,73 7,06	0,62 1,31 2,55	5,5 5,8 7,4	2,61 2,79 2,72	-	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	135	A++	A+++	2,7	42-52		
SmartHeat classic 010 WWi							W10/ W35	2,53 - 10,33	2,53 5,72 10,33	0,42 0,91 1,77	3,6 3,8 4,8	6,11 6,3 5,84	-	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	135	A++	A+++	2,7	42-52		
Ho55002010		x		R410a	x		W10/ W55	2,24 - 9,45	2,24 5,06 9,45	0,67 1,43 2,77	5,7 6,1 7,7	3,32 3,55 3,41	-	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	135	A++	A+++	2,7	42-52		
SmartHeat classic 010 WWi R			x	R410a			W10/ W35	2,48 - 10,13	2,48 5,61 10,13	0,41 0,89 1,74	3,6 3,8 4,8	5,98 6,17 5,72	5,12 // 8,35	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	140	A++	A+++	2,7	42-52		
Ho55007010		x	x	R410a	x		W10/ W55	2,19 - 9,26	2,19 4,96 9,26	0,66 1,4 2,72	5,7 6,1 7,7	3,25 3,48 3,34	-	12	230 ; 50 1 Ph	60	4 x 1"	Schrankdimension dimensions of housing 1060 x 600 x 620 mit Anschlüssen with connections 1060 x 600 x 700	140	A++	A+++	2,7	42-52		

Abbildung 7.2: Auszug aus Wärmepumpen-Datenblatt SmartHeat classic 010 WWi R

7.8 Regressionsgeraden der Koeffizienten m und b

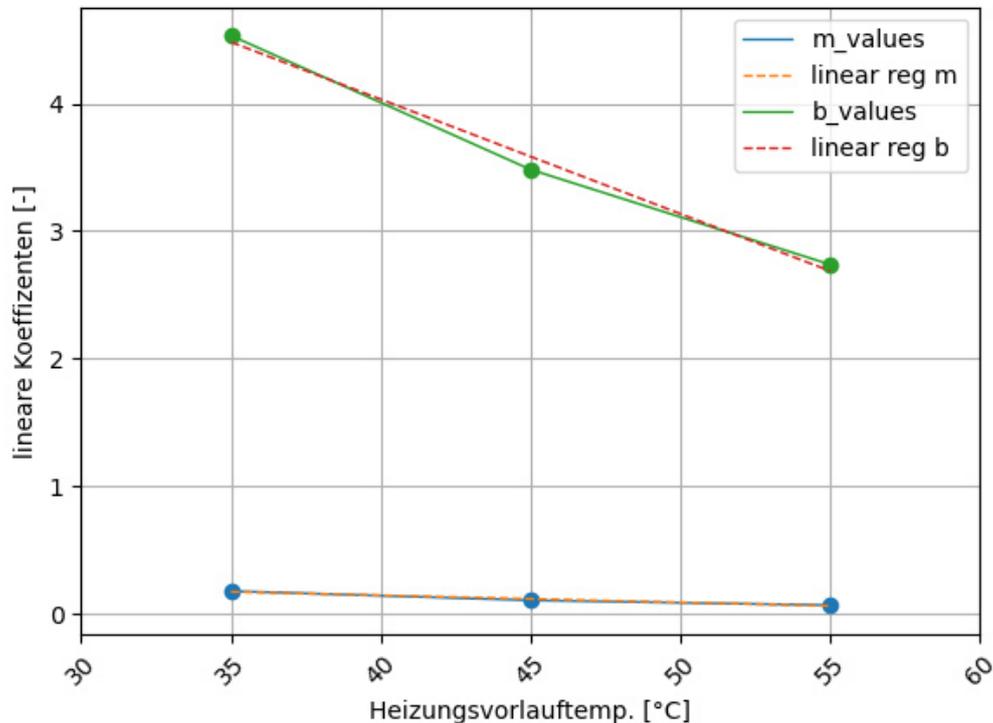


Abbildung 7.3: Regressionsgeraden der Koeffizienten m und b

7.9 Digitaler Anhang

Der beigefügten CD sind folgende zusätzliche Inhalte zu entnehmen:

Dateiname	Erklärung
Gundoptimierung.py	Python-Skript der Grundoptimierung
Erweiterte optimierung.py	Python-Skript der erweiterten Optimierung
main.py	Python-Skript für Datenplots
daten_einlesen.py	Python-Skript für das Einlesen von InfluxDB-Daten
Schichtenspeichermodell.py	Python-Skript Schichtenspeicher (einzeln)
input_data.csv	CSV-Datei: Eingangsdaten
Auswertung Teil1.xlsx	Excel-Datei: Auswertung der Betriebsstarts, Betriebsstunden, Effizienz, CO ₂ -Emissionen
Auswertung Teil2.xlsx	Excel-Datei: Auswertung der Jahresdauerlinien

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Masterarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

.....
Datum Unterschrift