



## Flexibilisierung dezentraler KWK-Anlagen durch LowEx-Technologie und Speichermanagement

Johannes Karl Leopold Elfner, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

**Vorsitzender:**

Prof. Dr. Thomas Hamacher

**Prüfende der Dissertation:**

1. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Prof. Dr.-Ing. Franz Josef Ziegler,  
Hochschule für angewandte Wissenschaften München

Die Dissertation wurde am 14.04.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 26.08.2021 angenommen.



## Zusammenfassung

Eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts wird die Bekämpfung des Klimawandels sein. Eine wichtige Maßnahme hierzu ist die großflächige Integration erneuerbarer Energien. Deren fluktuierende Produktion führt zu einem steigenden Bedarf an Ausgleichsenergie im Energiesystem. Diese bereitzustellen erfordert eine hohe Flexibilität. Gebäudeenergiesysteme, verantwortlich für circa 25 % des gesamten Primärenergiebedarfs in Deutschland, können diese Flexibilität mittels Blockheizkraftwerken bereitstellen.

In dieser Arbeit wird erstmals eine LowEx-Anlagentechnik zur Trinkwassererwärmung eingesetzt, um Gebäudeenergiesysteme mit Blockheizkraftwerken zu flexibilisieren. Dazu wird die LowEx-Anlage in einem Feldtest untersucht. Die Erkenntnisse fließen in eine Simulation mit Parametervariation ein. Eine anschließende statistische Modellierung erlaubt eine detaillierte Sensitivitätsanalyse. Während in bisherigen Arbeiten vorrangig die regelungstechnische Seite der Flexibilität beschrieben wurde, werden hier die technischen und thermodynamischen Randbedingungen analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass – entgegen gängiger Annahmen – auch die technische Optimierung der Trinkwassererwärmung einen erheblichen Beitrag zur Flexibilisierung des Energiesystems leisten kann. Die Auswertung des Feldtests hebt hervor, dass der Einsatz einer modernen LowEx-Anlagentechnik eine zeitliche Flexibilität des Blockheizkraftwerks von 10 h ermöglicht. Weiterhin wird die Rücklauf-temperatur abgesenkt, wodurch ein Gesamtwirkungsgrad des Blockheizkraftwerks von 95 % bezüglich des Brennwertes erreicht wird.

Der Ergebnistransfer mittels Simulationen und anschließender Regressionsanalyse bestätigt diese Ergebnisse für eine Vielzahl an verschiedenen Gebäudeenergiesystemen. Die verzögerte Flexibilität kann gegenüber einer Standardanlage trotz kleinerem Speicher im Mittel um 48 % gesteigert werden, das heißt der Wärmebedarf kann deutlich länger ausschließlich aus dem Speicher gedeckt werden. Um einen konstanten Betrieb des Blockheizkraftwerks von 10 h zu erreichen, wird ein um 10 % kleinerer Speicher benötigt, das Blockheizkraftwerk kann um 4 % größer ausgelegt werden. Diese Vorteile der LowEx-Anlagentechnik ermöglichen einen um 9 % höheren Bruttoertrag bei wärmegeführten Blockheizkraftwerken, stromgeführt werden 23 % höhere Erträge erzielt. Der Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen können um 14 % reduziert werden.

## Abstract

Reducing the impact of the climate change will be one of the most important challenges of the 21st century. To meet this challenge, the widespread integration of renewable energies is a crucial measure. However, the fluctuating production of the renewables leads to an increasing demand of imbalance power in the energy system. Providing this requires a high flexibility. Residential energy systems, responsible for about 25 % of the German primary energy demand, can provide this flexibility by means of combined heat and power plants.

This approach will be taken in this thesis. Therefore a novel low exergy potable water heating appliance, capable of optimizing return flow temperatures, is installed in a field test. The findings are used to establish a simulation with a parameter variation. A subsequent statistical modeling allows for a detailed sensitivity analysis. While existing work in this field is mainly focused on modeling and control theoretic approaches towards flexibility, this thesis takes a closer look on the technical and thermodynamic boundary conditions.

It can be shown that – in contrast to common assumptions – a technical optimization of potable water heating appliances can make a large contribution to the flexibilization of the energy system. The results of the field test show that a modern low exergy appliance can increase the temporal flexibility of the energy system to 10 h. Furthermore return flow temperatures are reduced, such that a total efficiency of the combined heat and power plant of 95 %, with reference to the higher heating value, is achieved.

The results of the simulations and the statistical modeling confirm these findings. In comparison to a state of the art appliance, the delayed flexibility can be increased by 48 %, meaning that the heat demand can be shifted substantially longer. Enabling a constant operation of the combined heat and power plant of 10 h requires a 10 % smaller thermal storage while allowing for a 4 % larger plant. These advantages of the low exergy appliance lead to 9 % higher gross revenues. If the plant is additionally controlled by the electricity demand, an increase of 23 % is possible. Furthermore the primary energy demand and the CO<sub>2</sub> emissions can be reduced by 14 %.

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im kooperativen Graduiertenkolleg Gebäudetechnik & Energieeffizienz an der Hochschule München und meiner Einbindung als Doktorand am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner für die Übernahme meiner wissenschaftlichen Betreuung und das entgegengebrachte Vertrauen. Er hat mich jederzeit mit hilfreichen Ratschlägen unterstützt und mir gleichzeitig die Freiheit gelassen, meine eigenen Ideen umzusetzen. Darüber hinaus band er mich aktiv in den Lehrstuhlbetrieb ein und stellte den Kontakt mit Personen aus Wissenschaft und Wirtschaft her.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Franz Josef Ziegler möchte ich für die besondere fachliche und persönliche Betreuung an der Hochschule München danken. Er stand mir immer mit Rat und Tat zur Seite und war offen für die Einbindung neuer Ideen und Vorschläge. Die enge Abstimmung bei Projekten habe ich sehr geschätzt. Ausgedehnte fachliche und außerfachliche Diskussionen, ein kurzer Espresso zwischendurch und regelmäßige Besuche beim indischen Stammrestaurant waren immer eine Bereicherung.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Ebenfalls gilt mein Dank meinen Kollegen im Graduiertenkolleg und am Lehrstuhl. Vielfältige Diskussionen, die Unterstützung bei Herausforderungen und der persönliche Kontakt haben die Zeit kurzweilig erscheinen lassen. Insbesondere hervorheben möchte ich hier die Unterstützung durch Dr. Katja Mitzscherling und Dr. Jürgen Meier. In diesem Kontext möchte ich auch den Professoren Christian Schweigler, Madjid Madjidi und Werner Jensch meinen herzlichen Dank für die äußerst hilfreiche und unbürokratische finanzielle Unterstützung aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für die tatkräftige Unterstützung auf allen bisherigen und kommenden Lebensabschnitten. Meine Eltern haben mich jederzeit unterstützt und mir vieles ermöglicht. Mein Bruder Max hat mir bei der Korrektur dieser Arbeit umfangreich geholfen. Mein größter Dank gilt meiner Frau Maria. Sie hat mich in allen Situationen sowohl fachlich als auch persönlich unterstützt. Sie gab mir den wichtigen Rückhalt und die Motivation, die mir den Abschluss dieser Arbeit erleichtert haben. Auch bei der Korrektur hat sie tatkräftig angepackt.

München, Oktober 2021

Johannes Elfner



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
<b>Abkürzungen, Symbole und Indizes</b>	<b>XVII</b>
Abkürzungen . . . . .	XVII
Symbole . . . . .	XVII
Indizes . . . . .	XIX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	3
1.3 Methodik und Aufbau . . . . .	4
<b>2 Flexible Kraft-Wärme-Kopplung in Gebäudeenergiesystemen</b>	<b>7</b>
2.1 Bedarf an flexibler Kraft-Wärme-Kopplung in Gebäudeenergiesystemen . . . . .	8
2.2 Anlagentechnik von Gebäudeenergiesystemen – LowEx-Trinkwassererwärmung . . . . .	10
2.2.1 Kategorisierung von TWE-Anlagen . . . . .	10
2.2.2 Kriterien zur Bewertung von TWE-Anlagen . . . . .	11
2.2.3 Standardsysteme . . . . .	12
2.2.3.1 Speicherladesystem . . . . .	12
2.2.3.2 Speichersystem und Durchflusssystem . . . . .	13
2.2.4 LowEx-Trinkwassererwärmung . . . . .	14
2.2.5 Messtechnische Analyse von LowEx-TWE und Speicherladesystem auf dem Laborprüfstand . . . . .	15
2.2.5.1 Allgemeine Eigenschaften der Systeme . . . . .	17
2.3 Kennzahlen der Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	18
2.4 Flexibilität von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen . . . . .	18
2.4.1 Quantifizierung der Flexibilität . . . . .	18
2.4.2 Stand der Technik flexibler Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	21
2.5 Wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen von Klein-KWK in Wohngebäuden	23
2.5.1 Kapitalgebundene Kosten und Erlöse . . . . .	23
2.5.2 Betriebsgebundene Kosten und Erlöse . . . . .	23
2.5.3 Verbrauchsgebundene Kosten und Erlöse . . . . .	24
2.5.4 Berechnung des verbrauchsgebundenen Bruttoertrags . . . . .	25
2.6 Primärenergiebedarf und CO <sub>2</sub> -Äquivalent . . . . .	27

<b>3</b>	<b>Grundlagen der Numerik und angewandten Statistik</b>	<b>31</b>
3.1	Numerische Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen . . . . .	31
3.1.1	Diskretisierung und Finite-Differenzen-Methode . . . . .	32
3.1.1.1	Vorwärts- und Rückwärtsdifferenz erster Ordnung, Upwind-Schema . . . . .	32
3.1.1.2	Zentrale Differenz erster und zweiter Ordnung . . . . .	33
3.1.2	Numerische Verfahren zur Lösung von Anfangswertproblemen . . . . .	33
3.1.2.1	Explizite und implizite Verfahren . . . . .	34
3.1.2.2	Mehrstufige Verfahren, Mehrschrittverfahren . . . . .	35
3.1.2.3	Kondition, Konsistenz, Stabilität, Konvergenz . . . . .	35
3.2	Konvektions-Diffusions-Reaktions-Gleichung . . . . .	36
3.2.1	Wärmeübertragung in Fluiden . . . . .	37
3.2.2	Überführung in Gleichungen des stationären Wärme- und Stofftransports . . . . .	37
3.3	Angewandte Statistik . . . . .	38
3.3.1	Kennzahlen . . . . .	38
3.3.2	Regressionsanalyse - Maschinelles Lernen . . . . .	40
3.3.2.1	Preprocessing . . . . .	41
3.3.2.2	Lineare Regression . . . . .	43
3.3.2.3	Methoden zur Ermittlung der Regressionskoeffizienten . . . . .	44
3.3.2.4	Scoring, Kreuzvalidierung und Hyperparameteroptimierung . . . . .	45
3.3.3	Interpretation statistischer Modelle . . . . .	46
3.3.3.1	Shapley additive explanations . . . . .	47
3.3.3.2	Permutation Feature Importance . . . . .	48
3.3.3.3	Sobol-Methode . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Feldtest einer flexiblen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage</b>	<b>51</b>
4.1	Projektbeschreibung . . . . .	51
4.1.1	Umsetzung . . . . .	52
4.1.1.1	Speicherebene . . . . .	54
4.1.1.2	Produktionsebene . . . . .	55
4.1.1.3	Verbraucherebene . . . . .	57
4.2	Analyse der Messdaten . . . . .	57
4.2.1	Überblick . . . . .	57
4.2.2	Betrieb des Blockheizkraftwerks . . . . .	58
4.2.2.1	Schaltvorgänge . . . . .	59
4.2.3	Effizienz . . . . .	61
4.2.3.1	Effizienz des Abgas-Wärmeübertragers . . . . .	61
4.2.3.2	Gesamtwirkungsgrad des BHKWs . . . . .	62
4.2.4	Stromlastprofile . . . . .	64
4.2.5	Flexibilität der Anlage . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Simulation von dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mittels Parametervariation</b>	<b>69</b>
5.1	Vorstellung des Simulationsprogramms . . . . .	69
5.1.1	Programmablaufplan MultiSim . . . . .	70



5.1.2	Gleichungsmodell . . . . .	72
5.1.2.1	Diskretisierung der Konvektions-Diffusions-Gleichung mittels Finite-Differenzen-Methode . . . . .	72
5.1.2.2	Wärmeleitung . . . . .	73
5.1.2.3	Zellenmodell . . . . .	74
5.1.2.4	Löser mit Heun-Methode . . . . .	74
5.1.2.5	Schrittweitensteuerung . . . . .	75
5.1.3	Komponenten . . . . .	77
5.1.4	Modellierung ausgewählter Bauteile . . . . .	77
5.2	Validierung . . . . .	79
5.2.1	Validierung der Verbraucher- und Speicherebene . . . . .	80
5.2.2	Validierung der BHKW-Produktionsebene . . . . .	81
5.3	Simulierte Anlagentypen . . . . .	84
5.3.1	Referenzsystem: Speicherladesystem . . . . .	84
5.3.2	LowEx Basis . . . . .	86
5.3.3	LowEx Winter . . . . .	87
5.3.4	LowEx Strom . . . . .	87
5.3.4.1	Modellprädiktive Regelung . . . . .	89
5.4	Aufbau des Parametergitters . . . . .	90
5.4.1	Abhängige Variablen . . . . .	90
5.4.2	Unabhängige Variablen und Wertebereiche . . . . .	91
5.4.3	Versuchsplanung - Häufigkeitsverteilungen und Design of Experiments . . . . .	92
5.4.4	Erstellung des Parametergitters . . . . .	95
5.5	Analyse der Simulationsergebnisse . . . . .	97
<b>6</b>	<b>Statistisches Modell</b>	<b>103</b>
6.1	Regressionsmodelle . . . . .	103
6.1.1	Methodik . . . . .	104
6.1.2	Evaluation der statistischen Modelle . . . . .	105
6.2	Sensitivitätsanalyse . . . . .	106
6.2.1	Globale Sensitivitätsanalyse . . . . .	107
6.2.1.1	Verzögerte Flexibilität . . . . .	107
6.2.1.2	Erzwungene Flexibilität . . . . .	108
6.2.1.3	Bruttoertrag . . . . .	110
6.2.1.4	Primärenergiebedarf und CO <sub>2</sub> -Emission . . . . .	111
6.2.2	Lokale Sensitivitätsanalyse . . . . .	113
6.2.2.1	Verzögerte Flexibilität . . . . .	113
6.2.2.2	Erzwungene Flexibilität . . . . .	114
6.2.2.3	Bruttoertrag . . . . .	116
6.2.2.4	Primärenergiebedarf und CO <sub>2</sub> -Emission . . . . .	117
6.3	Anlagenvergleich . . . . .	118
6.3.1	Flexibilität . . . . .	120
6.3.2	Bruttoertrag . . . . .	121
6.3.3	Primärenergiebedarf und CO <sub>2</sub> -Emission . . . . .	123
6.4	Zusammenfassung der statistischen Analyse . . . . .	127

<b>7 Fazit und Ausblick</b>	<b>131</b>
7.1 Ausblick . . . . .	134
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Ablaufplan der vorliegenden Arbeit . . . . .	4
2.1	Nettostromerzeugung durch KWK von 2003 bis 2025 nach Energieträger, nach [25], [27]	7
2.2	Kategorien der TWE-Systeme, nach [50] . . . . .	11
2.3	Minimale Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur und vom Verhältnis des täglichen Wärmebedarfs für Warmwasser und Zirkulation, nach [51] . .	12
2.4	Reduzierte Funktionsschemata – a) Speicherladesystem; b) LowEx-TWE . . . . .	13
2.5	Untersuchung eines Speicherladesystems (Ref.) und einer LowEx-TWE (LowEx) auf dem Laborprüfstand unter gleichen Bedingungen über einen Tag – a) Temperaturen; b) Leistungen . . . . .	16
2.6	Boxplot der gemessenen Rücklauftemperaturen von Speicherladesystemen und LowEx-TWE-Anlagen in insgesamt 17 Mehrfamilienhäusern in München . . . . .	16
2.7	Spezifische Speicherkapazität verschiedener Anlagentypen, nach [22] . . . . .	22
2.8	Betriebskosten und Vergütung eines BHKWs – a) Einspeisevergütung nach KWK-Index sowie EEG-Umlage; b) Instandhaltungskosten eines üblichen Vollwartungsvertrages . .	25
2.9	Berechnung des PE-Bedarfs und der CO <sub>2</sub> -Emissionen – Bilanzgrenzen und Energieströme für ein Referenzgebäude und ein Gebäude mit KWK . . . . .	28
3.1	Approximation der Ableitungen einer Funktion mittels Vorwärts-, Rückwärts- und zentraler Differenz sowie jeweils verwendete Stützstellen . . . . .	33
3.2	Kompakter Stencil finiter Differenzschemata in einer Raumdimension; Berechnungsvorschrift bezüglich des Zielknotens exklusive Nenner . . . . .	34
3.3	One-Hot-Encoding der kategorischen Variablen „BHKW“ und „Status“ mit zwei beziehungsweise drei Stufen . . . . .	42
3.4	Einfache $k$ -Fold Kreuzvalidierung, nach [115] . . . . .	45
3.5	SHAP-Werte eines statistischen Modells zur Berechnung des Ertrags – a) Detailauswertung des Beitrags einzelner Parameter $P_1, \dots, P_7$ einer ausgewählten Stichprobe zur Differenz zwischen Erwartungswert und vorhergesagter Zielgröße; b) Lokale Erklärung eines Parameters $P$ für alle Stichproben in Abhängigkeit von einer gemischten kategorischen Interaktionsvariable . . . . .	48
4.1	Außenansicht der Wohnanlage des Feldtests . . . . .	51
4.2	Vereinfachtes Funktionsschema des Feldtests mit Unterteilung in Systemebenen (HT: Hochtemperatur, NT: Niedertemperatur) . . . . .	53
4.3	Feldtest – Übersicht des Heizkellers . . . . .	53
4.4	TES des Feldtests mit Anschlüssen und Temperaturfühlern in 0,4 m Tauchhülsen (RL: Rücklauf, VL: Vorlauf, HT: Hochtemperatur, NT: Niedertemperatur) . . . . .	54
4.5	Trisigmoid-Temperaturverlauf des TES mit $n = 3$ Schichten für drei Außentemperaturen $\theta_e$ ; Schichttemperaturen und Wendepunkte für einen Fall eingezeichnet . . . . .	56

4.6	BHKW des Feldtests mit Abgaswärmeübertrager . . . . .	56
4.7	Spezifischer Wärmebedarf des Feldtests in Abhängigkeit von der Außentemperatur . . . . .	58
4.8	Temperaturen und Leistungen der PWH-Erwärmung, PWH-C-Nachheizung, Heizung und des BHKWs – a) Temperaturen im Winter; b) Temperaturen im Sommer; c) Leistungen im Winter; d) Leistungen im Sommer . . . . .	59
4.9	Anzahl täglicher Anschaltvorgänge des BHKWs sowie BHKW-Betrieb je Tag . . . . .	60
4.10	Tägliche Laufzeit des BHKWs; 100 % entsprechen 24 h/d . . . . .	60
4.11	Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Abgastemperatur und vom Verbrennungsluftverhältnis . . . . .	61
4.12	BHKW-Abgaswärmeübertrager – a) Temperaturen; b) Leistung und Massenstrom; c) Steigerung des Wirkungsgrades bezüglich des Heizwerts durch Abgas-Wärmeübertrager . . . . .	62
4.13	Effizienz des BHKWs im Jahr 2020 – a) Effizienz bezüglich Heizwert und Brennwert im Wochenmittel; b) Abweichung der Effizienz vom Erwartungswert . . . . .	63
4.14	Stromlastprofile Juni 2020 – a) Stromverbrauch und Produktion; b) Aufteilung des Stromverbrauchs auf Grundlast, Mieterstrom und Sonstige; c) Aufteilung der Produktion auf Eigennutzung, Einspeisung sowie zugekauften Strom . . . . .	64
4.15	Flexibilität im Sommer – a) Temperaturgradient im TES, Werte $>200$ K/m in weiß dargestellt; b) Temperaturverlauf im TES, Werte unter $<20$ °C in weiß dargestellt, Flexibilität eingetragen . . . . .	66
4.16	Flexibilität in der Übergangszeit und im Winter – a) Temperaturgradient im TES, Werte $>200$ K/m in weiß dargestellt; b) Temperaturverlauf im TES, Werte $<20$ °C in weiß dargestellt . . . . .	67
4.17	Tageszeitabhängige Flexibilität im Sommer (links) und in der Übergangszeit (rechts) – a) Heizlast sowie PWH- und PWH-C-Erwärmung; b) erzwungene Flexibilität $\tau_f$ ; c) verzögerte Flexibilität $\tau_d$ ; Werte $>14$ h sind in weiß dargestellt, Werte $<8$ h in schwarz . . . . .	68
5.1	Programmablaufplan des Simulationsprogramms MultiSim . . . . .	71
5.2	Programmablaufplan des iterativen Lösungsverfahrens für Differentialgleichungssysteme . . . . .	71
5.3	Wärmeübergang zwischen Wasser ( $w$ ), Rohr ( $R$ ), Isolierung ( $I$ ) und Umgebung ( $\infty$ ) für eine – a) Rohrströmung; b) angeströmte Platte . . . . .	73
5.4	Zellenmodell zur Berechnung der Energiebilanzen am Beispiel eines TES mit $m$ Zellen . . . . .	74
5.5	Schema des im Simulationsprogramm implementierten BHKW-Moduls mit Abgas-Wärmeübertrager, optionalem separatem Hochtemperaturrücklauf und PID-Reglern . . . . .	78
5.6	An- und Abschaltpolynome des im Simulationsprogramm verwendeten BHKW-Modells . . . . .	79
5.7	Validierung der Verbraucher- und Speicherebene – Prediction-Realization-Plot mittels Kerndichteschätzer von a) Trinkwassererwärmung und Zirkulation; b) TES-Ladung . . . . .	81
5.8	Validierung der BHKW-Produktionsebene – reduziertes Funktionsschema (HT: Hochtemperatur, NT: Niedertemperatur) . . . . .	82
5.9	Validierung BHKW-Produktionsebene – Prediction-Realization-Plot mittels Kerndichteschätzer a) des Abgaswärmeübertragers; b) der Gesamtleistung des BHKWs . . . . .	83
5.10	Validierung der BHKW-Produktionsebene – Abgleich von Simulationsergebnissen und Messdaten für a) Temperaturen; b) Leistungen . . . . .	83
5.11	Validierung der BHKW-Produktionsebene – TES-Temperatur über 36 h für a) Messdaten aus Feldtest; b) Simulation der BHKW-Produktionsebene . . . . .	84
5.12	Referenzsystem Speicherladesystem – reduziertes Funktionsschema . . . . .	85

5.13	Randbedingungen der Simulation – sekundlich aufgelöste Trinkwasserverbrauchsprofile sowie konstante Zirkulationsleistung; Mehrfamilienhaus mit 2000 m <sup>2</sup> Wohnfläche nach EnEV 2009 . . . . .	86
5.14	LowEx-System – reduziertes Funktionsschema (HT: Hochtemperatur, NT: Niedertemperatur) . . . . .	87
5.15	Randbedingungen der Simulation – Heizlast, Vorlauf- und Rücklauf-temperatur der Heizkreise und Außentemperatur $\theta_e$ ; Mehrfamilienhaus mit 2000 m <sup>2</sup> Wohnfläche nach EnEV 2009 im Winter 2019 . . . . .	88
5.16	Randbedingungen der Simulation – sekundlich aufgelöstes elektrisches Verbrauchsprofil $P_{el,dmd}$ sowie aus langfristigen Daten errechnetes mittleres Verbrauchsprofil $P_{el,pred}$ zur Verwendung im modellprädiktiven Regler; Mehrfamilienhaus mit 2000 m <sup>2</sup> . . . . .	88
5.17	Design of Experiments – Von vollständigen (faktoriellen) Versuchsplänen zu Latin Hypercube Sampling . . . . .	95
5.18	Parametergritter der unabhängigen Variablen – Scatter-Plot der Verteilungen auf der unteren Dreiecksmatrix, Werteerteilungen auf der Hauptdiagonalen, paarweise partielle Korrelationskoeffizienten auf der oberen Dreiecksmatrix . . . . .	97
5.19	Betriebscharakteristik des Referenzsystems, des LowEx Basis Systems und des LowEx Strom Systems – linke Spalte: Leistungen; rechte Spalte: Speicherein- und Temperaturen des BHKWs . . . . .	99
5.20	Simulationsergebnisse der a) BHKW-Rücklauf-temperatur in Abhängigkeit von der Dämmstärke; b) spezifische TES-Kapazität in Abhängigkeit vom Speichervolumen . . . . .	100
5.21	Flexibilität des Referenzsystems und des LowEx Basis Systems in Abhängigkeit – a) und c) vom Speichervolumen; b) von der BHKW-Leistung; d) von der Wohnfläche . . . . .	101
5.22	Thermische und elektrische Wirkungsgrade der simulierten Anlagen in Abhängigkeit von – a) und c) der Rücklauf-temperatur; b) und d) den Einschaltvorgängen . . . . .	102
6.1	Ablaufplan der Regression in scikit-learn – Hyperparameteroptimierung, Variablentransformation, Polynomtransformation, Feature Extraction und Selection zur Reduktion der Dimensionalität und anschließende lineare Regression mit Kreuzvalidierung . . . . .	104
6.2	Adjustierte Determinationskoeffizienten der Regressionsmodelle; für multivariate Regressionsmodelle werden die Verteilungen der Werte als Boxplot gezeigt . . . . .	105
6.3	Absolutwerte der partiellen paarweisen Spearman-Rangkorrelation zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen . . . . .	106
6.4	Globale Sensitivitätsanalyse verzögerte Flexibilität – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet . . . . .	107
6.5	Globale Sensitivitätsanalyse erzwungene Flexibilität – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet . . . . .	109
6.6	Globale Sensitivitätsanalyse Bruttoertrag – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet . . . . .	110
6.7	Globale Sensitivitätsanalyse der Reduktion des PE-Verbrauchs – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet . . . . .	112
6.8	Lokale Sensitivitätsanalyse verzögerte Flexibilität – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter . . . . .	114
6.9	Lokale Sensitivitätsanalyse erzwungene Flexibilität – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter . . . . .	115
6.10	Lokale Sensitivitätsanalyse Bruttoertrag – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter . . . . .	116

6.11 Lokale Sensitivitätsanalyse der PE-Einsparung – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter	118
6.12 Systemoptimierung bezüglich Flexibilität – a) Maximierung der verzögerten Flexibilität; b) Minimierung TES-Volumen bei konstanter erzwungener Flexibilität; c) Maximierung BHKW-Leistung bei konstanter erzwungener Flexibilität . . . . .	120
6.13 Systemoptimierung bezüglich Bruttoertrag – Optimale Bruttoerträge im Anlagenvergleich	122
6.14 Systemoptimierung bezüglich Bruttoertrag – Benötigtes TES-Volumen und benötigte BHKW-Leistung für optimale Bruttoerträge . . . . .	123
6.15 Systemoptimierung bezüglich PE-Einsparung nach Displacement Mix – a) unter Ein- bezug von Nuklearenergie im Netz; b) ohne Nuklearenergie im Netz; c) nach EnEV und GEG 2020 . . . . .	124
6.16 Systemoptimierung bezüglich CEE-Einsparung nach Displacement Mix – a) unter Einbezug von Nuklearenergie im Netz; b) ohne Nuklearenergie im Netz; c) nach dem aktuellen Deutschen Strommix . . . . .	125
6.17 Systemoptimierung bezüglich PE-Einsparung für Deutschland ohne Nuklearenergie – Abhängigkeit der PE-Einsparung a) von der Wohnfläche; b) vom Dämmstandard . . .	126
7.1 Zusammenfassung der prozentualen Veränderung durch Einsatz des LowEx-Systems gegenüber einem Referenzsystem für die Flexibilität $\tau$ , den Bruttoertrag $B$ , die PE- Einsparung $Q_{P,red}$ und die CO <sub>2</sub> -Einsparung $m_{CO_2,red}$ (LEB: LowEx Basis, LES: LowEx stromgeführt) . . . . .	134

## Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften der TWE-Systeme, ergänzt nach [58]	17
2.2	Spezifische Kosten und Erlöse bei Betrieb eines Klein-BHKWs	26
2.3	PE-Faktoren und CO <sub>2</sub> -äquivalente Emissionsfaktoren, nach GEG 2020, Displacement Mix der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE-DM) am Beispiel Deutschlands ohne Nuklearenergie [87].	29
4.1	Allgemeine Kennzahlen des Feldtests – BHKW, Gas-Brennwertkessel und TES nach Datenblatt	53
4.2	Verbrauchs- und Produktionskennwerte des Feldtests von März 2019 bis inklusive Februar 2020	58
4.3	Mittelwerte der gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen nach Jahreszeit	59
4.4	Effizienz des BHKWs bezüglich Heizwert und Brennwert nach Quelle	63
4.5	Mittlerer täglicher elektrischer Energiebedarf des Wohngebäudes; aufgeteilt auf Verbraucher	65
4.6	Anteile des täglichen elektrischen Energiebedarfs der Verbraucher am Gesamtbedarf des Wohngebäudes	65
4.7	Erzwungene und verzögerte Flexibilität in Zeiten ohne Heizlast	68
5.1	Validierung der Verbraucher- und Speicherebene – Kumulierte geflossene Wassermassen und Wärmemengen für Randbedingungen und Zielgrößen der Simulation und der Messdaten ( <i>m*</i> : primärseitige Versorgung des Wärmeübertragers)	81
5.2	Übersicht der simulierten Anlagentypen	85
5.3	Unabhängige Variablen der Parametervariation – Minimal-, Maximalwerte sowie Mittelwerte $\bar{x}$ , Median $x_{50}$ , 25. Perzentil $x_{25}$ und 75. Perzentil $x_{75}$ (rf: Rücklauf, ff: Vorlauf)	96
5.4	Parameter der Stichprobe zur Analyse der Betriebscharakteristik	98
6.1	Ablaufplan der Regression – Entwicklung der Parameterzahl im statistischen Modell am Beispiel der verzögerten Flexibilität (PCA: Hauptkomponentenanalyse)	105
6.2	Globale Sensitivitätsanalyse verzögerte Flexibilität – Sensitivitäten nach Sobol-Methode mit 95 %-Konfidenzintervall <i>CI</i> des Totaleffekts	108
6.3	Globale Sensitivitätsanalyse erzwungene Flexibilität – Sensitivitäten Sobol-Methode mit 95 %-Konfidenzintervall <i>CI</i> des Totaleffekts	110
6.4	Globale Sensitivitätsanalyse Bruttoertrag – Sensitivitäten nach Sobol-Methode mit 95 %-Konfidenzintervall <i>CI</i> des Totaleffekts	111
6.5	Globale Sensitivitätsanalyse der Reduktion des PE-Verbrauchs – Sensitivitäten nach Sobol-Methode mit 95 %-Konfidenzintervall <i>CI</i> des Totaleffekts	112
6.6	Rangordnung der Parameter nach SHAP-Werten der globalen Sensitivitätsanalyse	119
6.7	Optimierte Anlagenkonfiguration – Reduziertes Parametergitter	119

6.8	Systemoptimierung bezüglich Flexibilität – Median der prozentualen Veränderungen gegenüber dem Referenzsystem . . . . .	121
6.9	Systemoptimierung bezüglich Bruttoertrag – Median der prozentualen Veränderungen gegenüber dem Referenzsystem . . . . .	123
6.10	Systemoptimierung bezüglich PE- und CEE-Einsparung – Median der prozentualen Veränderungen gegenüber dem Referenzsystem . . . . .	127
6.11	Flexibilität und Bruttoertrag bei Einsatz des Referenzsystems und der LowEx-Systeme für sechs Kombinationen aus Wohnfläche und Dämmstärke . . . . .	128
6.12	PE-Einsparung und Reduktion der CO <sub>2</sub> -Emissionen bei Einsatz des Referenzsystems und der LowEx-Systeme für sechs Kombinationen aus Wohnfläche und Dämmstärke .	128
6.13	Einfluss der wichtigsten Parameter auf die Zielgrößen (→: gering, ↗: proportional, ↘: invers proportional, ↙: unterproportional, ↕: überproportional, ↖: invers unterproportional) . . . . .	129



# Abkürzungen, Symbole und Indizes

## Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
CEE	CO <sub>2</sub> -äquivalente Emission (engl.: CO <sub>2</sub> Equivalent Emission)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEX	European Energy Exchange
EnEV	Energieeinsparverordnung
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HEX	Wärmeübertrager (engl.: heat exchanger, HEX)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LEB	LowEx Basis
LES	LowEx Strom
LEW	LowEx Winter
PE	Primärenergie
PWH	Trinkwasser warm (engl.: potable water hot)
PWH-C	Zirkulation (engl.: potable water hot – circulation)
RB	Randbedingung
Ref	Referenzsystem
SHAP	Shapley additive explanations
TES	Heizungspufferspeicher (engl.: thermal energy storage)
TWE	Trinkwassererwärmung (PWH und PWH-C)

## Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\beta$	-	Koeffizient(en) eines statistischen Modells
$\varepsilon$	-	Residuen
$\eta$	%	Effizienz, Wirkungsgrad
$\theta$	°C	Temperatur
$\lambda$	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	%	BHKW Modulation
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	-	Standardabweichung

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\tau$	h	Zeitliche Flexibilität in Stunden
$RMSE$	-	Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung
$A$	m <sup>2</sup>	Fläche
$B$	€/d	Bruttoertrag, verbrauchsgebundener Ertrag
$CI$	-	Konfidenzintervall
$C$	-	Korrelation
$c_p$	J/(kg K)	Wärmekapazität, isobar
$CV(RMSE)$	-	Variationskoeffizient des $RMSE$
$E$	Wh, kWh, J	Energie, ausgenommen thermische
$f_{CO_2}$	gCO <sub>2</sub> /kWh	CO <sub>2</sub> -Äquivalent Emissionsfaktor
$f_P$	-	Primärenergiefaktor
$H$	J	Enthalpie
$h$	m, s	Höhe, numerische Schrittweite
$K$	€/d, €/h	Kosten, Betriebskosten, Kostenfunktion
$k$	€/h/kW	spezifische Kosten
$KI$	-	Konditionsindex
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
$m_{CO_2}$	gCO <sub>2</sub> /kWh	CO <sub>2</sub> -äquivalente Emission
$MSE$	-	Mittlere quadratische Abweichung
$N$	-	Anzahl Stichproben in der Grundgesamtheit
$n$	-	Anzahl, Stichprobenindex
$NME$	-	Normalisierter mittlerer Fehler
$P$	-	Anzahl Parameter bzw. unabhängige Variablen
$\dot{Q}$	W	Thermische Leistung
$\dot{q}$	W/m <sup>2</sup>	spezifische thermische Leistung
$Q_P$	kWh	Primärenergiebedarf
$Q$	Wh, kWh, J	Thermische Energie, Wärmemenge
$R$	€/d	Erlöse
$r$	€/h/kW	spezifische Erlöse
$R^2$	-	Determinationskoeffizient, Bestimmtheitsmaß
$R^2_{adj}$	-	Determinationskoeffizient adjustiert
$r_{conf}$	-	Konfiguration der Rücklaufanschlüsse
$s$	-	Stromkennzahl
$S$	-	Sensitivität, Effekt, Verlustfunktion
$Sys$	-	Systemidentifikator
$t$	s, h	Zeit
$VBh$	h	Vollbetriebsstunden
$VIF$	-	Varianzinflationsfaktor
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen
$X$	-	Design Matrix
$x$	-	Unabhängige Variable, Parameter, Einflussgröße
$y$	-	Abhängige Variable, Zielvariable
$\hat{y}$	-	Vorhergesagte/geschätzte abhängige Variable

## Indizes

<i>GK</i>	Gas-(Brennwert)kessel
<i>H<sub>S</sub></i>	Brennwert
<i>H<sub>i</sub></i>	Heizwert
<i>Abgas</i>	Abgas
<i>CHP</i>	Blockheizkraftwerk
<i>EEGU</i>	EEG-Umlage
<i>EEX</i>	KWK-Index
<i>EStG</i>	Rückerstattung nach Energiesteuergesetz
<i>Eig</i>	Eigengenutzter Strom
<i>Esp</i>	Eingespeister Strom
<i>G</i>	Erdgas
<i>HEX</i>	Wärmeübertrager
<i>HT</i>	Hochtemperatur
<i>Insh</i>	Instandhaltung
<i>KWKG</i>	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
<i>L</i>	Verluste
<i>MS</i>	Mieterstrom
<i>NT</i>	Niedertemperatur
<i>PWH-C</i>	Zirkulation
<i>PWH</i>	Trinkwasser warm
<i>Prod</i>	Produktion
<i>TES</i>	Heizungspufferspeicher (engl.: thermal energy storage)
<i>Wfl</i>	Wohnfläche
<i>Zuk</i>	Zugekaufter Strom
<i>a</i>	auf ein Jahr bezogen
<i>dmd</i>	Verbrauch (engl.: demand)
<i>d</i>	verzögert
<i>d</i>	auf einen Tag bezogen
<i>el</i>	elektrisch
<i>ff</i>	Vorlauf (engl.: forward flow)
<i>f</i>	erzwungen
<i>i</i>	Iterationvariable, Index, innen
<i>max</i>	Maximalwert
<i>min</i>	Minimalwert, Auslegungszustand, Auslegungstemperatur
<i>nMS</i>	nicht-Mieterstrom
<i>ref</i>	Referenz
<i>rf</i>	Rücklauf (engl.: return flow)
<i>th</i>	thermisch
<i>tot</i>	total
<i>vNNEG</i>	vermiedene Netznutzungsentgelte



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Übergang zu einem modernen und nachhaltigen Energiesystem mit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen setzt einen hohen Anteil erneuerbarer Energien voraus. Der Anteil von Wind- und Solarenergie, den derzeit bedeutendsten erneuerbaren Energien, betrug 2015 in mehreren Ländern mehr als 15 % des gesamten produzierten Stroms. Im selben Jahr betrug die weltweit installierte Kapazität erneuerbarer Energien 650 GW. Dies entspricht ungefähr der doppelten Leistung aller Anlagen zur Gewinnung von Strom aus Nuklearenergie [1].

In vielen Ländern sieht die Planung vor, die installierte Kapazität weiter zu steigern und die Ausbaugeschwindigkeit zu erhöhen. In Dänemark soll der gesamte Energiebedarf aus erneuerbaren Energien gedeckt werden. In Deutschland soll deren Anteil bis zum Jahr 2050 bei 60 % liegen, während die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 um 80 % bis 95 % sinken sollen. Im Gebäudesektor soll es zu einer Reduktion des Primärenergiebedarfs um 80 % bis hin zur Klimaneutralität des gesamten Bestands kommen [2]. Das Ziel für das Jahr 2020, eine Reduktion der Emissionen um bis zu 40 %, konnte zwar bereits erreicht werden, jedoch sind zwei Drittel der Einsparungen auf die Wirtschaftskrise durch die Corona-Pandemie zurückzuführen. Ohne diese Einschränkungen lägen die gesteckten Ziele in weiter Ferne [3].

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien geht ein Anstieg des Bedarfs an Ausgleichsenergie im Übertragungsnetz einher. Die fluktuierende Produktion der erneuerbaren Energien und regionale Unterschiede der einsetzbaren Technologien stellen die Übertragungsnetzbetreiber vor große Herausforderungen. Ungenauigkeiten in der Vorhersage der Produktion führen zu Differenzen zwischen der angebotenen elektrischen Leistung und der Nachfrage [4]. Schon jetzt kommt es aufgrund einer Überproduktion von Strom aus erneuerbaren Energien regelmäßig zu negativen Strompreisen an der Strombörse. Im Jahr 2020 gab es in Deutschland 298 h mit negativen Strompreisen, 2019 waren es noch 211 h [5]. Diese Ungleichgewichte werden in den nächsten Jahren weiter zunehmen [6], [7]. Der Bedarf an flexiblen regelfähigen Kraftwerken zum Ausgleich steigt. In Quelle [8] wird berechnet, dass bereits ein Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion von 50 % eine stündliche Leistungsregelung von 11 % bis 30 % der Spitzenlast voraussetzt, um das Netz zu stabilisieren. Es wurde angenommen, dass sich der Bedarf an regelfähigen Kraftwerken in den Jahren zwischen 2010 und 2020 verdoppelt [9].

Die Folge sind höhere Energiepreise, während der Wert von erneuerbaren Energien und Grundlastkraftwerken an der Strombörse sinkt. Dieser Wertverlust kann durch mehrere Maßnahmen abgemildert oder vermieden werden, insbesondere durch eine hohe Erzeugungskapazität der Wasserkraftwerke und eine hohe Flexibilität des Energiesystems [10]. Demgegenüber wird der Wert flexibler Kraftwerke steigen. Dies setzt neue Anreize, nicht nur Großkraftwerke sondern auch die dezentrale Energieerzeugung in Gebäudeenergiesystemen zu flexibilisieren [11]–[13].

Derzeit wird Flexibilität zum Großteil durch große zentrale Kraftwerke bereitgestellt, die im Teillastbetrieb oder Leerlauf sind. Dies führt zu hohen Kosten, geringen Effizienzen und hohen Emissionen. Der Einsatz virtueller Kraftwerke, bestehend aus kleiner dezentraler Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Gebäudeenergiesystemen, könnte diese Flexibilität bereitstellen und zu einer um 10 % bis 20 % effizienteren Energienutzung sowie zu reduzierten Kosten und Emissionen führen. Weiterhin könnten die benötigte Ausgleichsenergie im Verteilungsnetz um 73 % und die damit verbundenen Kosten um 38 % reduziert werden [13], [14].

Der Einsatz dezentraler KWK, in der Regel in der Form kleiner Blockheizkraftwerke (BHKW), kann nicht nur eine Flexibilisierung und Kostenreduktion des nationalen Energiesystems bewirken. Auch für den Anwender sind Vorteile zu verzeichnen. Einsparungen der Energiekosten von bis zu 40 % sind möglich, wenn das BHKW über ausreichend Flexibilität verfügt, um dem Wärme- und Strombedarf in einem optimalen Fahrplan zu folgen. Zusätzliche 14 % Einsparung können mittels Demand Side Management erreicht werden [13]. Wird die Regelstrategie von BHKWs mit Gasmotor optimiert, können weitere 7 % der Kosten eingespart werden. Es wird angenommen, dass die Einsparungen mit einem zunehmendem Ausgleichsenergiebedarf im Versorgungsnetz weiter steigen [15].

BHKWs sind sehr effiziente Anlagen zur Energieumwandlung. Gesamtwirkungsgrade von über 80 % [16], [17] übersteigen die der konventionellen zentralen Erzeugung, welche bei modernen Gas-und-Dampf-Kraftwerken bei 57 % bis 63 % liegen können [17], [18]. Aktuelle Veröffentlichungen und Datenblätter geben an, dass Wirkungsgrade von bis zu 90 % möglich sind [19]. Weitere Vorteile dezentraler BHKWs sind verminderte Übertragungsverluste und Investitionsrisiken, eine Brennstoffdiversifizierung sowie eine höhere Ausfallsicherheit und Energiequalität [13].

Mehrere Länder, darunter Dänemark und Deutschland, haben Subventionen wie Einspeisevergütungen und Anreize für flexible Kraftwerke umgesetzt, um die Integration von BHKWs in Gebäudeenergiesystemen zu fördern. Auch das zunehmende ökologische und insbesondere ökonomische Bewusstsein der Betreiber von Gebäudeenergiesystemen führt zu einem wachsenden Markt für den Einsatz flexibler KWK. Darüber hinaus bieten Gebäudeenergiesysteme optimale Bedingungen, um ein flexibles BHKW umzusetzen und zu nutzen. Ein großer Teil des Energieverbrauchs in Gebäuden kann zeitlich verschoben werden [20]. Lastschwankungen der Trinkwassererwärmung (TWE) sind kaum saisonal beeinflusst und unterliegen gut vorhersagbaren täglich wiederkehrenden Mustern. Wärmespeicher (engl.: thermal energy storage, TES) zur Lastverschiebung sind in Form von Trinkwasserspeichern schon seit mehreren Jahrzehnten gängiger Bestandteil der Anlagentechnik. Dennoch wird das Flexibilisierungspotential von Gebäudeenergiesystemen durch Optimierung der Anlagentechnik bis heute nicht oder nur kaum genutzt, da der Einsatz neuer Anlagentechnik häufig als zu kompliziert oder aus wirtschaftlicher Sicht als nicht lohnenswert angesehen wird. BHKWs werden in der Regel wärmegeführt betrieben. Strom wird als Nebenprodukt betrachtet. Erst in den letzten Jahren wurden zunehmend Anstrengungen unternommen, Gebäudeenergiesysteme auf Seiten der Anlagentechnik zu optimieren [20].

Der Stand der Anlagentechnik, welcher in der Wohnungswirtschaft zum Einsatz kommt, hat sich in den letzten Jahrzehnten trotz neuer Möglichkeiten durch den großflächigen Einsatz digitaler Mess- und Regelungstechnik kaum verändert. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der TWE-Anlagentechnik auf Gebäudeenergiesysteme seit Einführung des Energieeinsparungsgesetzes kontinuierlich gestiegen. Lag der Anteil der TWE am gesamten Wärmebedarf vor einigen Jahren noch bei weniger als 20 %, so beträgt er heute bei Gebäude, die nach Energieeinsparverordnung (EnEV) 2016 oder Gebäudeenergiegesetz (GEG) gedämmt sind, in der Regel über 60 %. Die Vorteile flexibler BHKWs können daher ohne eine Erneuerung der TWE-Anlagentechnik nicht oder nur vermindert genutzt werden. Dies zeigt die

Notwendigkeit auf, die TWE-Anlagentechnik bei der energetischen und wirtschaftlichen Optimierung des Gebäudebestands einzubeziehen.

Es ist erforderlich, den Einfluss der Anlagentechnik auf den Betrieb von Wärmeerzeugern zu untersuchen. Vor- und Nachteile durch Einsatz moderner niedrigexergetischer Systeme, sogenannter LowEx-Systeme, müssen herausgearbeitet und sowohl qualitativ als auch quantitativ bewertet werden. Dies soll in dieser Dissertation einerseits anhand eines Feldtests in der Wohnungswirtschaft geschehen, andererseits anhand einer auf Simulationen basierenden statistischen Modellierung.

## 1.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, welches Potential eine technische Optimierung der Anlagentechnik von Gebäudeenergiesystemen für die Flexibilisierung dezentraler BHKWs bietet.

Dazu wird eine im Rahmen der Forschungsprojekte LowEx-Fernwärme-Systeme und HochEff-TWE [21], [22] entwickelte und für verschiedene Wärmequellen optimierte TWE-Anlagentechnik in einem Feldtest eingesetzt. Der Feldtest in einem Münchner Mehrfamilienhaus mit 46 Wohneinheiten nutzt ein BHKW mit einem großen TES. Vorrangiges Ziel des Feldtests ist es, die Machbarkeit eines effizienten und flexiblen Gebäudeenergiesystems aufzuzeigen.

Der Ergebnistransfer von der Einzelanlage auf eine große Bandbreite an Randbedingungen, wie der Gebäudegröße und den Dämmstandard, wird anhand einer Simulation mit Parametervariation erreicht. Dazu wird ein auf die besonderen Anforderungen von TWE-Anlagen abgestimmtes Simulationsprogramm entwickelt. Dieses wird anschließend anhand der Labormessdaten aus den Forschungsprojekten sowie anhand der Messdaten aus dem Feldtest nach den Richtlinien ANSI/BPI-2400-S-2015 validiert. Die Ergebnisse der Simulationen werden verwendet, um statistische Modelle für die Beschreibung der Flexibilität, des Bruttoertrags, des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Gebäudeenergiesystemen mit flexiblen BHKWs zu berechnen. Anhand des statistischen Modells werden die wichtigsten Einflussgrößen identifiziert und die Sensitivitäten der einzelnen Zielvariablen untersucht.

Damit ergeben sich die folgenden im Laufe dieser Arbeit zu beantwortenden Forschungsfragen:

**Kernfrage** – Wie können die Flexibilität und Effizienz von dezentralen KWK-Anlagen in Mehrfamilienhäusern mittels LowEx-Trinkwassererwärmung und Speichermanagement signifikant gesteigert werden?

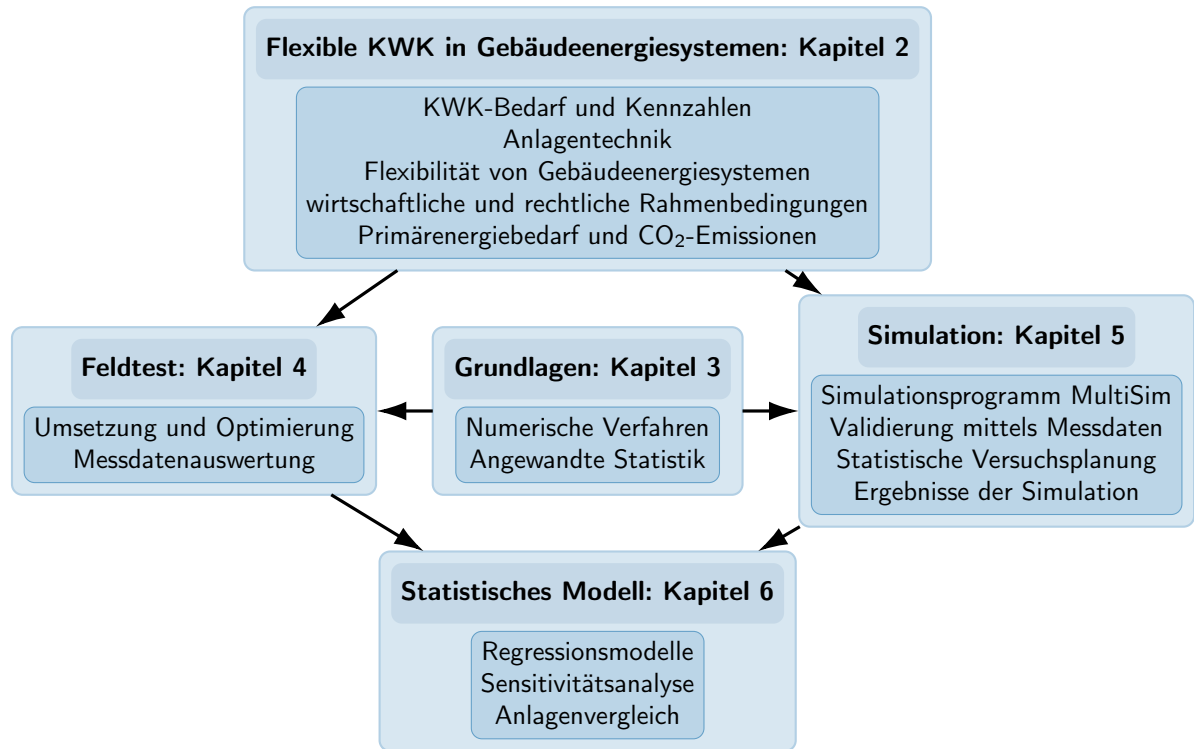
**Nebenfrage 1** – Welche Ergebnisse und Herausforderungen zeigen sich bezüglich der Flexibilität und Effizienz bei der Umsetzung einer LowEx-Trinkwassererwärmungsanlage in einem Feldtest?

**Nebenfrage 2** – Wie kann eine modulare thermische Anlagensimulation für Trinkwassererwärmungsanlagen programmiert und für den Ergebnistransfer genutzt werden? Wie ist eine Validierung der Simulation eines Trinkwassererwärmungssystems mit den Messdaten aus dem Feldtest sowie Labormessdaten nach den Richtlinien ANSI/BPI-2400-S-2015 möglich?

**Nebenfrage 3** – Bezüglich welcher Parameter zeigt die Flexibilität die höchsten Sensitivitäten? Welchen Einfluss hat eine stromgeführte KWK-Betriebsweise auf den Bruttoertrag, den Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gebäudeenergiesystems? Kann eine stromgeführte Betriebsweise trotz höherer Betriebskosten vorteilhaft sein?

## 1.3 Methodik und Aufbau

Der Aufbau der Arbeit mit den wichtigsten Inhalten der einzelnen Kapitel ist in Abb. 1.1 dargestellt.



**Abbildung 1.1:** Ablaufplan der vorliegenden Arbeit

In Kapitel 2 wird der allgemeine Bedarf an KWK in Gebäudeenergiesystemen behandelt sowie gängige Kennzahlen zur Beschreibung der KWK erarbeitet. Die Grundlagen der TWE-Anlagentechnik von Gebäudeenergiesystemen werden erläutert. Unterschiede zwischen Standardsystemen und einer modernen LowEx-TWE werden zusammengefasst. Anhand einer Literaturrecherche wird aufgezeigt, welche positiven Einflüsse auf das Energienetz dem Einsatz der KWK zugeschrieben werden. Der Fokus liegt hier insbesondere auf den mittels flexibler KWK erreichbaren Ausgleicheffekten, um neuen Herausforderungen, wie der fluktuierenden Einspeisung erneuerbarer Energien, zu begegnen. Weiterhin wird auf die wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen des Betriebs kleiner KWK sowie den Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines solchen Systems eingegangen.

Die allgemeinen theoretischen und methodischen Grundlagen numerischer Verfahren und angewandter Statistik werden in Kapitel 3 in einem kurzen Abriss erläutert.

Der Feldtest, in welchem überprüft wird, ob mittels Niedrigexergie-Technologie hochflexible und -effiziente KWK bereitgestellt werden kann, wird in Kapitel 4 vorgestellt. Das Konzept und die erfolgte Umsetzung des Feldtests wird erläutert. Es folgt eine kurze Messdatenauswertung mit Schwerpunkt auf Effizienz und Flexibilität.



Die gesammelten Messdaten werden weiterverarbeitet und zur Validierung eines eigens entwickelten numerischen Simulationsprogramms genutzt. Hierauf wird in Kapitel 5 eingegangen. Um einen Ergebnistransfer der Erfahrungen des Feldtests auf eine große Bandbreite an Randbedingungen zu ermöglichen, wird anschließend eine Vielzahl an Anlagen simuliert. Auch die Anlagentechnologie wird variiert, um den Effekt der Niedrigexergie-Technologie gegenüber einer dem Stand der Technik entsprechenden Anlage darstellen zu können. Dieses Computer-Experiment wird anhand statistischer Versuchsplanung ausgelegt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Parametervariationen der Simulationen und die im Feldtest gesammelten Erkenntnisse genutzt, um statistische Modelle zur Beschreibung der Flexibilität, des Bruttoertrags, des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu berechnen. Anschließend werden globale und lokale Sensitivitätsanalysen der Modelle durchgeführt, um die wichtigsten Einflussfaktoren zu identifizieren. Es folgt ein Vergleich der Niedrigexergie-Technologie mit einer Standardanlage bezüglich der erzielbaren Verbesserungen.

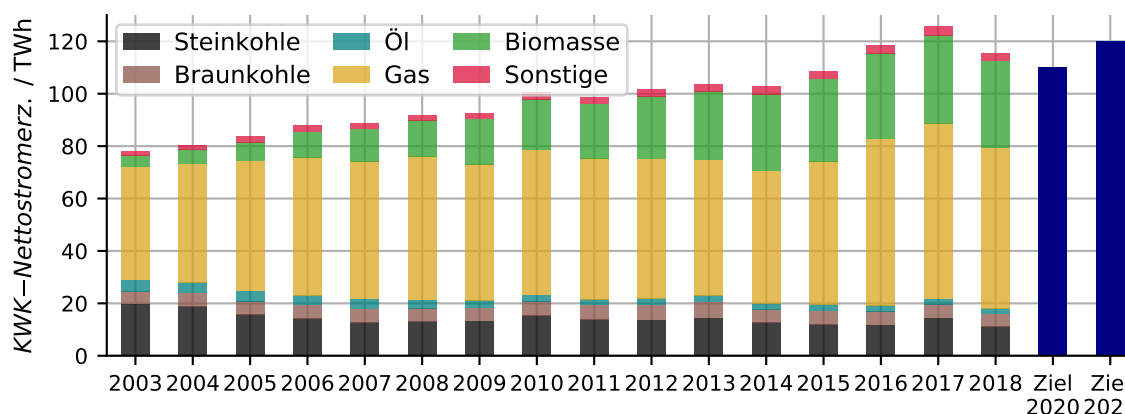
Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 7 zusammengefasst. Es folgt eine Einordnung in den aktuellen Kontext mit Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten und Hindernisse.



## 2 Flexible Kraft-Wärme-Kopplung in Gebäudeenergiesystemen

KWK bezeichnet die Nutzung einer Wärmekraftmaschine, um einen Kraftstoff in thermische und mechanische Energie umzusetzen. Die mechanische Energie wird in der Regel in elektrische Energie umgewandelt. Die bei der Bereitstellung der mechanischen Energie auftretenden Wärmeverluste werden genutzt. Dadurch können Gesamtwirkungsgrade von bis zu 100 % bezüglich des Heizwertes erreicht werden. Im Vergleich zur getrennten zentralen Erzeugung von Strom und Wärme kann die Effizienz um etwa 20 % gesteigert werden. Durch den Einsatz dezentraler KWK können zusätzlich auch Übertragungsverluste reduziert werden. Der Vorteil gegenüber dem Nettowirkungsgrad der zentralen Erzeugung steigt weiter [23]–[25].

Die Strom- und Wärmebereitstellung aus KWK-Anlagen hat in Deutschland in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen. Das im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) vorgegebene Ausbauziel von 110 TWh für das Jahr 2020 konnte bereits 2016 überschritten werden. Der Zielwert von 120 TWh für das Jahr 2025 wurde, vor der Verbesserung der Bilanzierungsmethoden, bereits 2017 erreicht. Der KWK-Anteil an der gesamten Nettostromerzeugung in Deutschland lag 2018 bei ca. 19 % [25], [26].



**Abbildung 2.1:** Nettostromerzeugung durch KWK von 2003 bis 2025 nach Energieträger, nach [25], [27]

Zwischen 2009 und 2018 wurden in Deutschland 52.606 KWK-Anlagen zugelassen. In Energiesystemen von Mehrfamilienhäusern ist insbesondere der Leistungsbereich von  $10 \text{ kW}_{el}$  bis  $50 \text{ kW}_{el}$  von großer Relevanz. KWK-Anlagen dieser Leistungsklasse werden häufig auch als Klein- oder Mini-BHKW bezeichnet. 28 % der 2019 zugelassenen KWK-Anlagen waren Klein-BHKW, entsprechend 7,7 % der gesamten zugelassenen Leistung beziehungsweise 64 % der zugelassenen KWK-Anlagen mit einer Leistung unter  $100 \text{ MW}_{el}$  [28]. Die Technik der Bereitstellung von Wärme- und Strom kann

dabei in fünf Kategorien unterteilt werden: Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen, Dampfturbinen, Gasturbinen und GuD-Kraftwerke. Sonstige Techniken wie Stirling-Motoren haben keine relevante Marktdurchdringung. Verbrennungsmotoren weisen mit einem Gesamtwirkungsgrad von bis 100 % die höchste Effizienz auf. Weiterhin sind 96,94 % der zugelassenen Anlagen Verbrennungsmotoren. Da diese vorrangig in kleineren Modulen angeboten werden, machen sie nur 34,9 % der zugelassenen elektrischen Leistung aus. Die restlichen 65 % werden durch meist zentrale Dampfturbinen, Gasturbinen und GuD-Kraftwerke bereitgestellt, obwohl nur 0,9 % der zugelassenen Anlagen in diese Kategorien fallen [24], [25].

KWK-Anlagen zählen zu den gut regelbaren Energieerzeugern. Zusammen mit dem hohen Wirkungsgrad stellen sie einen wichtigen Stützpfeiler bei der Integration fluktuierender erneuerbarer Energien dar. Energie aus KWK sollte jedoch nicht zur Verdrängung erneuerbarer Energien führen. Dies ist heute jedoch teilweise der Fall [24], [27]. Neue Regulierungen wie der Redispatch 2.0 ab Oktober 2021 sollen hier Abhilfe schaffen und die Systemdienlichkeit der KWK steigern. Künftig müssen KWK-Anlagen ab 100 kW<sub>el</sub> auf die Anforderungen des Netzes reagieren und erneuerbaren Energien Vorrang gewähren. Eine hohe Planbarkeit und Flexibilität der KWK-Anlagen wird notwendig.

## 2.1 Bedarf an flexibler Kraft-Wärme-Kopplung in Gebäudeenergiesystemen

Die formellen KWK-Ausbauziele zielen auf eine Diversifikation, Modernisierung, Stabilisierung und Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes des Energienetzes ab [24], [25].

Insbesondere mit zunehmendem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien wie Solar- oder Windenergie im Netz steigt der Bedarf an Ausgleichsleistung. Diese wird aktuell vorrangig durch große Kraftwerke bereitgestellt. Das träge Regelverhalten dieser Kraftwerke führt jedoch dazu, dass bei steigender Netzfrequenz auch eine Trennung erneuerbarer Energien vom Netz notwendig werden kann [29], [30]. Bei sinkender Netzfrequenz müssen hingegen teure Spitzenlastkraftwerke vorgehalten und in Anspruch genommen werden. Dies hat einen Wertverlust der aus erneuerbaren Quellen gewonnenen Energien zur Folge, welcher insbesondere ab einem Anteil erneuerbarer Energien von 30 % und mit einem hohen PV-Anteil steigt [8], [31]. Flexible Anlagen können diesen Wertverlust abschwächen. Der Wert der erneuerbaren Energien steigt gegenüber einem Energiesystem ohne Ausbau der Flexibilität um 17 % bis 31 % [11], [12], [32].

Aufgrund der guten Regelbarkeit der meisten KWK-Techniken könnte ein größerer Teil der Flexibilität durch KWK-Anlagen bereitgestellt werden. Kosten zum Ausgleich schwankender Einspeisung könnten im Vergleich zu zentralen Kraftwerken gesenkt werden. Am Beispiel der Niederlande ist eine Reduktion dieser Kosten um bis zu 38 % möglich, wenn dezentrale Klein-KWK eingesetzt wird [14]. Eine weitere Studie unterstützt den Bedarf an flexiblen Kraftwerken. Es kann gezeigt werden, dass der Spitzenlastbedarf flexibler Kraftwerke in Deutschland nur um 4 % zurückgeht, wenn ein Anteil erneuerbarer Energien von 80 % erreicht wird, während die mittlere Leistung um 59 % sinkt [33]. Dezentrale flexible BHKWs sind zur Bereitstellung eines solchen Lastprofils gut geeignet. Das gleiche Szenario wird in [34] untersucht. Bei einem Anstieg erneuerbarer Energien im Netz von 40 % auf 80 % steigen die Kosten für das Energiesystem um 12 %. Demand Response kann diese Kosten um 2 % bis 3 % senken, während Batteriespeicher aufgrund hoher Kosten eine Steigerung von 0,1 % bis 3 % bewirken.

Die Bereitstellung einer Regelbarkeit von KWK-Anlagen setzt eine ausreichende Lastverschiebungskapazität voraus. Hierzu werden thermische Speicher benötigt [35]. Dadurch kann die Anzahl an großen „must-run“ KWK-Anlagen reduziert werden. Auch diese Auswirkungen auf den Wert der erneuerbaren Energien sind positiv [10].

Der Einsatz dezentraler Mini-KWK kann weiterhin zu einer um 10 % bis 20 % effizienteren Energienutzung, reduzierten CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie niedrigeren Energiekosten in Haushalten führen [36]. Insbesondere in Gebäudeenergiesystemen können BHKWs bis zu 25 % PE und 40 % CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen [37]. Um diese Einsparungen in vollem Umfang bereitstellen zu können, müssen die KWK-Anlagen flexibel betrieben werden können. In der Folge können die Stromkosten von Haushalten um ungefähr 40 % gegenüber einem konventionellem Netzbezug gesenkt werden. Weitere 14 % Kostensenkung können mittels Demand Response des BHKWs erreicht werden. Weitere positive Auswirkungen des Einsatzes dezentraler Klein-BHKWs sind eine Kraftstoff- und Kraftanlagen-Diversifikation mit positiven Auswirkungen auf die Sicherheit und Verlässlichkeit des Netzes [13]. In Belgien könnte der Ersatz zentraler GuD-Kraftwerke mit einer Leistung von 400 MW<sub>el</sub> durch dezentrale Klein-BHKWs ohne Speicher zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 88 kt führen. Schon ein kleiner Speicher würde diese Einsparung auf 215 kt steigern [38].

Aus diesen Gründen wird die Flexibilität von dezentralen BHKWs in Dänemark schon seit mehreren Jahren durch tageszeitabhängige Einspeisetarife gefördert. Die Attraktivität für BHKWs steigt hier mit der Peak-Höhe der täglichen Strompreise. In der Folge betrug die installierte BHKW-Leistung bereits im Jahr 2009 20 MW<sub>el</sub> [39].

Die Bereitstellung von Flexibilität erfordert, dass der Abnehmer Flexibilität verwerten kann. Dies ist bei Gebäudeenergiesystemen der Fall. Ein großer Teil des Energieverbrauchs kann zeitlich verschoben werden. Dadurch entstehen jedoch auch zusätzliche Kosten und Effizienzverluste [20], [40]. Aufgrund seit langer Zeit in Gebäuden vorhandener Trinkwasserspeicher gehören Gebäude zu den ältesten und am weitesten verbreiteten Flexibilitätsoptionen. Dennoch wird die Flexibilität von Gebäudeenergiesystemen bis heute kaum genutzt, da eine Nutzung häufig als zu kompliziert wahrgenommen wird.

All dies zeigt, dass der Bedarf an flexiblen dezentralen KWK-Anlagen groß ist, wenn ein reibungsloser Übergang zu einem modernen Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien stattfinden soll. Zum aktuellen Zeitpunkt werden dezentrale Klein-BHKWs in Gebäudeenergiesystemen jedoch nahezu ausschließlich wärmegeführt betrieben. Flexibilität ist kaum vorhanden. Bereits 2007 wurde analysiert, dass der wärmegeführte Betrieb zwar die am einfachsten umzusetzende Betriebsstrategie ist, jedoch keine Systemdienlichkeit und nur ein geringes Energieeinsparpotential bietet. Wird eine stromgeführte Betriebsweise implementiert, können allein hierdurch bis zu 7 % des Energieverbrauchs eingespart werden [15].

Um eine technische Nutzung der Flexibilität dezentraler KWK-Anlagen zu ermöglichen, muss das Gebäudeenergiesystem in der Lage sein, diese bereitzustellen. Hierfür ist die Anlagentechnik des Gebäudeenergiesystems entscheidend. Auf diese soll im Folgenden mit Fokus auf die Trinkwassererwärmung eingegangen werden.

## 2.2 Anlagentechnik von Gebäudeenergiesystemen – LowEx-Trinkwassererwärmung

Gebäudeenergiesysteme mit Trinkwassererwärmung (TWE) wurden in der Vergangenheit vielfältig untersucht. Unter anderem wurde das Potential von Gebäuden mit TWE-Anlagen zur Bereitstellung von Regelenergie mittels Laststeuerung (engl.: demand response) für das Deutsche Stromnetz betrachtet [41]. Auch am Beispiel Finnlands wurde untersucht, inwieweit elektrisch beheizte TWE-Anlagen zur Laststeuerung beitragen können [42]. Im Bereich der Einfamilienhäuser wurden vergleichbare Untersuchungen mittels der Simulation von Wärmepumpen durchgeführt [43]. Der Einfluss von Smart Applications, das heißt intelligent gesteuerten Abnehmern wie TWE-Anlagen, auf die Laststeuerung belgischer Haushalte wurde in [44] analysiert. Neuere Untersuchungen betreffen die zur Einhaltung hygienischer Betriebsbedingungen notwendigen Randbedingungen [45].

Die Anlagentechnik selbst betreffend, das heißt die technische-thermodynamische Optimierung des Aufbaus einer TWE-Anlage, kann jedoch keine Literatur gefunden werden. Dafür ursächlich ist, dass der Bereich der TWE-Anlagen noch nicht endgültig in der Forschungsgemeinschaft angekommen ist, da die TWE erst seit Einführung neuer Gebäudestandards einen relevanten Einfluss auf Gebäudeenergiesysteme hat. Darüber hinaus wird von einem großen Teil der in der Gebäudetechnik arbeitenden Ingenieure angenommen, dass die TWE „nicht optimierbar“ sei und gezwungenermaßen einen negativen Einfluss auf jegliche Energiesysteme habe. Eine Optimierung der Anlagentechnik steht daher nicht im Fokus der Gebäudetechnik. Zu guter Letzt wird in der Gebäudetechnik vergleichsweise wenig veröffentlicht. Literatur zur Anlagentechnik, insbesondere Messwerte zu erzielbaren Rücklauftemperaturen und Effizienzen, kann daher nur in Vorarbeiten der eigenen Forschungsgruppe gefunden werden [21], [22], [46]–[49].

### 2.2.1 Kategorisierung von TWE-Anlagen

TWE-Anlagen werden in dezentrale und zentrale Systeme unterteilt. Bei zentralen Systemen wird das Trinkwasser an einem zentralen Ort aufgeheizt und über Rohre zu Abnehmern transportiert. Bei dezentralen Systemen erfolgt die Erwärmung direkt bei den Verbrauchern. Dezentrale Systeme sind heutzutage in der Regel Durchflusssysteme oder kleine Speichersysteme. Bei zentralen Systemen sind hingegen Speicher- und Speicherladesysteme am weitesten verbreitet. Bei Mehrfamilienhäusern haben vorrangig zentrale geschlossene Anlage eine Bedeutung. Abb. 2.2 zeigt die Einteilung der TWE-Systeme in die unterschiedlichen Systeme.

TWE-Anlagen erwärmen das kalte Trinkwasser von ca. 9 °C bis 14 °C auf die gewünschte Temperatur für warmes Trinkwasser (engl.: potable water hot, PWH). Diese liegt in Großanlagen in der Regel bei, aus hygienischen Gründen vorgegebenen,  $\geq 60$  °C. Darüber herrscht Verbrühungsgefahr, unter 45 °C wird das Wachstum von Legionellen begünstigt.

Zwischen den Entnahmen könnte das Wasser in den Rohrleitungen auskühlen. Lange Wartezeiten bis zum Erreichen der Warmwassertemperatur und Legionellenwachstum wären die Folge. Um dies zu vermeiden, wird das Trinkwasser in der Zirkulation (engl.: potable water hot - circulation, PWH-C) konstant nachgeheizt. Das vom Gebäude zur TWE-Anlage zurückkommende Trinkwasser darf dabei maximal 5 K kälter sein, als das ins Gebäude eintretende PWH. Dies hat zur Folge, dass für die PWH-C-Nachheizung bei Gebäuden mit ungünstigem Formfaktor und schlechtem Dämmstandard im

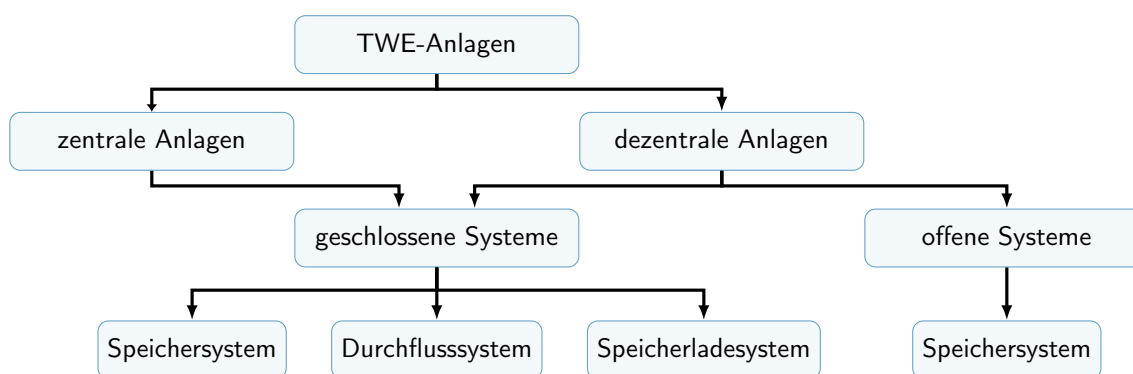


Abbildung 2.2: Kategorien der TWE-Systeme, nach [50]

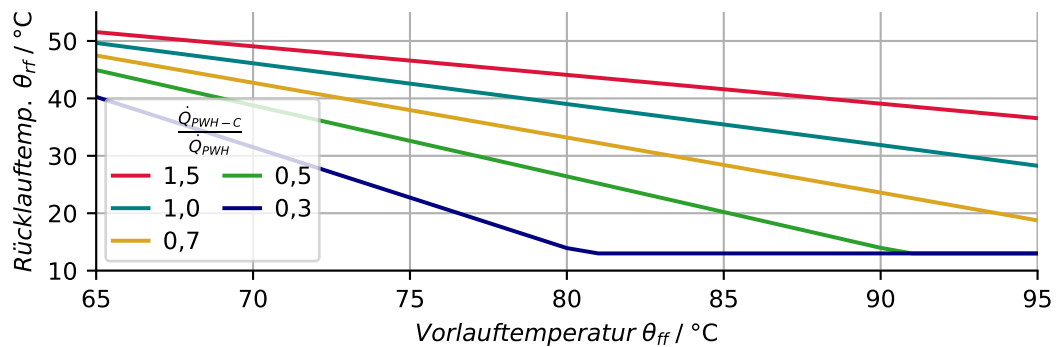
Jahresmittel mehr Wärme benötigt wird, als für die ausschließlich entnahmebedingte PWH-Erwärmung. Bei modernen nach EnEV 2009 und neuer gedämmten Gebäuden liegt das Verhältnis von PWH-C zu PWH bei  $\dot{Q}_{PWH-C}/\dot{Q}_{PWH} \leq 0,7$ . Weiterhin ist die PWH-C-Nachheizung in der Regel im Tagesverlauf konstant und zeigt eine nur minimale und vernachlässigbare saisonale Abhängigkeit. Die Bezeichnung TWE fasst somit die PWH-Erwärmung für Entnahmen und die PWH-C-Nachheizung für den Ausgleich von Verlusten in Summe zusammen.

### 2.2.2 Kriterien zur Bewertung von TWE-Anlagen

Die Bewertung von TWE-Anlagen kann beispielsweise anhand technischer Daten wie Rücklauftemperaturen, Lastverschiebungskapazitäten oder dem Platzbedarf oder auch anhand wirtschaftlicher Kriterien, wie kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten, erfolgen. Eine große Rolle spielen in der Gebäudetechnik häufig auch „verdeckte“ und nicht anhand von Fakten belegbare Kriterien, wie die Erfahrung der Gebäudetechniker und Planer mit vergleichbaren Systemen. Hier steht die technisch-thermodynamische Bewertung anhand der Rücklauftemperaturen und der Lastverschiebung im Vordergrund.

**Rücklauftemperatur** Die exergetische Qualität einer TWE-Anlage kann am einfachsten Anhand der Rücklauftemperatur des Heizwassers zur Wärmequelle bewertet werden. Je niedriger diese im Vergleich zur unter gegebenen Randbedingungen minimal erreichbaren Rücklauftemperatur ist, desto besser kann eine TWE-Anlage die im Heizwasser enthaltene Exergie nutzen. Die dafür relevanten Randbedingungen sind die Vorlauftemperatur der Wärmequelle und der mittlere Wärmebedarf der PWH-Erwärmung sowie der PWH-C-Nachheizung. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.3 für verschiedene Verhältnisse der Wärmebedarfe von PWH und PWH-C dargestellt. Eine detaillierte Erläuterung ist in [51] zu finden. Ein Verhältnis von 0,3 entspricht in etwa einem Passivhaus, ein Neubau liegt zwischen 0,5 und 0,7, ein Altbau über 1. Je geringer die Differenz zwischen der minimalen und der tatsächlichen Rücklauftemperatur ist, desto höher ist die Anlagenqualität. Aufgrund von Wärmeverluste, endlichen thermischen Längen der Wärmeübertrager etc. kann die Differenz in der Realität jedoch nie null werden.

Eine hohe exergetische Qualität und somit niedrige Rücklauftemperatur der Anlage hat einen positiven Einfluss auf eine Vielzahl an Größen, unter anderem:



**Abbildung 2.3:** Minimale Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur und vom Verhältnis des täglichen Wärmebedarfs für Warmwasser und Zirkulation, nach [51]

- Steigerung der Effizienz von Wärmeerzeugern
- Steigerung der Wärmekapazitäten und Wärmetransportkapazität
- Steigerung der Wärmeauskopplung bei Solar- oder Geothermie bei gleicher Schüttung
- kleinere Dimensionen von Komponenten, Kostenreduktion, verringerter Hilfsenergieaufwand und Wärmeverluste

**Lastglättung/Lastverschiebung** Die Kapazitäten zur Lastglättung und Lastverschiebung eines Energiesystems sind vorrangig von der Speicherkapazität abhängig. Für die Verschiebung von Wärmelasten ist dies die in einem TES speicherbare Wärme nach Gleichung (2.8). Demnach sind das Volumen des TES sowie die Temperaturdifferenz entscheidend für die speicherbare Wärme. Die Temperaturdifferenz wird durch die Vorlauftemperatur der Wärmequelle und die Rücklauftemperatur der Anlage bestimmt, das heißt die Rücklauftemperatur ist ein Qualitätsmerkmal für das erreichbare Ausmaß der Lastverschiebung.

Eine hohe Lastglättung bewirkt, dass Schwankungen des Wärmebedarfs nicht oder nur vermindert an den Wärmeerzeuger weitergegeben werden. Die naturgemäß großen stündlichen Schwankungen unterliegende PWH hätte ohne Lastglättung häufiges Schalten und häufige Laständerungen der Wärmequelle zur Folge. Die Folgen wären eine verminderte Effizienz, hohe Transportverluste und eine geringe Systemdienlichkeit von KWK-Anlagen.

### 2.2.3 Standardsysteme

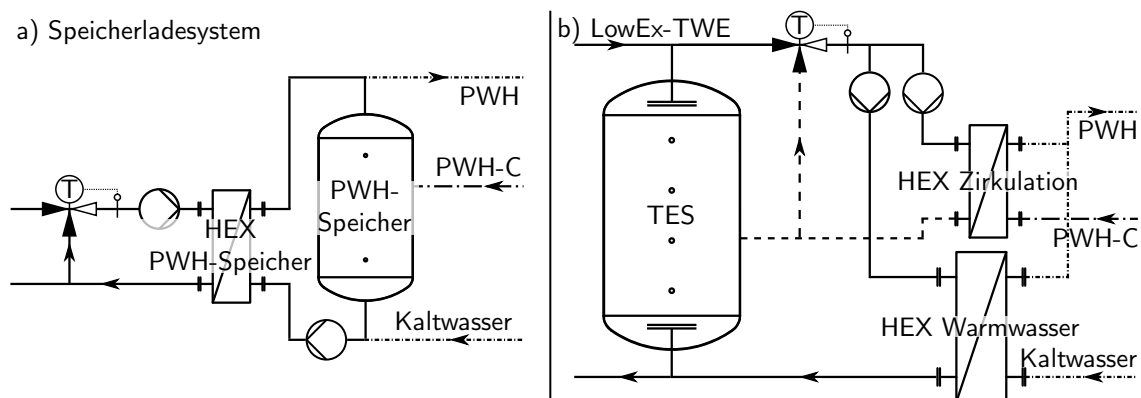
Zu den Standardsystemen der TWE zählen im deutschsprachigen Raum das Speichersystem und das Speicherladesystem, eine Weiterentwicklung des Speichersystems. Weniger verbreitet sind Durchflusssysteme und dezentrale Systeme. Hier wird auf das Speicherladesystem detailliert eingegangen. Informationen und Messdaten zu den weiteren Systemen sind in [22], [51] zu finden.

#### 2.2.3.1 Speicherladesystem

Das Speicherladesystem ist eine Weiterentwicklung des Speichersystems. Das grundlegende Funktionsschema ist in Abb. 2.4 a) abgebildet. Es besteht aus einem PWH-Speicher, welcher über einen



Wärmeübertrager (engl.: heat exchanger, HEX) aus einer Wärmequelle beladen wird. PWH und PWH-C werden am oberen Ende des PWH-Speichers entnommen. Der Rücklauf der PWH-C wird im oberen Bereich des Speichers eingespeist, in der Regel nach ca. einem Drittel des Volumens. Kaltwasser wird dem Speicher unten zugeführt. Da keine gezielte Entnahme des PWH-C-Rücklaufs erfolgt, werden warmes Wasser, der Rücklauf der PWH-C und Kaltwasser im Laufe der Betriebszeit vermischt. Exergie geht verloren, die Rücklauftemperatur zum Wärmeübertrager und damit zur Wärmequelle steigt an. Mit einem auf einem Laborprüfstand optimal abgestimmten System konnte eine Rücklauftemperatur von 49 °C erreicht werden. Im realen Betrieb sind Werte von 55 °C und höher zu erwarten [22].



**Abbildung 2.4:** Reduzierte Funktionsschemata – a) Speicherladesystem; b) LowEx-TWE

PWH-Speicher müssen besondere Anforderungen an die Hygiene erfüllen. Es werden teure Speicher aus Edelstahl oder emaillierte Speicher benötigt. Eine beliebige Skalierung zur Bereitstellung von Lastglättung oder Flexibilität ist daher kostenintensiv. Weiterhin ist die höchste Temperatur im Speicher zum Schutz vor Verbrühungen begrenzt. Auch eine Einbindung der Heizung ist aus Gründen der Trinkwasserhygiene nicht möglich. In der Regel wird dem Speicherladesystem daher in modernen Gebäudeenergiesystemen ein TES vorgeschaltet. Dies ermöglicht dem Wärmeerzeuger entweder einen konstanten und effizienten Betrieb oder auch die Bereitstellung von Flexibilität. Ein solches System wird in Abschnitt 5.3.1 betrachtet. Das Vorschalten eines TES ist mit einem zusätzlichen Platzbedarf, Aufwand für Verrohrung, Steuerung und Regelung sowie den damit einhergehenden Kosten verbunden.

Aufgrund der Einfachheit des Grundsystems ohne TES hat sich das Speicherladesystem in der Wohnungswirtschaft etabliert. In modernen Gebäudeenergiesystemen stellt es den aktuellen Stand der Technik dar [51].

### 2.2.3.2 Speichersystem und Durchflusssystem

Ein weiteres System ist das Speichersystem. Speichersysteme haben eine sehr weite Verbreitung. Sie zeichnen sich durch einen sehr einfachen Aufbau aus. Insbesondere in Ländern außerhalb Zentraleuropas ist anzunehmen, dass diese die am weitesten verbreiteten Systeme zur Warmwasserbereitung sind. Im Gegensatz zu Speicherladesystemen ist der Wärmeübertrager zur Beladung des PWH-Speichers im Speicher als Rohrwärmeübertrager integriert. Dadurch kann auf den zweiten geregelten Pumpenkreislauf verzichtet werden. Die Komplexität des Systems ist sehr gering. Im Gegenzug sinkt die thermische

Qualität des Systems. Der Wärmeübertrag durch freie Konvektion ruft starke Durchmischungen im Speicher hervor. Die Rücklauftemperatur ist in der Folge sehr hoch. Typische Werte liegen bei über 60 °C. Die Speicherkapazität ist hingegen sehr gering. Häufiges Nachladen ist notwendig. Eine Lastglättung oder Flexibilität kann nicht bereitgestellt werden [22].

Auch Durchflusssysteme mit einer direkten Trinkwassererwärmung über Wärmeübertrager ohne Speicher wurden in der Vergangenheit gebaut. Lastspitzen können nicht gedämpft werden und werden direkt an die Wärmequelle weitergegeben. Aufgrund dessen sind direkte Durchflusssysteme heutzutage kaum noch anzutreffen [52].

Die indirekte Ausführung von zentralen Durchflusssystemen mit Speicher, in Form sogenannter Frischwasserstationen, findet hingegen zunehmend Verbreitung. Zu dieser Kategorie zählt das in Abschnitt 2.2.4 vorgestellte LowEx-System.

Auch dezentrale Frischwasserstationen, das heißt jede Wohneinheit wird durch eine eigene Wohnungsstation versorgt, werden derzeit in der Wohnungswirtschaft eingesetzt. Erfahrungswerte zeigen, dass diese niedrige Rücklauftemperaturen und eine gute Lastglättung zur Folge haben. Hohe Komplexität und Kosten, jede Wohnungsstation muss über einen eigenen Wärmeübertrager mit Regelventil verfügen, in Verbindung mit niedrigen Standzeiten wiegen diese positiven Eigenschaften jedoch auf.

In den letzten Jahren haben auch kommerzielle Hersteller Systeme zur Absenkung der Rücklauftemperatur entwickelt. Hervorzuheben ist das System Yado Aqua PR des Herstellers Yados, eine Weiterentwicklung des Speicherladesystems. Dieses konnte bei Untersuchungen auf einem Laborprüfstand niedrige Rücklauftemperaturen und eine gute Lastglättung aufweisen [22], [52].

#### 2.2.4 LowEx-Trinkwassererwärmung

Die Wärmeleistung geothermischer Heizwerke wird durch die Schüttung, die Vorlauftemperatur und die Rücklauftemperatur bestimmt. Während die Vorlauftemperatur und die maximale Schüttung maßgeblich durch die Bohrung begrenzt werden, ist die Rücklauftemperatur von den Verbrauchern abhängig und kann beeinflusst werden. Dies war eines der Ziele des Forschungsprojektes „LowEx-Fernwärme-Systeme“. Infolgedessen wurde eine Anlage zur TWE entwickelt, welche die üblichen hohen Rücklauftemperaturen der TWE reduziert und eine Lastglättung ermöglicht. Sie begünstigt damit den Einsatz niedrigexergischer Energiequellen wie der Geothermie, Solarthermie oder von modernen Fernwärmenetzen mit niedriger Temperatur [52]. Weiterhin hat das Wasser, das zur Wärmequelle zurückfließt, nur einen minimalen Restanteil der ursprünglichen Exergie. Diese TWE-Anlage wird daher im Folgenden als LowEx-TWE beziehungsweise LowEx-System bezeichnet.

In anschließenden Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die LowEx-TWE nicht nur den Einsatz niedrigexergischer Energiequellen begünstigt, sondern den Einsatz jeglicher Wärmeerzeuger effizienter und flexibler gestalten kann [22], [47]–[49], [51].

Die LowEx-TWE ist eine Variation des Durchflusssystemes. Zentrale Komponente des Systems ist der TES. An diesen ist eine Frischwasserstation angeschlossen. Wie aus dem Funktionsschema in Abb. 2.4 b) hervorgeht, ist die Besonderheit gegenüber konventionellen Durchflusssystemen, dass die Erwärmung des PWH und die Nachheizung der PWH-C getrennt erfolgen. Dadurch können die unterschiedlichen Temperaturniveaus separat behandelt werden. Während der Vorlauf beider 60 °C betragen sollte, liegt der Rücklauf der PWH-C bei ungefähr 55 °C und jener der PWH-Erwärmung in etwa auf dem Niveau der Kaltwassertemperatur von 13 °C. Die PWH-C ist nahezu konstant im Tagesverlauf, die

PWH-Erwärmung rein verbrauchsgebunden. Beide Rückläufe von den Wärmeübertragern werden getrennt in den TES eingelagert. Eine Durchmischung, wie sonst üblich, wird vermieden. Ein Teil des PWH-C-Rücklaufs wird dem Vorlauf direkt wieder beigemischt. Wird viel Trinkwasser benötigt, wie dies während der Verbrauchsspitzen am Morgen und am Abend der Fall ist, wird der im TES eingelagerte PWH-C-Rücklauf wieder entnommen und über ein Mischventil dem vom TES kommenden warmen Vorlauf so beigemischt, dass die Frischwasserstationen und die PWH-C-Nachheizung mit einer Vorlauftemperatur von 65 °C versorgt werden.

Damit diese Entnahme und Beimischung möglich ist, wird der TES mit höherer Temperatur beladen, als zur TWE notwendig ist. Je höher die Vorlauftemperatur zum TES ist, desto höher ist der Anteil des PWH-C-Rücklaufs, der beigemischt werden kann und desto niedriger ist die Rücklauftemperatur der Anlage. Der Rücklauf der PWH wird im unteren Bereich des TES eingeschichtet und bei Beladung der Wärmequelle zugeführt. Eine Durchmischung dieses kalten Bereichs und des PWH-C-Rücklaufs tritt auf, wenn der Bedarf an Wärme zur PWH-C-Nachheizung in Relation zur TWE-Bereitung hoch ist und längere Zeit keine relevante Zapfung auftritt. Im Tagesmittel kann die Rücklauftemperatur nicht die in Abb. 2.3 aufgeführte Minimalwerte unterschreiten. Aufgrund von Durchmischungen, Wärmeverlusten, Grädigkeiten der Wärmeübertrager etc. wird die tatsächliche Rücklauftemperatur im Tagesmittel deutlich höher liegen.

Da der TES, im Gegensatz zu den PWH-Speichern der Standardsysteme, mit Heizungswasser gefüllt ist und über eine Systemtrennung zum Trinkwasser verfügt, können Wärmequellen wie BHKWs, Wärmepumpen, Solarthermie oder Wärmesenken wie Heizungssysteme oder Raumlufttechnik direkt in den TES eingebunden werden. Lastglättung oder Flexibilität kann direkt mit dem zur Anlage gehörenden TES zur Verfügung gestellt werden. Ein zusätzlicher TES ist nicht notwendig.

Die Wiederverwendung der zwischengespeicherten Energie aus der PWH-C-Nachheizung bewirkt, dass ein möglichst hoher Anteil der darin enthaltenen Exergie verwendet wird. Dies hat nicht nur eine niedrige Rücklauftemperatur zur Folge. Auch die Speicherkapazität kann gesteigert werden. Diese kann beispielsweise für eine Lastglättung oder eine Lastverschiebung genutzt werden. Eine detaillierte Funktionsbeschreibung kann in [22], [51] gefunden werden.

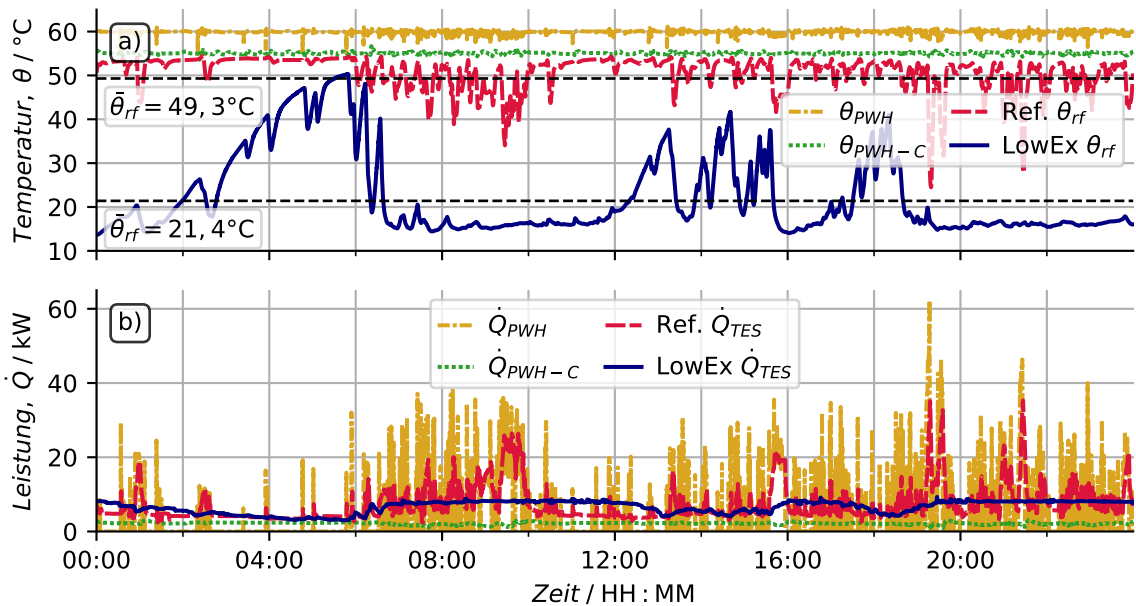
Die Verbesserungen gegenüber Standardsystemen können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Trennung von PWH- und PWH-C-Erwärmung sowie getrennte Einschichtung in einem TES
- Wiederverwendung der im TES eingelagerten Wärme aus der PWH-C-Erwärmung
- Nutzung eines Großteils der im Wasser vorliegenden Exergie
- Niedrige Rücklauftemperaturen und hohe Speicherkapazitäten
- Unabhängigkeit vom Energieträger, auch ohne zusätzlichen TES

### 2.2.5 Messtechnische Analyse von LowEx-TWE und Speicherladesystem auf dem Laborprüfstand

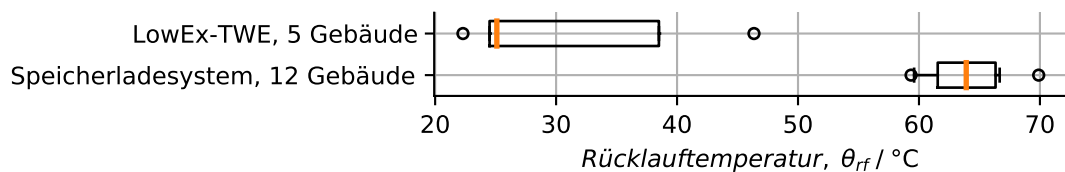
Mehrere TWE-Systeme wurden auf dem Laborprüfstand untersucht, darunter das Speicherladesystem und das LowEx-TWE-System [52]. Die in Abb. 2.5 b) abgebildeten Leistungen der PWH und PWH-C sowie die zugehörigen Temperaturen in a) sind die Randbedingungen der Labormessungen. Sie entsprechen einem Neubau nach EnEV mit 23 Wohneinheiten. Diese sind bei den in der Abbildung aufgeführten Systemen im Rahmen der Mess- und Regelgenauigkeit identisch. Die Vorlauftemperatur

zur Speicherladung beträgt  $95^\circ\text{C}$ , das Verhältnis von PWH-C zu PWH ca. 0,55. Nach Abb. 2.3 entspricht somit die minimale Rücklauftemperatur der des Kaltwassers von ca.  $13^\circ\text{C}$ . Wie Abb. 2.5 a) verdeutlicht, liegt das LowEx-System mit  $21,4^\circ\text{C}$  nah an diesem Wert, während das Speicherladesystem, abgekürzt mit Ref., mit einer Rücklauftemperatur von  $49,3^\circ\text{C}$  erheblich davon abweicht. Dies hat auch Auswirkungen auf die zur Beladung des Speichers benötigte Leistung, siehe Teilabbildung b). Während beim LowEx-System Mittelwert und Standardabweichung  $6,80 \pm 1,66\text{ kW}$  betragen, gilt für das Referenzsystem  $7,20 \pm 4,78\text{ kW}$ . Die Standardabweichung beträgt das Dreifache, was auf starke Schwankungen der Last um den Mittelwert hinweist.



**Abbildung 2.5:** Untersuchung eines Speicherladesystems (Ref.) und einer LowEx-TWE (LowEx) auf dem Laborprüfstand unter gleichen Bedingungen über einen Tag – a) Temperaturen; b) Leistungen

Zusätzlich zu Messungen auf dem Laborprüfstand wurden fünf Feldtest mit der LowEx-TWE-Anlage im Raum München umgesetzt. Weiterhin konnten neun Speicherladesysteme und drei Speichersysteme in Mehrfamilienhäusern untersucht werden. Deren Rücklauftemperaturen sind in Abb. 2.6 zusammengefasst. Die LowEx-Anlage mit dem höchsten Wert von ca.  $47^\circ\text{C}$ , ein Mehrfamilienhaus mit geringer Dämmung nach WSVO 77, zeigt eine geringere Rücklauftemperatur als alle Speicher- und Speicherladesysteme.



**Abbildung 2.6:** Boxplot der gemessenen Rücklauftemperaturen von Speicherladesystemen und LowEx-TWE-Anlagen in insgesamt 17 Mehrfamilienhäusern in München

Die hohen Rücklauftemperaturen und damit niedrige exergetische Effizienzen der Standard-TWE-

Anlagen kann auch anhand Literatur entnommener Daten bestätigt werden. Dem Bericht in [53] kann beispielsweise eine Rücklauftemperatur von 51 °C bei einer Spreizung von 9 K entnommen werden. In [54] wird als Randbedingung einer Simulation eine Temperatur von 50 °C mit 25 K festgelegt. Quelle [55] gibt für eine Simulation eine Vorlauftemperatur von 75 °C bis 80 °C und eine Rücklauftemperatur von 50 °C bis 55 °C vor. Auch Werte von  $\theta_{rf} = 60$  °C und  $\theta_{ff} = 85$  °C können für TWE-Anlagen gefunden werden [56]. In [57] wird angegeben, dass der Unterschied zwischen der höchsten und niedrigsten Temperatur mindestens 5 K bis 10 K betragen sollte, um eine sinnvolle Speichernutzung zu ermöglichen. Alle gefundenen Werte bestätigen die eigenen Messungen. Eine detaillierte Betrachtung der TWE-Anlagen erfolgt jedoch in keiner der genannten Quellen.

### 2.2.5.1 Allgemeine Eigenschaften der Systeme

Anhand der Messdaten und der Erfahrungen aus den Feldtests können die Eigenschaften der Speicherladesysteme und der LowEx-TWE-Anlage in Tabelle 2.1 zusammengefasst werden. Die niedrige Rücklauftemperatur der LowEx-TWE hat eine hohe spezifische Speicherkapazität zur Folge. Weiterhin kann der TES einfacher skaliert werden als ein PWH-Speicher. In der Folge ist die Lastverschiebungskapazität von LowEx-TWE-Anlagen sehr hoch. Diese kann entweder für einen flexiblen Betrieb oder für eine niedrige konstante Wärmeerzeugerleistung genutzt werden. Weiterhin wird die Effizienz der Wärmequelle positiv beeinflusst. Auch Wärmeverluste sind geringer, da für eine vergleichbare Speicherkapazität nur ein Speicher mit einem geringeren Speichervolumen benötigt wird.

Der Regelungsaufwand ist dafür höher als der vergleichbarer Standardsysteme. Die Investitionskosten eines reinen Speicherladesystems, ohne vorgeschalteten TES zur Bereitstellung von Flexibilität, sind in der Regel eher gering. Soll jedoch eine Anlage zur Bereitstellung von Flexibilität verwendet werden, muss ein zusätzlicher TES verbaut werden. Kosten und Regelungsaufwand steigen dabei auf ein mit der LowEx-TWE vergleichbares Niveau. Insbesondere bei größeren Mehrfamilienhäusern ab ca. 40 Wohneinheiten ist mit höheren Kosten des Speicherladesystems zu rechnen, da das LowEx-TWE zwar einen hohen Grundpreis hat, aber sehr günstig mit der Größe skaliert. Der Wartungsaufwand ist bei beiden Systemen ähnlich. Im Vergleich zu BHKWs oder Wärmepumpen ist dieser vernachlässigbar.

**Tabelle 2.1:** Eigenschaften der TWE-Systeme, ergänzt nach [58]

Eigenschaft	Speicherladesystem	LowEx-TWE
Rücklauftemperatur	hoch	niedrig
Lastverschiebung	mittel	hoch
konstante Wärmeerzeugerleistung	mittel	niedrig
Effizienz des Wärmeerzeugers	niedrig	hoch
Wärmeverluste	hoch	mittel
Regelungsaufwand	mittel	hoch
Investitionskosten	hoch	hoch

## 2.3 Kennzahlen der Kraft-Wärme-Kopplung

Übliche Kennzahlen, die ein BHKW charakterisieren, sind die elektrische Nennleistung  $P_{el,CHP,Prod}$  und die thermische Nennleistung  $\dot{Q}_{CHP}$ . Die Modulation  $\mu$  bestimmt die aktuelle elektrische Leistung. Bei Klein-BHKWs ist diese häufig auf einen Bereich von  $\mu \in \{0\%, 50\% \leq \mu \leq 100\%\}$  beschränkt, das heißt das BHKW kann im Bereich von 50% bis 100% der Nennleistung betrieben werden.

Die aktuelle elektrische sowie thermische Leistung kann damit nach Gleichungen (2.1) und (2.2) berechnet werden. Die Stromkennzahl  $s$  ist nach Gleichung (2.5) definiert. Ist die Gasleistung  $P_G$  bekannt, können der elektrische und thermische Wirkungsgrad mittels Gleichungen (2.3) und (2.4)  $\eta_{el}$  und  $\eta_{th}$  ermittelt werden. Die jährlichen Vollbetriebsstunden  $VBh$  des BHKWs sind in Abhängigkeit von der Stromproduktion und der Nennleistung definiert, siehe Gleichung (2.6). Alle Gleichungen sind unter der Annahme gültig, dass die thermische Leistung linear mit der Modulation skaliert und die Stromkennzahl sowie die Wirkungsgrade unabhängig von der Modulation sind. Dies ist bei Klein-BHKWs in guter Näherung gerechtfertigt.

$$P_{el,CHP,Prod} = \mu P_{el,CHP} \quad (2.1)$$

$$\dot{Q}_{CHP,Prod} = \mu \dot{Q}_{CHP} \quad (2.2)$$

$$\eta_{el} = \frac{P_{el,CHP}}{P_G} \quad (2.3)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{CHP}}{P_G} \quad (2.4)$$

$$s = \frac{P_{el,CHP}}{\dot{Q}_{CHP}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (2.5)$$

$$VBh = \frac{1}{P_{el,CHP}} \int_0^{8760} P_{el,CHP,Prod}(t) dt \quad (2.6)$$

## 2.4 Flexibilität von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen

Die Diskussion der Flexibilität von KWK-Anlagen erfordert die Definition eindeutiger Kennzahlen. Diese sollen im folgenden Abschnitt herausgearbeitet werden. Im Anschluss soll der Stand der Technik flexibler KWK-Anlagen anhand der Flexibilitätskennzahlen erläutert werden.

### 2.4.1 Quantifizierung der Flexibilität

In den letzten Jahren wurde erheblicher Aufwand betrieben, um eindeutige Kennzahlen zur Quantifizierung der Flexibilität von Energiesystemen zu finden. In der Folge liegen heute viele Kennzahlen zur Bewertung unterschiedlicher Aspekte der Flexibilität vor [16]. Eines der am weitesten verbreiteten Konzepte von Flexibilitätskennzahlen ist die sogenannte *flexibility trinity*, eingeführt in [59] und weiterentwickelt in [60], [61]. Die *flexibility trinity* beschreibt die Flexibilität eines Energiesystems anhand von:

- Leistungsänderungspotential  $\rho$  in MW/min
- Leistungspotential  $\pi$  in MW

- Energiespeicherpotential  $\epsilon$  in MW h

Zusätzlich wird die Leistungsänderungsdauer  $\delta$  in min definiert. Dieser Satz an Kennzahlen kann sowohl auf elektrische, als auch auf thermische Energiesysteme angewandt werden.

Mit dem Energiespeicherpotential nah verwandt ist die Definition der Flexibilität als die Zeitspanne in Stunden, über die Verbrauch oder Produktion verschoben werden können [35]. Die Einheit dieser Kennzahl ist unabhängig von der Leistung des Wärme- oder Stromerzeugers sowie dem Strom- und Wärmeverbrauch. Somit können Energiesysteme unterschiedlicher Größen eindeutig und einfach interpretierbar bezüglich der Lastverschiebungskapazität verglichen werden. Referenz [62] erweitert das Konzept der zeitlichen Flexibilität bei der Berechnung um Speicherverluste und aktuell anliegende Lasten.

Viele weitere Definitionen für die Flexibilität von Energiesystemen liegen vor [63], [64], unter anderem die Kostenflexibilität. Diese ist insbesondere für Energieversorgungsunternehmen von Interesse [65]. Auch ein „Flexibility Saving Index“ und ein „Flexibility Index“ in Abhängigkeit von einem Strafsignal wurden entwickelt, um Gebäudetechnikern und Regulierungsbehörden gleichermaßen eine einfache und aussagekräftige Kennzahl zu liefern [40]. Die eingangs erwähnte *flexibility trinity* oder zeitliche Flexibilität sollten diesen beiden Kennzahlen jedoch jederzeit vorgezogen werden, gerade und insbesondere mit Blick auf die Aussagekraft der Kennzahl bei gleichzeitig einfacher Interpretierbarkeit.

Der Vergleich verschiedener Anlagensysteme über eine Vielzahl an Parametervariationen hinweg erfordert die Verwendung einer Kennzahl, die eindeutig, vergleichbar und einfach interpretierbar ist. Die zeitliche Flexibilität erfüllt diese Kriterien. Die Einheit der zeitlichen Flexibilität ist die Zeit, die mittels des Anlagensystems überbrückt werden kann. Die Kennzahl ist somit vollständig von allen anlagenabhängigen Größen wie Leistungen und Speichervolumina entdimensioniert. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher diese Kennzahl, definiert nach [35], [62], zur Quantifizierung der Flexibilität verwendet. Die Flexibilität wird dazu in zwei richtungsabhängige zeitliche Flexibilitäten unterteilt:

**verzögerte Flexibilität**  $\tau_d$  in h - Dauer, während welcher der gesamte Wärmebedarf aus dem TES gedeckt werden kann, ohne dass ein Wärmeerzeuger anschalten muss

**erzwungene Flexibilität**  $\tau_f$  in h - Dauer, die ein Wärmeerzeuger ununterbrochen auf Nennleistung betrieben werden kann, bis der TES vollständig beladen ist

Ein „Notkühlen“ überschüssiger Wärme oder die Bereitstellung von Wärme aus zusätzlichen Quellen ist nicht zulässig.

**Bestimmung des Ladezustandes von thermischen Speichern** Die Berechnung der zeitlichen Flexibilität erfordert die Bestimmung der verbleibenden Wärmekapazität beziehungsweise des Ladezustandes des TES. Dies erfolgt in der Regel anhand von über die Speicherhöhe verteilten Temperatursensoren. Bei Bedarf werden die Temperaturwerte zwischen den Sensoren interpoliert, üblicherweise unter der Annahme eines linearen oder schrittweisen Verlaufs. Je effizienter ein Speicher genutzt wird, desto schärfer sind die Grenzschichten zwischen verschiedenen Temperaturniveaus. Diese scharfen Grenzschichten führen bei einer linearen Interpolation zu großen Fehlern, sofern nicht eine hohe Anzahl Sensoren vorhanden ist [57].

In Quelle [66] konnte gezeigt werden, dass der Temperaturverlauf in TES bei Vorhandensein einer Grenzschicht in guter Näherung durch eine Sigmoid-Kurve abgebildet werden kann. Eine Adaption des in Gleichung (2.7) gegebenen funktionalen Zusammenhangs für die Temperatur  $\theta(h)$  in Abhängigkeit von der Höhe im TES  $h$  zeigte eine hohe Genauigkeit. Die Formparameter  $B$  und  $\lambda$  werden für jeden

Ladezustand mittels eines Optimierungsverfahrens ermittelt,  $h_0$  kann in Abhängigkeit von der Größe des TES empirisch auf einen konstanten Wert gesetzt werden. Der Abstand der Temperatursensoren sollte aus einem Mittelwert zwischen der Gradienten- und 90/10 %-Methode ermittelt werden [67]. Der sigmoidförmige Zusammenhang geht auch aus Betrachtungen in [57] hervor.

$$\theta(h) = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{1 + \left(\frac{B}{h-h_0}\right)^\lambda} + \theta_{min} \quad (2.7)$$

Dieses Modell ist für einfache TES mit einer Grenzschicht gültig. Eine Weiterentwicklung des Sigmoid-Modells auf eine beliebige Anzahl an Grenzschichten wird in Abschnitt 4.1.1.1 vorgestellt.

Sind die Parameter bekannt, kann ein diskretes Temperaturprofil  $\theta(h)$  berechnet werden. Mittels Gleichung (2.8) kann dann der Exergiegehalt des TES  $Q_{TES}$  bezüglich einer beliebigen Referenztemperatur  $\theta_{ref}$  durch Aufsummieren der Exergien der Kontrollvolumina  $V_h$  bestimmt werden.

$$Q_{TES} = V_h \sum_{h=0}^{h_{TES}} \rho(\bar{\theta}) c_p(\bar{\theta}) (\theta(h) - \theta_{ref}(h)) \quad \text{falls } \theta(h) > \theta_{ref}(h) \quad (2.8)$$

mit der Höhe des TES  $h_{TES}$  sowie der Dichte  $\rho$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  bezüglich der mittleren Temperatur  $\bar{\theta} = 1/2 (\theta(h) - \theta_{ref})$ .

**Berechnung der zeitlichen Flexibilität** Die verbleibende Wärmekapazität des TES zur Bereitstellung von Flexibilität wird nach Gleichung (2.8) durch Einsetzen der entsprechenden Referenztemperaturen bestimmt. Für die Entladung des TES zum Zeitpunkt  $t$ , das heißt für die verzögerte Flexibilität, ist die Restkapazität nach Gleichung (2.9) definiert. Für die Restkapazität der erzwungenen Flexibilität gilt Gleichung (2.10). Die Addition beider Kapazitäten ergibt die maximale TES-Kapazität zwischen vollständiger Entladung und Beladung, siehe Gleichung (2.11).

$$Q_{TES,d}(t) = V_h \sum_{h=0}^{h_{TES}} \rho(\bar{\theta}) c_p(\bar{\theta}) (\theta(h, t) - \theta_{min}(h)) \quad \text{falls } \theta(h, t) > \theta_{min}(h) \quad (2.9)$$

$$Q_{TES,f}(t) = V_h \sum_{h=0}^{h_{TES}} \rho(\bar{\theta}) c_p(\bar{\theta}) (\theta_{max}(h) - \theta(h, t)) \quad \text{falls } \theta_{max}(h) > \theta(h, t) \quad (2.10)$$

$$Q_{TES,max} = V_h \sum_{h=0}^{h_{TES}} \rho(\bar{\theta}) c_p(\bar{\theta}) (\theta_{max}(h) - \theta_{min}(h)) = Q_{TES,d}(t) + Q_{TES,f}(t) \quad (2.11)$$

mit dem Temperaturprofil bei maximaler Beladung  $\theta_{max}(h)$  bzw. Entladung  $\theta_{min}(h)$ , der aktuellen Temperatur  $\theta(h, t)$  sowie den Mittelwerten der Temperaturspreizung  $\bar{\theta}$ . Anhand der Restkapazitäten kann anschließend die verzögerte zeitliche Flexibilität mittels Gleichung (2.12) und die erzwungene zeitliche Flexibilität mittels Gleichung (2.13) berechnet werden. Wird die jeweilige Restkapazität durch die maximale TES-Kapazität  $Q_{TES,max}$  ersetzt, so ergibt sich die jeweilige maximal erreichbare Flexibilität unabhängig vom aktuellen TES-Ladezustand. Da der Endwert der Summe und damit  $\tau$  von den in der Summe auftretenden Werten abhängig ist, sollten die Gleichungen iterativ gelöst werden.

$$\tau_d(t) \leq \frac{Q_{TES,d}(t)}{\frac{1}{\tau_d} \int_t^{t+\tau_d} \dot{Q}_L(t) dt} \quad (2.12)$$



$$\tau_f(t) \leq \frac{Q_{TES,r}(t)}{\frac{1}{\tau_f} \int_t^{t+\tau_f} (\dot{Q}_{CHP}(t) - \dot{Q}_L(t)) dt} \quad (2.13)$$

mit der Wärmeleistung des BHKWs  $\dot{Q}_{CHP}$  und dem Wärmebedarf inklusive Verlusten  $\dot{Q}_L$ .

### 2.4.2 Stand der Technik flexibler Kraft-Wärme-Kopplung

Um die Verschiebung thermischer Lasten in einem Energiesystem zu ermöglichen, wird ein TES benötigt. Weiterhin ermöglicht ein TES einen kontinuierlichen Betrieb des Wärmeerzeugers. Der Wirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit steigen [39]. Im Vergleich zu einem dezentralen BHKW ohne TES kann schon ein kleiner TES, der eine Lastverschiebung von nur  $\tau_f = 1$  h ermöglicht, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um das Dreifache reduzieren. Bei einer zentralen Bereitstellung wird die doppelte Speicherkapazität für vergleichbare Einsparungen benötigt [38]. Simulationen haben gezeigt, dass der Einsatz eines TES mit 0,3 m<sup>3</sup> Volumen in Einfamilienhäusern die Verluste durch Zwangsabschaltungen von erneuerbaren Energien um 74 % verringern kann, entsprechend einer Energieeinsparung um 3,4 % [43].

Die entscheidenden Größen für die Flexibilität in Gebäudeenergiesystemen sind nach Gleichungen (2.12) und (2.13) die TES-Kapazität, die BHKW-Leistung und thermischen Lasten. Aufgrund von Mindestanforderungen an den Benutzerkomfort und Hygienevorgaben ist eine Einflussnahme auf die thermischen Lasten nicht möglich. Auch die BHKW-Leistung kann nur in einem eingeschränkten Bereich variiert werden, sofern das BHKW der Hauptenergieversorger des Energiesystems sein soll. Folglich kann die Flexibilität am einfachsten über die Speicherkapazität des TES beeinflusst werden.

Diese ist vorrangig vom Volumen des TES sowie der Temperaturspreizung des Anlagensystems abhängig, siehe auch Gleichung (2.8). Während das Volumen durch Kosten, verfügbaren Platz und tolerierbare Wärmeverluste begrenzt ist, wird die Temperaturspreizung durch den Wärmeerzeuger und die niedrigste Temperatur im System  $\theta_{min}$ , typischerweise die des kalten Trinkwassers mit ca. 15 °C, bestimmt. Obgleich dies die Obergrenze der Spreizung darstellt, ist diese in der Realität deutlich niedriger. Durch einen Wärmeübertrager vom Trinkwasser getrennt, ist die Rücklauftemperatur der TWE ausschlaggebend.

Da die TWE, im Gegensatz zur Gebäudebeheizung, bisher noch nicht optimiert und auch kaum Teil der aktuellen Forschung ist, liegen nur sehr wenige Literaturwerte vor. Übliche Werte liegen im Bereich von 50 °C bis 65 °C [53]–[56], [58]. Eigene Messungen in über 15 Wohngebäuden mit jeweils mehr als 20 Wohneinheiten zeigen eine Bandbreite von 55 °C bis 70 °C mit einem Median von über 60 °C [22]. Bei einer angenommenen Vorlauftemperatur von 80 °C ist die tatsächliche Spreizung damit im besten Fall um den Faktor 2,2 geringer, als die theoretisch erreichbare. Die TES-Kapazität und die Flexibilität skalieren nahezu proportional mit der Spreizung. Beides wird stark limitiert.

In modernen Wohngebäuden hat die TWE in der Regel einen Anteil von über 50 % am jährlichen Wärmebedarf. Der Einfluss der Rücklauftemperatur der TWE steigt dementsprechend. Zudem fallen Zeiten, zu denen geheizt werden muss und somit keine Flexibilität bereitgestellt werden kann, kürzer aus. Die Rücklauftemperatur der TWE zeigt einen maßgeblichen Einfluss auf:

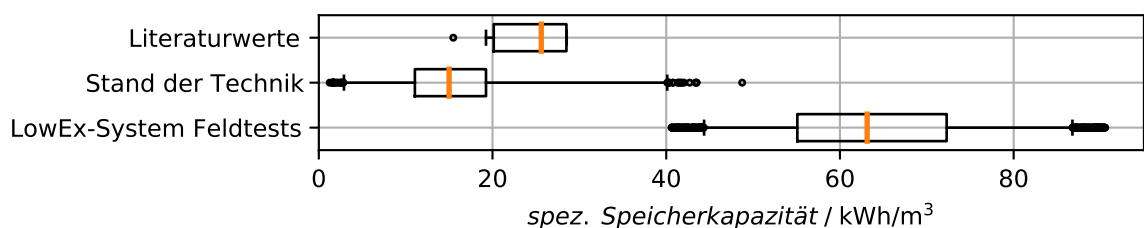
- TES-Kapazität und verfügbare Flexibilität
- Thermische Effizienz der Wärmeerzeuger
- Leistungsbereich und Betriebsmodi der Wärme- und Stromerzeuger
- Massenströme und damit Schichtungsqualität und Durchmischung im TES

Dies hebt hervor, dass die Rücklauftemperatur von TWE-Anlagen optimiert werden muss, um Gebäudeenergiesystemen flexibel und effizient betreiben zu können.

Bisher wurde ein großer Aufwand betrieben, um die Flexibilität von Energiesystemen zu optimieren. Regelstrategien und Netzinteraktionen wurden modelliert und simuliert [68], [69]. Als ein Resultat kann Flexibilität bereitgestellt und genutzt werden, um den Energieverbrauch oder die Kosten zu senken [70], [71]. Wenige Autoren betrachten die Flexibilität unter Einbezug von TWE-Systemen. Es werden unter anderem Wärmepumpen simuliert, um Demand Side Management mit TWE-Anlagen zu ermöglichen [43]. Auch elektrische Wassererwärmer werden zu diesem Zweck eingesetzt [42]. Im Rahmen des IEA EBC Annex 67 Forschungsprogramms werden die thermische Masse eines Gebäudes, PWH-Speicher und ein PCM-Speicher zur Bereitstellung von Flexibilität untersucht [53]. PWH-Speicher sind im Allgemeinen aufgrund hoher Kosten, zusätzlicher Anforderungen an Hygiene und Temperaturen sowie der erschwerten Einbindung weiterer Wärmesenken durch die notwendige zusätzliche Systemtrennungen jedoch nicht zur Bereitstellung von Flexibilität geeignet.

Ein Autor schlussfolgert, dass genug Aufwand in die Optimierung der Flexibilität mittels Modellierung und Simulation geflossen sei. Ein angewandter Forschungsansatz solle ein nächster Schritt sein [39]. Ein solcher wird in [72] verfolgt. Der Effekt einer Herabsetzung der Warmwassertemperatur auf 45 °C wird untersucht. Es kann gezeigt werden, dass Wärmeverluste, eine der Ursachen für hohe Rücklauftemperaturen, gesenkt werden können, während die Hygiene bei Einhaltung geeigneter Standards nicht eingeschränkt wird. Andere Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Steigerung der TES-Kapazität mittels Einsatz von Latentwärmespeichern [73]. Während dies ein vielversprechender Ansatz ist, kann die zusätzliche Komplexität der Systeme nicht vernachlässigt werden. Daher sollte die Optimierung der Randbedingungen des Systems, wie zum Beispiel die verfügbaren Temperaturniveaus, ein erster Schritt sein.

Zum aktuellen Zeitpunkt kann jedoch kein konstruktiv-technischer Ansatz zur Steigerung der Flexibilität mittels Optimierung der TWE gefunden werden. Im Gegenteil: Die TWE wird in der Gebäudetechnik als unveränderliche Größe gesehen, die aufgrund der hohen Rücklauftemperaturen allen Optimierungsbestrebungen entgegensteht, sei es bezüglich der Flexibilität, der Effizienz oder der Betriebskosten. Eigene, dieser Arbeit vorangegangene, Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Rücklauftemperatur von TWE-Anlagen in der Tat optimiert werden kann. Mit der entwickelten LowEx-Technologie konnten Jahresmittelwerte von unter 20 °C erreicht werden. Die aus den Rücklauftemperaturen resultierende spezifische Speicherkapazität ist in Abb. 2.7 dargestellt [22], [47]–[49], [58].



**Abbildung 2.7:** Spezifische Speicherkapazität verschiedener Anlagentypen, nach [22]

## 2.5 Wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen von Klein-KWK in Wohngebäuden

Aufgrund vielfältiger Förderungsmodalitäten von Klein-KWK in Wohngebäuden sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ständigen Änderungen der gesetzlichen Grundlagen unterworfen. Diese werden im Folgenden kurz entsprechend des in VDI-Richtlinie 2067 vorgegebenen Vorgehens zur Berechnung von Kosten, Erlösen und Gesamtannuität zusammengefasst [74]. Im Anschluss wird auf die Berechnung der laufenden Bruttoerträge eingegangen. Kapitalgebundene Kosten werden aus den Berechnungen exkludiert, da diese zwischen den zu vergleichenden Anlagensystemen bei gleichen Randbedingungen keine oder zu vernachlässigende Unterschiede aufweisen.

### 2.5.1 Kapitalgebundene Kosten und Erlöse

Unter den kapitalgebundenen Kosten werden Investitionskosten zur Errichtung der Anlage sowie zur Instandsetzung zusammengefasst. Dies beinhaltet beispielsweise die Anlagenkosten für BHKW und Gaskessel sowie bauliche Anlagen, Anschlusskosten, Schall- und Wärmeschutz, Heizkreise oder Warmwasserbereitung inklusive Rohren, Regelung und Ähnlichem.

In dieser Arbeit werden Anlagensysteme unter gleichen Randbedingungen miteinander verglichen. Folglich sind die meisten kapitalgebundenen Kosten wie bauliche Anlagen oder Heizkreise zwischen zu vergleichenden Anlagen äquivalent. Auch für die Warmwasserbereitung inklusive zugehöriger Komponenten kann angenommen werden, dass die Systeme ähnlich mit der Leistungsgröße skalieren. Das BHKW, der Gaskessel sowie der TES sind hingegen keine Randbedingungen, werden im Rahmen der durchzuführenden Parametervariation jedoch für alle Anlagentypen gleichermaßen vorgegeben. Auch die Instandsetzung des BHKWs wird nach VDI 2067 zu den kapitalgebundenen Kosten gezählt. Üblich sind heutzutage jedoch Vollwartungsverträge, die Instandsetzung und Wartung je Betriebsstunde abrechnen. Daher wird die Instandsetzung hier zu den verbrauchsgebundenen Kosten gezählt.

Kapitalgebundene Erlöse sind beispielsweise Förderungen der Investitionskosten. Etwa können Klein-KWK-Anlagen bis zu einer elektrischen Leistung von 20 kW, für die bis zum 31.12.2020 ein Förderantrag gestellt wird, einen Investitionszuschuss in Abhängigkeit von der Leistung erhalten. Die Staffelung beträgt zwischen 1 kW und 20 kW ca. 1900 € bis 3500 €. Ein Abgaswärmeübertrager zur Brennwertnutzung wird mit zusätzlich bis zu 875 € gefördert, eine hohe elektrische Effizienz mit 1140 € [75]. Weiterhin werden neue Wärmespeicher unter bestimmten Bedingungen mit 250 €/m<sup>3</sup> gefördert [26].

### 2.5.2 Betriebsgebundene Kosten und Erlöse

Die betriebsgebundenen Kosten enthalten Kosten für die Bedienung, Reinigung und Instandhaltung. In Abgrenzung zur Instandsetzung werden unter Instandhaltung Wartungs- und Inspektionskosten zusammengefasst. Da diese durch heutige Vollwartungsverträgen abgedeckt werden, wird in dieser Arbeit auch die Instandhaltung über verbrauchsgebundene Kosten abgerechnet.

Zu den betriebsgebundenen Erlösen zählt etwa die Vorhaltung von Regelenergie. Dies wird nicht berücksichtigt, da die aktuellen Anforderungen für einzelne Klein-BHKWs nicht zu erfüllen sind.

### 2.5.3 Verbrauchsgebundene Kosten und Erlöse

Die verbrauchsgebundenen Kosten und Erlöse enthalten jegliche Bilanzen, die in direktem Zusammenhang mit dem Anlagenbetrieb stehen. Hierunter fallen unter anderem an die produzierte, eingespeiste oder eigenverbrauchte Energiemenge gekoppelte Erlöse wie Vergütungen nach dem KWKG, dem marktüblichen Strompreis oder dem Strom- und Wärmeverkauf, als auch Kosten für den Brennstoff oder die EEG-Umlage. Im Gegensatz zur VDI-Richtlinie 2067 werden hier auch Kosten für die Instandhaltung und -setzung bilanziert, da diese, dem aktuellen marktüblichen Vorgehen entsprechend, über einen an die BHKW-Betriebsstunden gebundenen Vollwartungsvertrag abgerechnet werden.

**Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz** Der durch das BHKW produzierte und eingespeiste oder eigenverbrauchte Strom wird nach dem KWKG 2017 in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung gestaffelt vergütet. So beträgt die Förderung bei einer BHKW-Leistung von unter  $50 \text{ kW}_{el}$  für eingespeisten Strom  $8 \text{ ct}/(\text{kW h})$  sowie  $4 \text{ ct}/(\text{kW h})$  für eigenverbrauchten Strom. Für den Leistungsbereich bis  $100 \text{ kW}_{el}$  sind es noch  $6 \text{ ct}/(\text{kW h})$  beziehungsweise  $3 \text{ ct}/(\text{kW h})$ . Eine vollständige Auflistung ist in Tabelle 2.2 zu finden. Für neue KWK-Anlagen mit weniger als  $50 \text{ kW}_{el}$  werden die Förderungen für 60 000 VBh gezahlt, darüber für 30 000 VBh [26].

**EEG-Umlage** Die EEG-Umlage für durch das BHKW produzierten Strom betrug im Jahr 2019  $6,405 \text{ ct}/(\text{kW h})$ , siehe Abb. 2.8 a). Für die Eigenversorgung mit Strom fällt nur eine verminderte EEG-Umlage von 40 % an. Eigenversorger können jegliche juristische Personen wie Gesellschaften oder auch Wohnungseigentümergeinschaften sein. Wird der Strom an Dritte verkauft, fällt die volle EEG-Umlage an. Unter Sonderbedingungen kann die EEG-Umlage vollständig entfallen [76].

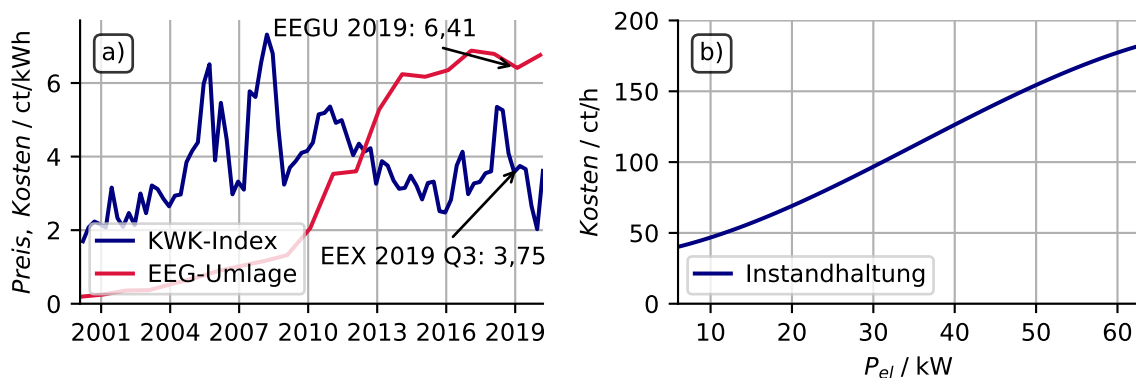
**KWK-Index - European Energy Exchange Baseload** Der KWK-Index, früher auch European Energy Exchange (EEX) Baseload genannt, definiert den marktüblichen Strompreis, den der Betreiber eines BHKWs für in das Netz eingespeisten Strom erhält. Dieser wird quartalsweise aus den durchschnittlichen Deutschen Schlussabrechnungspreisen der Strom-Tagesfutures an der Strombörse EEX berechnet. Der Verlauf des KWK-Index im Laufe der letzten Jahre ist in Abb. 2.8 a) abgebildet.

**Vermiedene Netznutzungsentgelte** Nach Inkrafttreten der Novellierung des Gesetzes zur Modernisierung der Netzentgeltstruktur (NEMoG), der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) und des Energiewirtschaftsgesetzes zu Beginn des Jahres 2023 werden für eigenverbrauchten Strom keine vermiedenen Netznutzungsentgelte mehr gezahlt [77]. Dieser Stand wird in dieser Arbeit abgebildet. Bisherige typische Werte liegen im Bereich von  $0,05 \text{ ct}/(\text{kW h})$  bis  $0,5 \text{ ct}/(\text{kW h})$  [78].

**Instandhaltung und Instandsetzung** Die Instandhaltung und -setzung eines BHKWs in Energiesystemen in Mehrfamilienhäusern wird derzeit in der Regel durch Vollwartungsverträge abgedeckt. Hier ist nicht die tatsächlich produzierte Energiemenge ausschlaggebend, sondern die Anzahl an Betriebsstunden. Eine Leistungsmodulation oder häufiges An- und Abschalten wirken sich folglich negativ auf die Betriebskosten in Relation zur bereitgestellten Energiemenge aus. Eine energiemengenbasierte Berechnung kann beispielsweise nach ASUE BHKW-Kenndaten [79] oder VDI 2067-1 [74] erfolgen. Für diese Arbeit werden Vollwartungsverträge zu marktüblichen Preisen angenommen. Die Kosten dieser sind in Abb. 2.8 b) in Abhängigkeit von der BHKW-Leistung dargestellt.

**Gaspreis, Strompreis, Wärmepreis** Gas-, Strom- und Wärmepreise unterliegen regelmäßigen Anpassungen. Es wird daher eine Momentaufnahme zum Ende des Jahres 2019 wiedergegeben. Der Gaspreis beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa  $c_G = 3,8 \text{ ct}/(\text{kW h})$  für mittelgroße Abnehmer, der Strompreis für den Zukauf ca.  $c_{el,Netz} = 23,5 \text{ ct}/(\text{kW h})$  und der Wärmepreis für den Verkauf an Einzelabnehmer wie Mieter ungefähr  $c_{th,Verk} = 6,85 \text{ ct}/(\text{kW h})$ . Für den Weiterverkauf an Dritte wird ein Aufschlag von  $c_{el,Verk} = c_{el,Netz} + 0,8 \text{ ct}/(\text{kW h})$  angenommen. Alle Preise verstehen sich ohne Mehrwertsteuer, jedoch inklusive aller Energiesteuern.

Der Gaspreis je kW h ist beispielsweise aus einem reinen Energiepreis von ca. 2,2 ct, Netzentgelten von ca. 0,99 ct, Bilanzierungsumlagen von ca. 0,1 ct und der Energiesteuer von 0,55 ct zusammengesetzt. Die Energiesteuer kann vollständig zurückerstattet werden, sofern die KWK-Anlage hocheffizient ist und einen Nutzungsgrad von über 70 % aufweist [80].



**Abbildung 2.8:** Betriebskosten und Vergütung eines BHKWs – a) Einspeisevergütung nach KWK-Index sowie EEG-Umlage; b) Instandhaltungskosten eines üblichen Vollwartungsvertrages

**Anstehende Novellierungen** Während einige Novellierungen, wie die des NEMoG, schon zu Beginn der Berechnungen feststanden und eingebunden werden konnten, gab es bei anderen anstehenden Änderungen noch keine verbindlichen Daten. Hierzu zählt die Novellierung des KWKG mit einer erneuten Anpassung der Fördersätze. Darüber hinaus wird die Anzahl der förderfähigen Stunden schrittweise auf 3500 VBh/a begrenzt, während die Gesamtförderdauer auf 30 000 VBh halbiert wird. Weiterhin ist aufgrund der Förderung innovativer Kraft-Wärme-Kopplung (iKWK) und des Redispatch 2.0 zum 1. Oktober 2021 für KWK-Anlagen mit einer Leistung von mehr als  $100 \text{ kW}_{el}$  damit zu rechnen, dass eine intelligente Steuerung auch bei kleineren KWK-Anlagen zunehmend Einzug erhalten wird. All dies führt zu einer bevorzugten Förderung flexibler KWK-Anlagen.

#### 2.5.4 Berechnung des verbrauchsgebundenen Bruttoertrags

Der verbrauchsgebundene Bruttoertrag eines Energiesystems enthält alle laufenden Kosten und Erlöse vor Steuern, Gemeinkosten, Abschreibungen und Zinsen. Anhand des Bruttoertrages kann der Ertrag einer Anlage von Begleitkosten bereinigt betrachtet werden.

Zur Bestimmung des Bruttoertrags werden zuerst die Leistungen des Anlagensystems auf unterschiedlich zu bewertende Bestandteile aufgeteilt. Der aktuelle Verbrauch des Gebäudes  $P_{el,dmd}$  kann anhand von

**Tabelle 2.2:** Spezifische Kosten und Erlöse bei Betrieb eines Klein-BHKWs

Bezeichnung	Symbol	Wert	Bemerkung
spezifische Kosten			
Gaspreis	$k_G$	3,84 ct/(kW h)	
Energiesteuerrück- erstattung	$k_{EStG}$	0,55 ct/(kW h)	
Instandhaltung und -setzung	$k_{Insh}$	(0,42, 0,57, 1,14, 1,87, 2,08) ct/h für $P_{el} \in \{9, 15, 34, 60, 80\}$ kW	nach Vollwartungs- verträgen 2020 Q1
EEG-Umlage	$k_{EEGU}$	6,405 ct/(kW h)	2019
Strompreis Zukauf	$k_{el,Netz}$	23,5 ct/(kW h)	
spezifische Erlöse			
Strompreis Verkauf	$r_{el,Verk}$	24,3 ct/(kW h)	
Wärmepreis Verkauf	$r_{th,Verk}$	6,85 ct/(kW h)	
KWKG-Vergütung Eigennutzung	$r_{Eig}$	(4, 3, 2, 1,5, 1) ct/(kW h) für $P_{el} \in \{50, 100, 250, 2000\}$ kW	kumulativ gestaffelt nach Leistung [26]
KWKG-Vergütung Einspeisung	$r_{Esp}$	(8, 6, 5, 4,4, 3,1) ct/(kW h) für $P_{el} \in \{50, 100, 250, 2000\}$ kW	kumulativ gestaffelt nach Leistung [26]
EEX KWK-Index	$r_{EEX}$	3,745 ct/(kW h)	2019 Q3
Vermiedene Netz- nutzungsentgelte	$r_{el,vNNEG}$	0 ct/(kW h)	abgeschafft zum 01.01.2023

Gleichung (2.14) auf den Verbrauchsanteil der Teilnehmer am Mieterstromprojekt  $P_{MS}$  und den der restlichen Bewohner  $P_{nMS}$  aufgeteilt werden. Die Grundlast aus Allgemeinstrom wird dem Mieterstrom zugerechnet. Die Berechnung des vor Ort eigenverbrauchten Stroms  $P_{Eig}$  in Gleichung (2.15) und des überschüssigen in das allgemeine Versorgungsnetz eingespeisten Stroms  $P_{Esp}$  in Gleichung (2.16) erfolgt in Abhängigkeit von den zuvor genannten Größen. Der zugekaufte Strom  $P_{Zuk}$ , siehe Gleichung (2.17), wird nur für Teilnehmer am Mieterstromprojekt berechnet. Für andere Abnehmer wird der Strom ohne Differenzierung durchgeschleust.

$$P_{MS} = P_{el,dmd} - P_{nMS} \quad (2.14)$$

$$P_{Eig} = \begin{cases} P_{MS} & \text{falls } P_{el,CHP,Prod} > P_{MS} \\ P_{el,CHP,Prod} & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$P_{Esp} = \begin{cases} P_{el,CHP,Prod} - P_{MS} & \text{falls } P_{el,CHP,Prod} > P_{MS} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$P_{Zuk} = \begin{cases} P_{MS} - P_{el,CHP,Prod} & \text{falls } P_{MS} > P_{el,CHP,Prod} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.17)$$

Mit diesen Leistungsbilanzen können die Kosten für den Gasverbrauch  $K_G$ , die Instandhaltung  $K_{Insh}$ , die EEG-Umlage  $K_{EEGU}$  und den Zukauf von Strom  $K_{Zuk}$  in Gleichungen (2.18) bis (2.21) aufgestellt werden. Die Instandhaltung wird, wie bei Vollwartungsverträgen üblich, unabhängig von der Modulation je Betriebsstunde angesetzt. Die EEG-Umlage wird vollständig berechnet, da der gesamte produzierte Strom an Dritte verkauft wird. Die Summe der Kosten ist in Gleichung (2.22) aufgeführt. Die zur

Berechnung benötigten spezifischen Kosten  $k$  und Erlöse  $r$  fasst Tabelle 2.2 zusammen.

$$K_G = (k_G - k_{ESTG}) \frac{P_{el,CHP,Prod}}{\eta_{el}(\mu)} \quad (2.18)$$

$$K_{Insh} = k_{Insh}(P_{el,max}) \quad (2.19)$$

$$K_{EEGU} = k_{EEGU} P_{el,CHP,Prod} \quad (2.20)$$

$$K_{Zuk} = k_{el,Netz} P_{Zuk} \quad (2.21)$$

$$K_{tot} = K_G + K_{Insh} + K_{EEGU} + K_{Zuk} \quad (2.22)$$

Die Erlöse durch KWKG-Vergütung  $R_{KWKG}$ , Stromverkauf nach KWK-Index  $R_{EEX}$ , Stromverkauf inklusive Zukauf und Weiterverkauf an Teilnehmer des Mieterstromprojekts  $R_{el,Verk}$ , Verkauf von Wärme  $R_{th,Verk}$  sowie vermiedene Netznutzungsentgelte  $R_{vNNEG}$  in Gleichungen (2.23) bis (2.27) werden gutgeschrieben. Die Summe der Erlöse folgt nach Gleichung (2.28).

$$R_{KWKG} = (r_{Eig} P_{Eig} + r_{Esp} P_{Esp}) \quad (2.23)$$

$$R_{EEX} = r_{EEX} P_{Esp} \quad (2.24)$$

$$R_{el,Verk} = r_{el,Verk} (P_{Eig} + P_{Zuk}) \quad (2.25)$$

$$R_{th,Verk} = r_{th,Verk} \dot{Q}_{CHP,Prod} \quad (2.26)$$

$$R_{vNNEG} = r_{el,vNNEG} P_{Eig} \quad (2.27)$$

$$R_{tot} = R_{KWKG} + R_{EEX} + R_{el,Verk} + R_{th,Verk} + R_{vNNEG} \quad (2.28)$$

Der stündliche Bruttoertrag  $B$  bei Betrieb des BHKWs, das heißt der Ertrag vor Steuern, Zinsen und Abschreibungen, ist definiert als die Differenz zwischen Erlösen und Kosten:

$$B = R_{tot} - K_{tot} \quad (2.29)$$

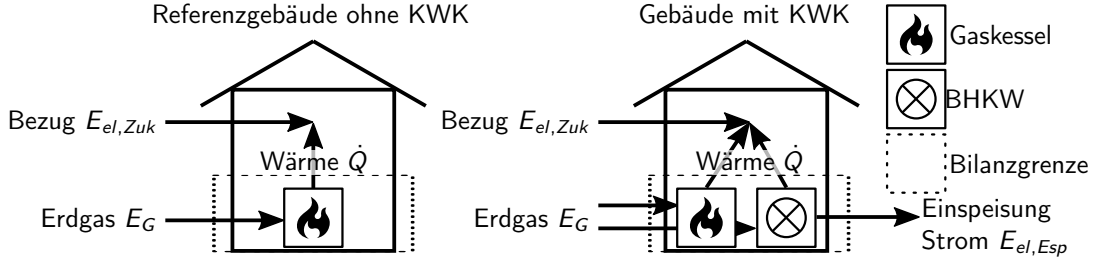
Vermiedene Netznutzungsentgelte werden nach Einführung der Novellen des NEMoG, StromNEV und EnWG ab 2023 abgeschafft [77]. Daher werden diese hier nicht betrachtet. Die Novelle des KWKG zum Jahr 2021 war zu Beginn der auf den Bruttoerträgen basierenden Berechnungen noch nicht vollständig festgelegt, daher wird hier das KWKG zum Stand von 2016 betrachtet.

## 2.6 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Äquivalent

Die Bewertung der Effizienz eines einzelnen BHKWs kann anhand der Wirkungsgrade erfolgen. Wird jedoch ein vollständiges Energiesystem betrachtet, so werden Energieströme unterschiedlicher Energieformen aus mehreren Quellen analysiert. Einzelne Wirkungsgrade verlieren an Aussagekraft. Abhilfe schafft der Primärenergiebedarf (PE-Bedarf) eines Energiesystems. Dieser ermöglicht es, den Energiebedarf eines aus beliebigen Komponenten zusammengesetzten Energiesystems zu bewerten, zum Beispiel bei Einsatz eines BHKWs mit Gas-Brennwertkessel und Power-to-Heat-Anlage. Äquivalent dazu kann der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Gebäudeenergiesystems anhand der CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emission (engl.: CO<sub>2</sub> equivalent emission, CEE) betrachtet werden, wenn die kraftstoffspezifische Klimafreundlichkeit einer Anlage untersucht werden soll.

Zur Berechnung des PE-Bedarfs sowie der CEE von Gebäuden mit und ohne KWK kommen die Berechnungsvorschriften nach EnEV 2016 beziehungsweise GEG 2020 und DIN V 18599-1 und -9

zum Einsatz [81]. Die Bilanzgrenze wird um die Wärme- und Stromerzeuger gelegt. Ist ein BHKW vorhanden und steht dieses in direktem „räumlichen Zusammenhang“ mit dem Gebäude, so ist das BHKW als Teil des Gebäudeenergiesystems zu sehen. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2.9 für ein Referenzgebäude ohne KWK, wie im GEG 2020 definiert, sowie ein Gebäude mit KWK dargestellt.



**Abbildung 2.9:** Berechnung des PE-Bedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen – Bilanzgrenzen und Energieströme für ein Referenzgebäude und ein Gebäude mit KWK

Für den produzierten KWK-Strom wird angenommen, dass dieser vollständig in das Übertragungsnetz eingespeist und der gesamte Strombedarf bezogen wird. Mit einem PE- oder CEE-Faktor für den im Netz verdrängten Strommix wird der KWK-Strom der KWK-Wärme- und Stromproduktion gutgeschrieben [81]–[83]. Kraftwerke mit hohem CO<sub>2</sub>-Ausstoß sollen verdrängt werden, erneuerbaren Energien wird hingegen Vorrang eingeräumt. Der PE-Faktor für den sogenannten „Verdrängungsstrommix für KWK“ (engl.: displacement mix) liegt daher deutlich über dem Wert für netzbezogenen Strom. Dennoch werden auch heute noch regelmäßig erneuerbare Energien durch fossile Energiequellen verdrängt [24].

Zur Berechnung des PE-Bedarfs und der CEE kommen die Allokations- und Stromgutschriftmethode zum Einsatz. Die Stromgutschriftmethode berücksichtigt, dass dem mittels KWK erzeugter Strom bei der Einspeisung ins Netz Vorrang vor Strom aus fossilen Quellen eingeräumt wird [25], [84].

Werden neu errichtete Gebäude mit Wärme aus KWK versorgt oder ein Bestandsgebäude aus einem solchen beliefert und ist die KWK-Anlage hocheffizient, so kann für die Wärme ein reduzierter PE-Faktor angesetzt werden. Um diese Berechnung zu ermöglichen, wird der Gas-Verbrauch der KWK-Anlage  $E_{G,CHP}$  mittels Gleichungen (2.30) und (2.31) anhand der Stromkennzahl auf den Gasverbrauch für die Wärme-  $E_{G,CHP,th}$  und Strombereitstellung  $E_{G,CHP,el}$  aufgeteilt:

$$E_{G,CHP,th} = E_{G,CHP} \frac{1}{1+s} \quad (2.30)$$

$$E_{G,CHP,el} = E_{G,CHP} \left(1 - \frac{1}{1+s}\right) \quad (2.31)$$

Damit kann anhand von Gleichung (2.32) der PE-Bedarf  $Q_P$  berechnet werden. Gleichung (2.33) definiert die CO<sub>2</sub>-Emissionen  $m_{CO_2}$  eines Gebäudes mit KWK.

$$Q_P = f_{P,G,CHP} E_{G,CHP,th} + f_{P,G} (E_{G,CHP,el} + E_{G,GK}) + f_{P,el} E_{el,Zuk} - f_{P,el,DM} E_{el,Esp} \quad (2.32)$$

$$m_{CO_2} = f_{CO_2,G,CHP} E_{G,CHP,th} + f_{CO_2,G} (E_{G,CHP,el} + E_{G,GK}) + f_{CO_2,el} E_{el,Zuk} - f_{CO_2,el,DM} E_{el,Esp} \quad (2.33)$$

mit den PE-Faktoren  $f_P$ , den CEE-Faktoren  $f_{CO_2}$ , dem Gasbedarf eines Gaskessels  $E_{G,GK}$ , dem Strombezug aus dem Netz  $E_{el,Zuk}$  und dem in das öffentliche Netz eingespeisten Strom  $E_{el,Esp}$  mit



zugehörigen Faktoren nach Verdrängungsmix  $f_{P,el,DM}$  und  $f_{CO_2,el,DM}$ . Sind die Voraussetzungen für einen reduzierten Faktor  $f_{P,G,CHP}$  für die KWK-Wärme erfüllt, so kann dies berücksichtigt werden, äquivalentes gilt für den CEE-Faktor  $f_{CO_2,G,CHP}$ . Da das Kriterium eines neu errichteten Gebäudes nicht für alle Anlagen im Vergleich sichergestellt werden kann, gilt in dieser Arbeit durchgängig  $f_{P,G,CHP} = f_{P,G}$  beziehungsweise  $f_{CO_2,G,CHP} = f_{CO_2,G}$ .

PE- und CEE-Faktoren können dem GEG 2020 entnommen werden. Andere CEE-Faktoren sind zum Beispiel 427 gCO<sub>2</sub>/kW/h für den Strombezug nach dem aktuellen Strommix [85] und 810 gCO<sub>2</sub>/kW/h für den Verdrängungsmix nach einer Prognose der Prognos AG für das Jahr 2020 [86]. Hier wird mit den Werten des GEG 2020 gerechnet, siehe Tabelle 2.3.

**Tabelle 2.3:** PE-Faktoren und CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionsfaktoren, nach GEG 2020, Displacement Mix der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE-DM) am Beispiel Deutschlands ohne Nuklearenergie [87].

		PE-Faktor $f_P$		CEE-Faktor $f_{CO_2, gCO_2/kW/h}$	
		GEG 2020	FfE-DM [87]	GEG 2020	FfE-DM [87]
Strom	Netzbezug	1,8	-	560	-
	Verdrängungsmix KWK	2,8	2,94	860	1100
Wärme	Erdgas	1,1	-	240	-
	Heizöl	1,1	-	310	-
	Steinkohle	1,1	-	400	-
	Braunkohle	1,2	-	430	-

Der Verdrängungsmix für KWK bedarf einer genaueren Betrachtung. Dieser wurde unter anderem in [88] entwickelt, um den Wert von KWK-Strom anhand der Systemdienlichkeit zu bewerten. Eine Weiterentwicklung als Displacement Mix verallgemeinerte dieses Konzept auf alle EU28-Staaten und unter Berücksichtigung von Nuklearenergie [87]. Der Displacement Mix wurde nicht für dezentrale Klein-KWK entwickelt. Diese erfüllt jedoch gerade aufgrund der kleinen Leistungsgröße die Voraussetzung, dass die Stromerzeugung im Vergleich zum gesamten Stromnetz „marginal“ sein muss. Weiterhin wird dieser Ansatz des Verdrängungsmix mittlerweile auch von offizieller Seite für Gebäudeenergiesysteme angewandt [25], [83]. Daher wird der Displacement Mix im Folgenden zur Einordnung der PE- und CEE-Einsparungen im internationalen Kontext mit und ohne Nuklearenergie verwendet. Ausgewählte PE- und CEE-Faktoren des Displacement Mix sind in Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Die Evaluierung der PE- und CEE-Reduktion erfolgt in Relation zu einem baugleichen Referenzgebäude ohne KWK. Dazu wird angenommen, dass der gesamte Strombedarf des Referenzgebäudes aus dem öffentlichen Netz bezogen wird, während die Wärme mittels eines Gas-Brennwertkessels zur Verfügung gestellt wird. Für die PE-Einsparung  $Q_{P,red}$  ist Gleichung (2.34) gültig, bezüglich der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen gilt Gleichung (2.35). Der Index *ref* kennzeichnet den Wert des Referenzgebäudes.

$$Q_{P,red} = \frac{Q_{P,ref} - Q_P}{Q_{P,ref}} \quad (2.34)$$

$$m_{CO_2,red} = \frac{m_{CO_2,ref} - m_{CO_2}}{m_{CO_2,ref}} \quad (2.35)$$

Diese Methodik zur Bewertung der PE- und CEE-Reduktion eines Energiesystems kann in einer Vielzahl an Fachliteratur gefunden werden, unter anderem [37], [89].



## 3 Grundlagen der Numerik und angewandten Statistik

Für den Transfer der Ergebnisse des Feldtests auf allgemeine Anwendungsfälle wird ein speziell auf die Simulation von TWE-Anlagen angepasstes Simulationsprogramm von Grund auf programmiert. Dieses wird vorgestellt und bezüglich der Funktionsweise erläutert. Anschließend erfolgt eine statistische Planung der Simulationsdurchläufe sowie eine statistische Verwertung der Ergebnisse der Simulation. Verfahren, die zum Verständnis der verwendeten Methoden benötigt werden, sollen in diesem Abschnitt kurz thematisiert und erläutert werden.

### 3.1 Numerische Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen

Eine Vielzahl physikalischer Phänomene und Vorgänge wird durch Differentialgleichungen beschrieben. Eine Differentialgleichung besteht aus mindestens einer Ableitung einer Funktion nach einer Variablen, zum Beispiel der Zeit oder einer Raumkoordinate. Sind die Ableitungen der Funktionen nur von einer Variablen abhängig, so spricht man von gewöhnlichen Differentialgleichungen, andernfalls liegt eine partielle Differentialgleichung vor. Eine wichtige Unterklasse davon sind parabolische partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung. Diese beschreiben häufig zeit- und raumabhängige Phänomene. Ein bekannter Vertreter hiervon ist die Wärmeleitungsgleichung [90], [91].

Die meisten physikalisch und technisch relevanten Differentialgleichungen sind nicht oder nur bei speziellen Randbedingungen analytisch lösbar. In der Regel kommen daher numerische Methoden zum Einsatz. Der zu berechnende Raum sowie der Zeitstrahl werden dazu in eine endliche Anzahl an Gitterpunkten diskretisiert, an welchen die Gleichungen ausgewertet werden. Hierzu existieren verschiedene Verfahren, zum Beispiel die Finite-Volumen-, Finite-Elemente-, Finite-Differenzen- oder Randelement-Methoden. Zur Lösung mathematischer Probleme aus den Bereichen der Strömungsmechanik und Thermodynamik wird häufig die Finite-Differenzen-Methode verwendet. Daher wird im Folgenden in Abschnitt 3.1.1 gezielt die Finite-Differenzen-Methode behandelt. Nach der Diskretisierung und Vorgabe der Randbedingungen kommen numerische Verfahren zur approximierten Lösung des Anfangswertproblems zum Einsatz, siehe Abschnitt 3.1.2. Die einfachsten Vertreter sind das explizite sowie implizite Euler-Verfahren [92].

Das Finden analytischer Lösungen von Differentialgleichungen ist seit geraumer Zeit ein großer Bestandteil der Forschung. Insbesondere das Lösen nichtlineare Differentialgleichungen ist noch zu großen Teilen von numerischen Verfahren abhängig. Es konnte jedoch schon 1955 im Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou-Experiment gezeigt werden, dass auch für viele nichtlineare Gleichungen exakte Lösungen existieren müssen. Weiterhin war dieses Experiment die erste Anwendung von Computersimulationen zur Lösung von Differentialgleichungen und stellt damit einen Meilenstein im Bereich der numerischen Verfahren dar [93].

### 3.1.1 Diskretisierung und Finite-Differenzen-Methode

Zur numerischen Lösung werden Differentialgleichungen diskretisiert, das heißt von einem kontinuierlichen räumlichen und zeitlichen Zusammenhang in ein diskretes Gitter überführt. Mittels der Finite-Differenzen-Methode können die analytisch nicht lösbaren Ableitungen durch Differenzenquotienten an einer finiten Anzahl an Gitterpunkten approximiert werden. Die drei grundlegenden finiten Differenzen sind die Vorwärtsdifferenz, die Rückwärtsdifferenz und die zentrale Differenz. Während die ersten beiden Differenzen in der Thermo- und Fluidodynamik meistens nur für Ableitungen erster Ordnung verwendet werden, ist die Approximation von Ableitungen zweiter Ordnung ein typischer Anwendungsfall der zentralen Differenz [94].

Die Ableitung  $f'(x)$  einer eindimensionalen Funktion  $f(x)$  im Punkt  $x$  ist definiert als [95]:

$$f'(x) = \frac{dy}{dx} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{h} \quad (3.1)$$

mit der infinitesimal kleinen Schrittweite  $h$ . Um diese Ableitung numerisch zu berechnen, muss diese lokal angenähert werden. Für hinreichend kleine  $h > 0$  kann dazu eine Taylor-Reihe um den Punkt  $x$  entwickelt werden. Dies ist für einen Vorwärtsschritt in Gleichung (3.2) und für einen Rückwärtsschritt in Gleichung (3.3) dargestellt [94], [95].

$$f(x+h) = f(x) + \frac{1}{1!}f'(x)h + \frac{1}{2!}f''(x)h^2 + \frac{1}{3!}f'''(x)h^3 + \dots \quad (3.2)$$

$$f(x-h) = f(x) - \frac{1}{1!}f'(x)h + \frac{1}{2!}f''(x)h^2 - \frac{1}{3!}f'''(x)h^3 + \dots \quad (3.3)$$

#### 3.1.1.1 Vorwärts- und Rückwärtsdifferenz erster Ordnung, Upwind-Schema

Werden die Terme zweiter und höherer Ordnung vernachlässigt und wird die Taylor-Reihe für einen Vorwärtsschritt anschließend nach  $f'(x)$  aufgelöst, so resultiert die Vorwärtsdifferenz in Gleichung (3.4). Das gleiche Verfahren auf den Rückwärtsschritt angewandt ergibt die Rückwärtsdifferenz der ersten Ableitung in Gleichung (3.5). Der Abbruchfehler der Taylor-Reihe beträgt  $\mathcal{O}(h)$ . Für die numerische Berechnung der Ableitungen wird dieser vernachlässigt.

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} + \mathcal{O}(h) \quad (3.4)$$

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x-h)}{h} + \mathcal{O}(h) \quad (3.5)$$

Auf Transportterme wie eine Fluidströmung angewandt, werden beide Differenzen zum Upwind-Schema zusammengefasst. Eine Strömung in Gitterrichtung wird dann über eine Rückwärtsdifferenz diskretisiert, eine Strömung entgegen dieser mittels einer Vorwärtsdifferenz. Das Upwind-Schema hat eine hohe numerische Diffusion zur Folge, ist jedoch im Gegenzug zur zentralen Differenz auch für Konvektionsterme bedingt stabil.

### 3.1.1.2 Zentrale Differenz erster und zweiter Ordnung

Wird Gleichung (3.3) von Gleichung (3.2) subtrahiert, folgt daraus das zentrale Differenzschema erster Ordnung mit einem Abbruchfehler von  $\mathcal{O}(h^2)$ :

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x-h)}{2h} + \mathcal{O}(h^2) \quad (3.6)$$

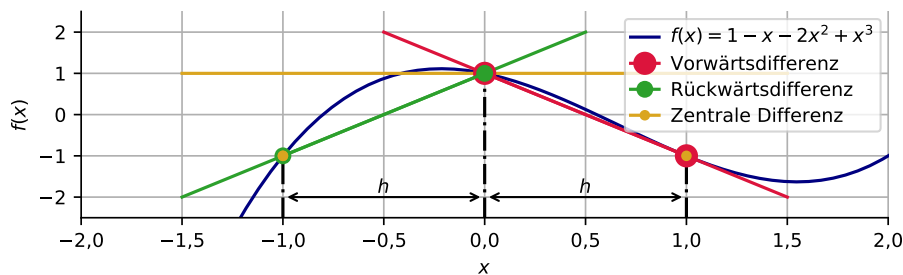
Eine von-Neumann-Stabilitätsanalyse eines mittels zentraler Differenz diskretisierten Konvektionsterms zeigt, dass die Lösung instabil ist, siehe auch Abschnitt 5.1.2.1.

Die zentrale Differenz zweiter Ordnung kann durch das Aufsummieren von Gleichungen (3.2) und (3.3), vernachlässigen höherer Terme und Auflösen nach  $f''(x)$  hergeleitet werden:

$$f''(x) = \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} + \mathcal{O}(h^4) \quad (3.7)$$

Der Abbruchfehler beträgt  $\mathcal{O}(h^4)$ . Der Abbruchfehler sinkt mit kleiner werdender Gitterweite und für hinreichend kleine Schrittweiten  $h$  mit der Ordnung des Schemas.

Die Berechnung des Gradienten am Punkt  $x$  der Funktion  $f(x)$  mittels der zuvor eingeführten finiten Differenzen erster Ordnung ist in Abb. 3.1 anhand einer kubischen Funktion verdeutlicht. Die verwendeten Stützstellen sind markiert.

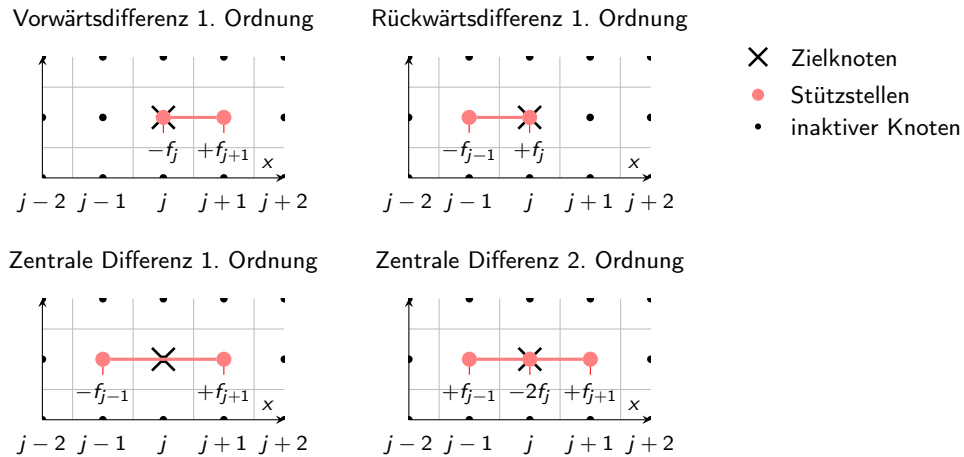


**Abbildung 3.1:** Approximation der Ableitungen einer Funktion mittels Vorwärts-, Rückwärts- und zentraler Differenz sowie jeweils verwendete Stützstellen

Die finiten Differenzen werden üblicherweise anhand eines Stencils klassifiziert. Dieser beschreibt die Anzahl der Gitterpunkte, die zur numerischen Auswertung einer Ableitung an einem Zielknoten notwendig ist. Dies ist in Abb. 3.2 anhand eines kompakten Stencils für eine Raumdimension dargestellt.

### 3.1.2 Numerische Verfahren zur Lösung von Anfangswertproblemen

Numerische Verfahren zur Lösung von Anfangswertproblemen werden vorrangig nach der Diskretisierung der nach der Zeit abgeleiteten Terme unterschieden. Ist ein Verfahren nur von aktuellen oder vergangenen Werten abhängig, wird es als explizit bezeichnet. Implizite Verfahren beziehen hingegen in der Zukunft liegende Werte mit ein. Das Gleichungssystem ist in der Regel nichtlinear. Unterschiede zwischen expliziten und impliziten Verfahren werden in Abschnitt 3.1.2.1 kurz erläutert. Weiterhin



**Abbildung 3.2:** Kompakter Stencil finiter Differenzenschemata in einer Raumdimension; Berechnungsvorschrift bezüglich des Zielknotens exklusive Nenner

werden die Verfahren in Ein- und Mehrschrittverfahren unterschieden, siehe Abschnitt 3.1.2.2.

Zur Beschreibung der Verfahren wird definiert, dass für die Ableitung einer Differentialgleichung nach der Zeit  $y'(t, \dots)$ , den Anfangswert  $y(t_0)$  und den Zeitpunkt  $t_i$  in Abhängigkeit von der Schrittweite  $h$  und der Anzahl Schritte  $n$  gilt [94]:

$$y'(t) = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0, \quad t_i = t_0 + nh \quad (3.8)$$

Der Index oder die hochgestellte Ziffer  $i$  bezeichnen im Folgenden immer Zeitschritte, während sich  $j$  auf eine räumliche Diskretisierung bezieht.

### 3.1.2.1 Explizite und implizite Verfahren

**Explizite Verfahren** Numerische Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen werden in explizite und implizite Verfahren unterteilt. Explizite Verfahren nutzen eine Vorwärtsdifferenz oder ähnliche Differenzen ohne Einbezug in der Zukunft liegender Werte, um die Zeitableitung abzubilden. Alle zur numerischen Lösung der Differentialgleichung benötigten Informationen können somit aus vorigen Zeitschritten entnommen werden. Die zu lösenden Gleichungssysteme sind linear. Das einfachste Verfahren dieser Art ist das explizite Euler-Verfahren. Die Ableitung nach der Zeit wird durch eine Vorwärtsdifferenz ersetzt. Es resultiert das Lösungsverfahren [90]:

$$y_{i+1} = y_i + hf(t_i, y_i) \quad (3.9)$$

Explizite Verfahren zeichnen sich durch einen geringen Rechenaufwand aus, da alle benötigten Werte explizit gegeben sind. Bei gleichem Rechenaufwand mit impliziten Verfahren sind explizite Verfahren daher genauer. Wird die Schrittweite zu groß und/oder beinhaltet die Differentialgleichung steife Terme, sind explizite Verfahren jedoch nicht stabil. Die Einhaltung der Stabilitätskriterien kann zu sehr kleinen Schrittweiten führen, bis ein Fortschritt der Berechnungen verhindert wird. Explizite Verfahren sind daher vorrangig für nicht-steife Differentialgleichungen oder hohe Auflösungen geeignet.

**Implizite Verfahren** Bei impliziten Verfahren ist hingegen auf beiden Seiten der Gleichung eine Abhängigkeit von  $i + n$  mit  $n > 1$  gegeben, das heißt erforderliche Funktionswerte sind nur implizit gegeben. Informationen des neuen Zeitschritts werden zur Lösung benötigt. In der Regel müssen nichtlineare Gleichungssysteme gelöst werden. zum Beispiel mittels iterativer Verfahren wie fixed-point Iteration. Die Grundlage dieser Verfahren bildet das implizite Euler-Verfahren auf Basis der Rückwärtsdifferenz, wie in Gleichung (3.10) aufgeführt [91].

$$y_{i+1} = y_i + h f(t_{i+1}, y_{i+1}) \quad (3.10)$$

Die aufwändige Lösung impliziter Verfahren bedeutet einen erheblichen Rechenaufwand. Im Gegenzug sind viele Verfahren A-stabil, das heißt die Verfahren sind unbedingt stabil und entwickeln keine Oszillationen, und erlauben somit auch bei steifen Differentialgleichungen große Schrittweiten, sofern der mit der Schrittweite ansteigende lokale Diskretisierungsfehler akzeptabel ist. Ein insbesondere im Bereich der Wärmeleitung und vergleichbarer partieller Differentialgleichungen verwendetes implizites Verfahren ist das Crank-Nicolson-Verfahren [91]. Für einige Verfahren gelten zusätzliche Einschränkungen bezüglich der Stabilität, wie die zweite Dahlquist-Barriere bei Mehrschrittverfahren [96].

### 3.1.2.2 Mehrstufige Verfahren, Mehrschrittverfahren

Numerische Verfahren werden weiterhin anhand der Anzahl der Stufen und Schritte unterschieden.

**Mehrstufige Verfahren** Mehrstufige Verfahren verwenden zusätzliche Stufen zwischen  $y_i$  und  $y_{i+1}$ , um eine genauere Approximation der Differentiale zu erreichen. Ein einfaches explizites mehrstufiges Verfahren ist die Mittelpunkt-Methode [90]:

$$y_{i+1} = y_i + h f\left(t_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{h}{2} f(t_i, y_i)\right) \quad (3.11)$$

Im Gegensatz zu einer Halbierung der Schrittweite bei der expliziten Euler-Methode werden die Ergebnisse beider Stufen in das Ergebnis einbezogen. Der Abbruchfehler liegt dadurch bei  $\mathcal{O}(h^2)$ . Eine bekannte Klasse der mehrstufigen Verfahren sind die Runge-Kutta-Methoden [97].

**Mehrschrittverfahren** Mehrschrittverfahren beziehen die Ergebnisse mehrerer vollständiger vorangegangener Schritte ein, um mittels der schon vorhandenen Informationen eine hohe Konsistenz und Konvergenz zu erreichen. Zu den Mehrschrittverfahren zählen die expliziten Adams-Bashforth- und die impliziten Adams-Moulton-Methoden und BDF-Verfahren [90], [91].

Für die Abbildung technischer Zusammenhänge mit Randbedingungs- und Regler-induzierten Sprüngen der Geschwindigkeitsfelder und Transportgrößen zeigen Mehrschrittverfahren eine geringe Eignung, da Ereignisse durch den Einbezug vorangegangener Schritte gedämpft werden.

### 3.1.2.3 Kondition, Konsistenz, Stabilität, Konvergenz

Die numerische Lösung von Differentialgleichungen wird im Allgemeinen durch die drei Bedingungen der Kondition, Konsistenz und Stabilität bestimmt. Sind diese Kriterien erfüllt, ist die Konvergenz der Lösung zu erwarten [98].

**Kondition** Intensität der Schwankung des Problems bei Störung der Eingangsdaten

**Stabilität** Intensität der Schwankung der Lösung des Algorithmus bei Störung der Eingangsdaten

**Konsistenz** Qualität der Lösung des Algorithmus bei exakten Eingangsdaten

**Konvergenz** Qualität der Lösung des Algorithmus bei gestörten Eingangsdaten

Nach dem Äquivalenzsatz von Lax ist eine Finite-Differenzen-Methode zur numerischen Lösung eines lineares Anfangswertproblem, insbesondere mit Bezug auf partielle Differentialgleichungen, nur dann konvergent, wenn sie gleichzeitig konsistent und Lax-Richtmyer-stabil ist [99].

### 3.2 Konvektions-Diffusions-Reaktions-Gleichung

Aus der Kontinuitätsgleichung (3.12) mit der Erhaltungsgröße  $u$  und der Stromdichte  $\vec{j}$  [100], [101]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (3.12)$$

folgt durch Einsetzen der Summe des 1. Fick'schen Gesetzes für Diffusion mit dem Diffusionstensor  $\mathbf{D}$  in Gleichung (3.13) und des Konvektionsterms bezüglich des Geschwindigkeitsfeldes  $\vec{v}$  in Gleichung (3.14)

$$\vec{j}_D = -\mathbf{D} \vec{\nabla} u \quad (3.13)$$

$$\vec{j}_K = \vec{v} u \quad (3.14)$$

$$\vec{j} = \vec{j}_D + \vec{j}_K \quad (3.15)$$

in die Stromdichte  $\vec{j}$  in Gleichung (3.12) die Konvektions-Diffusions-Gleichung für anisotrope sowie nicht von der Erhaltungsgröße abhängige  $D$  und kompressible Fluide. Die Einführung eines Reaktionsterms  $R$  erlaubt die Betrachtung zusätzlicher Quellen oder Senken. Es folgt die Konvektions-Diffusions-Reaktions-Gleichung (3.16). Der Diffusionsterm ist eine parabolische partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung, der Konvektionsterm eine hyperbolische partielle erster Ordnung. Für isotrope Diffusionskoeffizienten  $D$  und inkompressible Fluide kann diese, wie in Gleichung (3.17) gezeigt, vereinfacht werden:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\mathbf{D} \vec{\nabla} u) - \vec{\nabla} \cdot (\vec{v} u) + R \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \Delta u - \vec{v} \cdot \vec{\nabla} u + R \quad (3.17)$$

mit dem Gradienten  $\vec{\nabla}$ , der Divergenz  $\nabla \cdot$  und dem Laplace-Operator  $\Delta$ . Die Konvektions-Diffusions-Reaktions-Gleichung beschreibt Transportphänomene bezüglich der Erhaltungsgröße  $u$  und der Zeit  $t$ . Eine alternative Herleitung der Gesetzmäßigkeit kann über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik erfolgen.



### 3.2.1 Wärmeübertragung in Fluiden

Wird die Konvektions-Diffusions-Reaktions-Gleichung für die Berechnung der Wärmeübertragung angewandt, so ist die Erhaltungsgröße die Temperatur  $\theta$ , siehe Gleichung (3.18). Der konvektive Transport wird anhand des Geschwindigkeitsfeldes  $\vec{v}$  beschrieben, der diffusive durch den Diffusionstensor  $\mathbf{D}$ . Unter normalen Bedingungen kann für eine Wasserströmung Inkompressibilität angenommen werden. Für die Wärmeübertragung in Wasser und Stahl sind die Medien in guter Näherung homogen. Folglich ist die vereinfachte Gleichung (3.17) gültig. Der Diffusionskoeffizient  $D$  entspricht nach Gleichung (3.19) dem Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  zum Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität  $c$  und der Dichte  $\rho$  [100].

$$u = \theta(x, y, z, t) \quad (3.18)$$

$$D = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (3.19)$$

Daraus folgt die Konvektions-Diffusions-Reaktions-Gleichung im dreidimensionalen kartesischen Raum:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta \theta - \vec{v} \vec{\nabla} \theta + R \quad (3.20)$$

$$= \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) - \vec{v} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + R \quad (3.21)$$

Für  $\vec{v} = 0$  geht sie in die Wärmeleitungsgleichung über. Der Reaktionsterm kann eine interne Wärmequelle oder -senke, zum Beispiel aufgrund einer chemischen Reaktion oder einer Beheizung, modellieren. Der Reaktionsterm wird in diesem Fall mit dem volumenspezifischen Wärmestrom  $\dot{q}$  zu:

$$R = \frac{\dot{q}}{c\rho} \quad (3.22)$$

### 3.2.2 Überführung in Gleichungen des stationären Wärme- und Stofftransports

Eine Approximierung der Konvektions-Diffusions-Gleichung ohne Reaktionsterm für die Erhaltungsgröße  $u = \theta$  kann in die allgemeinen Gleichungen des Wärme- und Stofftransports überführt werden. Dazu wird der Diffusionsterm für  $v = 0$  mit einer zentralen Differenz zweiter Ordnung angenähert:

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = D \frac{\theta_{j+1}^i - 2\theta_j^i + \theta_{j-1}^i}{\Delta x^2} \quad (3.23)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (3.19) und anschließender Multiplikation mit  $m c_p$ , der Masse der Kontrollvolumina und der spezifischen Wärmekapazität, folgt mit der wärmedurchströmten Fläche  $A$  für  $m = \rho A \Delta x$  das Fouriersche Gesetz für drei Stützstellen in Gleichung (3.24). Mit der Definition des Wärmedurchgangskoeffizienten  $U$ , auch U-Wert, ergibt sich die verallgemeinerte Gleichung (3.25).

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} m c_p = \frac{\Delta Q_j^i}{\Delta t} = \lambda A \frac{\theta_{j+1}^i - 2\theta_j^i + \theta_{j-1}^i}{\Delta x} \quad \left| \quad U = \frac{\lambda}{\Delta x} \quad (3.24)$$

$$\dot{Q}_j^i = U A (\theta_{j+1}^i - 2\theta_j^i + \theta_{j-1}^i) \quad (3.25)$$

Für  $D = 0$  und  $v \neq 0$  sowie Diskretisierung des Konvektionsterms mittels Rückwärtsdifferenz in Gleichung (3.26) kann diese äquivalent durch Multiplikation mit  $mc_p$  und Ersetzen von  $vm = \dot{m}\Delta x$  umgeformt werden. Es folgt Gleichung (3.27) für die Energiebilanz  $\dot{Q}_j^i$  des Kontrollvolumens  $j$  zum Zeitpunkt  $i$  für den Massenstrom  $\dot{m}$  über die Systemgrenze:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = -v \frac{\theta_j^i - \theta_{j-1}^i}{\Delta x} \quad (3.26)$$

$$\dot{Q}_j^i = \dot{m}c_p (\theta_{j-1}^i - \theta_j^i) \quad (3.27)$$

mit der Temperatur des in die Zelle einfließenden Mediums  $\theta_{j-1}^i$  und des ausfließenden Mediums  $\theta_j^i$ .

### 3.3 Angewandte Statistik

Die Statistik bildet die Grundlage jeglicher Datenverarbeitung. Dies fängt bei der einfachen Definition von Kennzahlen wie Residuen oder Fehlerwerten an und geht bis zu komplexen Verfahren aus den Bereichen des maschinellen Lernens. Statistische Verfahren ermöglichen es, einen Transfer von einer begrenzten Anzahl an Beobachtungen auf eine allgemeine Behandlung des Sachverhalts zu vollziehen. Hier wird ein kurzer Überblick der verwendeten Verfahren gegeben, um alle im Anschluss verwendeten Methoden nachvollziehen zu können.

#### 3.3.1 Kennzahlen

Für die Berechnung der statistischen Kennzahlen gelten die folgenden Symbole:

$N$  Größe der Grundgesamtheit

$n$  Iterationsindex einer Stichprobe der Grundgesamtheit

$P$  Anzahl der Parameter

Alle Kennzahlen verwenden die Bessel-Korrektur, um die Abschätzung des Mittelwertes und der Varianz anhand von Stichproben anstatt der Grundgesamtheit zu korrigieren. Das heißt die Größe der Stichprobe wird mit  $N - 1$  anstelle von  $N$  bewertet [102].

**Residuen** Die Residuen sind definiert als die Abweichungen zwischen dem beobachteten Wert  $y$  und dem geschätzten Wert  $\hat{y}$ :

$$\varepsilon = y - \hat{y} \quad (3.28)$$

**Normalisierter mittlerer Fehler** Der normalisierte mittlere Fehler (eng.: normalized mean signed error, NME) ist definiert nach Gleichung (3.29). Durch die Normierung mit dem Mittelwert  $\bar{y}$  ist ein skalunenabhängiger Vergleich möglich. Die Residuen werden linear bewertet, das heißt der NME ist nicht sensitiv für Ausreißer. Nach [103] ist ein  $|NME| \leq 0,05$  ein Zeichen für eine gute Vorhersage bei Simulationen.

$$NME = \frac{1}{\bar{y}} \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \varepsilon_n \quad (3.29)$$

**Mittlere quadratische Abweichung und davon abgeleitete** Die mittlere quadratische Abweichung (engl.: mean squared error,  $MSE$ ) ist definiert in Gleichung (3.30). Davon abgeleitet sind die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (engl.: root-mean-square error,  $RMSE$ ) sowie  $CV(RMSE)$ , der Variationskoeffizient der  $RMSE$ , in Gleichungen (3.31) und (3.32).

$$MSE = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \varepsilon_n^2 \quad (3.30)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (3.31)$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{y}} RMSE \quad (3.32)$$

Da die Residuen quadriert werden, sind der  $MSE$ ,  $RMSE$  und  $CV(RMSE)$  insbesondere sensitiv für Ausreißer. Der  $MSE$  wird häufig als zu minimierende Fehlergröße in Algorithmen der linearen Regression verwendet. Der mit dem Mittelwert  $\bar{y}$  normierte  $CV(RMSE)$  ermöglicht einen Vergleich der Kennzahlen unabhängig von der Skalierung der Variablen. Bei Simulationen zur energetischen Bewertung von Gebäuden wird bei einem  $CV(RMSE) \leq 0,2$  eine hohe Genauigkeit erreicht [103].

**Determinationskoeffizient** Der Determinationskoeffizient ( $R^2$ ) in Gleichung (3.33) beschreibt den Anteil der Varianz einer Zielvariable, der durch die unabhängigen Variablen erklärt werden kann. Da die erklärte Varianz bei Hinzufügen von unabhängigen Variablen zu einem Modell auch dann nicht geringer werden kann, wenn die hinzugefügten Variablen nicht zur Varianz beitragen, kann ein hoher Wert eine Überanpassung oder Variableninflation verschleiern. Daher wird hier ausschließlich der adjustierte Determinationskoeffizient  $R_{adj}^2$  in Gleichung (3.34) verwendet, welcher mit einer höheren Anzahl an Parametern  $P$  abnimmt [104].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N \varepsilon_n}{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})} \quad (3.33)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N-1}{N-P-1} \quad (3.34)$$

**Multikollinearität** Als Multikollinearität wird eine starke Korrelation zwischen zwei oder mehr unabhängigen Variablen bezeichnet. Eine hohe Multikollinearität führt zu instabilen Regressionsverfahren. Die Konvergenz der Verfahren wird erschwert oder verhindert. Auch die Aussagekraft eines berechneten Modells nimmt ab. Bei der Interpretation des Modells wird es schwierig, die Effekte der einzelnen Variablen getrennt zu beurteilen. Moderne Regressionsverfahren aus dem Bereiche des Maschinellen Lernens mildern einen Teil dieser Probleme anhand von Regularisierungsalgorithmen ab. Dennoch sollte auf eine geringe Multikollinearität der Parameter geachtet werden.

Zur Beurteilung der Multikollinearität werden verschiedene Kennzahlen herangezogen. Der Korrelationskoeffizient  $\mathbb{C}$  zwischen zwei Variablen stellt die einfachste Beurteilung dar, kann eine Multikollinearität ohne weitere Kennzahlen jedoch nicht bestätigen oder ausschließen. Der Pearson-Korrelationskoeffizient ist nach Gleichung (3.35) mit der Standardabweichung  $\sigma$  definiert. Für nichtlineare Zusammenhänge bietet sich die Verwendung des Spearman Rangkorrelationskoeffizienten an. Ein zweiter Schritt ist die Berechnung des Varianzinflationsfaktors  $VIF$  über das Bestimmtheitsmaß der partiellen Regressionsanalysen zwischen den Variablen, siehe Gleichung (3.36). Zudem sollten die Konditionsindizes  $KI_j$  des Parametergitters  $\mathbf{X}(j, i)$  mit  $i$  Parametern und  $j$  Stichproben beurteilt werden. Diese werden nach

Gleichung (3.37) mit den Eigenwerten  $\lambda_i$  der Matrix  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  berechnet [105]. Eine detaillierte Definition des Parametergitters beziehungsweise der Design-Matrix  $\mathbf{X}$  erfolgt in Abschnitt 3.3.2.2.

$$\mathbb{C} = \frac{\sigma_{x_1, x_2}}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} \quad (3.35)$$

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (3.36)$$

$$KI_i = \sqrt{\frac{\lambda_i}{\min(\lambda)}} \quad (3.37)$$

Werte von  $\mathbb{C} > 0,6$ ,  $KI_i > 30$  und  $VIF_i > 10$  werden im Allgemeinen als Anzeichen für das Vorhandensein einer starken Multikollinearität gewertet. Als verlässlichster Parameter wird häufig der Konditionsindex betrachtet.

### 3.3.2 Regressionsanalyse - Maschinelles Lernen

Mit einer Regressionsanalyse kann die Beziehung zwischen mehreren Variablen statistisch modelliert werden. Es gelten die folgenden Bezeichnungen:

$y$  - Abhängige Variable, Zielvariable oder Regressand

$x$  - Unabhängige Variable, Parameter, Einflussgröße, Zufallsvariable oder Regressor

Die lineare Regression ist die älteste Variante zur Abschätzung einer linearen Funktion, die einen Zusammenhang zwischen einer unabhängigen und einer abhängigen Variable herstellt. Bei mehreren unabhängigen Variablen liegt eine multiple Regression vor, bei mehreren abhängigen eine multivariate. Dennoch ist die lineare Regression auch heute aktueller Gegenstand der Forschung und wird in großem Umfang in Wissenschaft und Industrie eingesetzt. Das Aufkommen neuer Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens hat dem Thema neuen Auftrieb verliehen. Die Berechnung der Koeffizienten wird dadurch einfacher und robuster. Auch zuvor schwierig zu lösende Probleme wie  $P > N$  können betrachtet werden [106], [107].

Der erste Schritt vor der Durchführung einer Regressionsanalyse sollte in jedem Fall, unabhängig vom verwendeten Algorithmus, das Aufteilen des Datensatzes in ein Trainings-Set zum Berechnen der Koeffizienten und einen Test-Satz zur finalen Validierung anhand ungesehener Daten sein. Ein übliches Verhältnis der Datenmengen liegt bei ca. 70 : 30, das heißt 30 % der Stichproben werden für die Validierung des Modells reserviert. Bei kategorischen Variablen können Besonderheiten wie die Stratifizierung der Daten gelten.

Im Anschluss an das Aufteilen der Daten folgt das Preprocessing. Dieses wird in der Regel in einer Verarbeitungs-Pipeline zusammengefasst, welche mittels des Trainings-Sets trainiert wird.

Nach der Vorverarbeitung wird das Regressionsmodell berechnet. Hierzu kommt in den Bereichen des maschinellen Lernens häufig eine automatische Kreuzvalidierung und Hyperparameteroptimierung zum Einsatz. Auch dies ist Teil der Pipeline zur Datenverarbeitung.

Das berechnete Modell wird anschließend mittels des Test-Datensatzes validiert. Abschließend folgt die Interpretation des Modells. Dies kann bei geeigneten Modellen und geeignetem Preprocessing entweder anhand der Modell-Koeffizienten geschehen oder im Allgemeinen mittels Modell-agnostischer Methoden, welche unabhängig von Art und Algorithmus sind.

### 3.3.2.1 Preprocessing

Das Preprocessing eines für maschinelles Lernen zu verwendenden Datensatzes zielt darauf ab, diesen Datensatz in ein für den Algorithmus möglichst einfach verständliches Format zu übertragen. Weiterhin können durch eine geeignete Vorverarbeitung höhergradige Terme und kategorische Variablen abgebildet, die Interpretierbarkeit eines Modells gesteigert und die Dimensionalität bei vergleichbarer Varianz reduziert werden.

Die Anwendung von Verfahren, welche die Anzahl der Parameter beeinflussen, sollte stets unter Beachtung des sogenannten „Fluches der Dimensionalität“, auch Hughes Phänomen genannt, erfolgen. Dieser besagt, dass die durchschnittliche Vorhersagekraft eines Klassifikators oder Regressionsmodells bei einer festen Anzahl an Stichproben zum Training eines Algorithmus zuerst mit der Anzahl der Dimensionen der Design-Matrix, das heißt mit der Anzahl der Parameter  $P$ , steigt bis ein Maximum erreicht ist und im Anschluss fällt [108]. Weiterhin können nur wenige Algorithmen eine Parameterzahl in der Größenordnung der Stichproben  $N$  verarbeiten. Häufig gilt die Voraussetzung  $N > P + 1$ . Allgemein wird für eine gute Vorhersagekraft  $N > 5P$  empfohlen. Darüber hinaus steigt der Rechenaufwand vieler Algorithmen in der Größenordnung von  $\mathcal{O}(P^2)$  [109] sowie die Gefahr einer Überanpassung [107]. Eine Reduktion der Dimensionalität der Design-Matrix sollte daher Teil eines jeden Daten-Preprocessings sein. Die Reduktion der Dimensionalität wird üblicherweise in die folgenden Schritte unterteilt:

**Feature Extraction** Auswahl von aus der ursprünglichen Design-Matrix abgeleiteten/veränderten Parametern, zum Beispiel anhand einer Hauptkomponentenanalyse

**Feature Selection** Auswahl der am besten geeigneten ursprünglichen Parameter, zum Beispiel anhand der erklärten Varianz oder durch  $\ell_1$ -regularisierte Algorithmen wie LASSO

**Standardisierung** Die Standardisierung bezeichnet eine Transformation einer Variable  $x$  auf den Erwartungswert null und die Varianz eins. Es folgt die standardisierte Zufallsvariable z-Score [104]:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (3.38)$$

mit dem Erwartungs- beziehungsweise Mittelwert  $\bar{x}$  und der Standardabweichung  $\sigma$ . Ist nur eine Stichprobe verfügbar, wird auch von einer Studentisierung gesprochen.

Eine Standardisierung vor Durchführung einer linearen Regression hat die folgenden Vorteile:

- Modell wird interpretierbar, da die Größe der Koeffizienten den relativen Einfluss auf die Zielvariable beziffert
- Sortierung der Koeffizienten ergibt Rangordnung nach Wichtigkeit für das Modell
- Konstante für den y-Achsen Schnittpunkt (Intercept) wird nicht benötigt
- Minimierung der Verlustfunktion  $S$  ist häufig sensitiv für die Varianz der Parameter
- Viele statistische Verfahren wie die Hauptkomponentenanalyse sind sensitiv für die Varianz

Die Interpretierbarkeit eines Modells ist jedoch nur dann gegeben, solange keine Kreuzkorrelation vorliegt [110]. Auch weiterführende Transformationen wie Box-Cox können die Interpretierbarkeit erschweren.

**Box-Cox-Transformation** Die Box-Cox-Transformation, eine Potenztransformation, zielt darauf ab, die Verteilung der Variablen zu normalisieren, um die Varianz zu stabilisieren und die Schiefeit zu minimieren. Die Box-Cox-Transformation kann nur auf strikt positive Daten angewandt werden. In der Regel werden die transformierten Variablen im Anschluss standardisiert [111]. Den Algorithmen vieler statistischer Verfahren unterliegt die Annahme normalverteilter Daten. Eine Normalisierung kann daher zu einer besseren Konvergenz und Vorhersagekraft führen.

**One-Hot-Encoding kategorischer Variablen** Kategorische Variablen müssen in quantitative Variablen kodiert werden, um in Regressionsalgorithmen verarbeitet werden zu können. Andernfalls würde beispielsweise die Kategorie 2 einer Variable bedeuten, dass der in die Berechnung der Koeffizienten einfließende Wert das Doppelte der Kategorie 1 beträgt. Bei kategorischen Variablen besteht dieser Zusammenhang jedoch nicht. Nicht numerische Kategorien müssen ohnehin in numerische Variablen transformiert werden. Eine Variante der Kodierung ist das One-Hot-Encoding, bei welchem jede Kategorie beziehungsweise Stufe einer kategorischen Variable in eine binäre Variable kodiert wird. Dies ist in Abb. 3.3 für zwei Variablen dargestellt.

$$\begin{array}{c} n \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \begin{array}{cc} \text{BHKW} & \text{Status} \\ \left( \begin{array}{cc} \text{an} & 1 \\ \text{an} & 1 \\ \text{aus} & 0 \\ \text{an} & 2 \end{array} \right) & \rightarrow & \begin{array}{c} n \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \begin{array}{ccccc} \text{BHKW-an} & \text{BHKW-aus} & \text{Status-0} & \text{Status-1} & \text{Status-2} \\ \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)
 \end{array}$$

**Abbildung 3.3:** One-Hot-Encoding der kategorischen Variablen „BHKW“ und „Status“ mit zwei beziehungsweise drei Stufen

Für eine Variable mit  $n$  Stufen resultieren  $P^* = n$  binäre Ersatzvariablen. Eine ausgewählte Referenzkategorie beziehungsweise -stufe wird häufig auf Null gesetzt und kann damit vernachlässigt werden. Im obigen Beispiel könnten zum Beispiel BHKW-aus und Status-0 als Referenzkategorie definiert werden. Es würden je Variable  $P^* = n - 1$  Ersatzvariablen resultieren. Dadurch kann die Kollinearität auf Kosten eines erhöhten Bias reduziert und eine Problemstellung mit großem  $P$  und kleiner Grundgesamtheit  $N$  vermieden werden. Diese Bedingungen sind insbesondere bei Algorithmen ohne Regularisierung oder bei neuronalen Netzen wichtig. Bei Algorithmen mit einer stabilen Regularisierung und Feature Selection wird hingegen empfohlen, keine Referenzkategorie zu definieren und deren Auswahl dem Algorithmus zu überlassen, um Kollinearität und Bias gleichermaßen gering zu halten.

**Polynomtransformation** Mittels einer Polynomtransformation  $T : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^d$  von Grad  $d$  der unabhängigen Variablen  $x_p$  mit  $p \in \{1, \dots, P\}$  kann eine lineare Regression auch höhergradige Terme  $x_p^{d_p}$  mit  $d_p \leq d$  oder Interaktionsterme  $x_1^{d_1} x_2^{d_2}$  mit  $d_1 + d_2 \leq d$  abbilden. Für die Polynomtransformation zweiten Grades einer Funktion zweier Parameter ergibt sich beispielsweise:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \xrightarrow{\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2} y^* = \beta_0^* + \beta_1^* x_1 + \beta_2^* x_2 + \beta_3^* x_1^2 + \beta_4^* x_1 x_2 + \beta_5^* x_2^2 \quad (3.39)$$

Die Anzahl  $P^*$  der aus der Transformation resultierenden Parameter ist über den Binomialkoeffizient in Gleichung (3.40) gegeben. Für höhere Grade kann auch ein zuvor gut gestelltes Problem schnell zu

einem  $P > N$ -Problem werden. Weiterhin macht die hohe Anzahl an Parametern Regressionen aus Polynomtransformationen anfällig für eine Überanpassung und den Fluch der Dimensionalität.

$$P^* = \binom{P+d}{P} \quad (3.40)$$

**Hauptkomponentenanalyse** Die Hauptkomponentenanalyse, häufig auch mit PCA (engl.: principal component analysis) abgekürzt, ist eine Methode zur Feature Extraction. Sie wird in der multivariaten Statistik eingesetzt, um mittels einer Singulärwertzerlegung die Linearkombinationen der Parameter zu finden, die eine geringe lineare Korrelation aufweisen und einen möglichst großen Anteil der Varianz des Datensatzes erklären. In der Regel kann damit die Dimensionalität eines Datensatzes reduziert werden. Dadurch sinkt der rechnerische Aufwand bei der Berechnung eines statistischen Modells. Bei vielen Modellen kann auch die Vorhersagekraft gesteigert werden. Die PCA ist sehr sensitiv bezüglich der Varianz der Variablen. Eine vorherige Standardisierung kann nötig sein [107]. Die Linearkombination der Variablen kann die menschliche Interpretierbarkeit des Modells erschweren oder auch erleichtern.

**Auswahl geeigneter Parameter** Eine Variante zur Reduktion der Dimensionalität aus dem Bereich der Feature Selection ist die Auswahl geeigneter Eingangsparameter aus der Design-Matrix. Verbreitete Varianten der Feature Selection sind zum Beispiel Select-K-Best-Algorithmen. Diese wählen die am besten geeigneten Parameter anhand einer spezifizierten Bewertungsfunktion aus. Dies kann zum Beispiel die Korrelation zwischen Einflussgröße und Zielvariable sein [106].

### 3.3.2.2 Lineare Regression

Mittels linearer Regression kann ein linearer Zusammenhang zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen hergestellt werden. Liegt nur eine unabhängige Variable vor, wird von einfacher linearer Regression gesprochen. Eine multiple lineare Regression wird aus mehreren unabhängigen Variablen berechnet, eine multivariate für mehrere abhängige Variablen. Bei der linearen Regression muss eine Linearkombination der Modellkoeffizienten  $\beta$  vorliegen. Die Parameter hingegen können nichtlinear sein, zum Beispiel durch vorherige Polynomtransformation oder Interaktionsterme [106].

Für  $P$  Parameter und eine Grundgesamtheit aus  $N$  Stichproben folgt ein Gleichungssystem der Form:

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 x_{n,1} + \beta_2 x_{n,2} + \dots + \beta_P x_{n,P} + \varepsilon_n \quad \text{für } n \in \{1, \dots, N\} \quad (3.41)$$

mit der Zielgröße  $y$ , den Parametern  $\{x_1, \dots, x_P\}$  und den Residuen  $\varepsilon$ . Die durch das statistische Modell vorhergesagte Zielgröße wird unter Einbezug des Fehlerterms häufig mit  $\hat{y} = y - \varepsilon$  notiert. Dies kann mit der Design-Matrix  $\mathbf{X}$  in Gleichung (3.42) und dem Koeffizienten-Vektor  $\beta$  in Matrix-Notation geschrieben werden, siehe Gleichung (3.43).

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,P} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,P} \end{bmatrix} = [\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_P] \quad (3.42)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\beta \quad (3.43)$$

### 3.3.2.3 Methoden zur Ermittlung der Regressionskoeffizienten

Für die Gleichungssysteme existieren in der Regel keine exakten Lösungen. Die Koeffizienten müssen daher durch Minimierung der Verlustfunktion  $S(\beta)$  optimiert werden:

$$\hat{\beta} = \min_{\beta} S(\beta) \quad (3.44)$$

**Methode der kleinsten Quadrate** Die Methode der kleinsten Quadrate ist die Grundlage für viele regularisierte Regressionsmethoden. Die Verlustfunktion ist hier:

$$S_{OLS} = \|\mathbf{X}\beta - \mathbf{y}\|_2^2 \quad (3.45)$$

das heißt die quadrierten Residuen werden minimiert. Da keine Regularisierung verwendet wird, ist diese Methode sensitiv für inkorrekt gestellte Probleme oder Überanpassung und Multikollinearität.

**LASSO Regression** LASSO (engl.: least absolute shrinkage and selection operator) Regression erweitert die Methode der kleinsten Quadrate um eine  $\ell_1$ -Norm zur Regularisierung des Koeffizientenvektors [112]. Die Verlustfunktion mit der Stärke der Regularisierung  $\alpha$  ist:

$$S_{LASSO} = \frac{1}{2N} S_{OLS} + \alpha \|\beta\|_1 \quad (3.46)$$

Die  $\ell_1$ -Regularisierung tendiert zu Lösungen mit wenigen Koeffizienten, die nicht Null sind. Das heißt eine Feature Selection wird durchgeführt. Das Modell ist dadurch weniger anfällig für eine Überanpassung. Auch die Abhängigkeit von einzelnen kollinearen Parametern wird reduziert. Probleme bereiten Datensätze mit großem  $P$  und kleinem  $N$  und starker Multikollinearität [107].

**Ridge Regression** Wird ein  $\ell_2$ -Regularisierungsterm eingeführt, so resultiert die Ridge- oder auch Tikhonov-Regression [113]. Die zugehörige Verlustfunktion mit Regularisierungsparameter  $\alpha$  ist in Gleichung (3.47) aufgeführt.

$$S_{Ridge} = S_{OLS} + \alpha \|\beta\|_2^2 \quad (3.47)$$

Auch hier sinkt das Risiko einer Überanpassung. Im Gegensatz zu LASSO eignet sich eine Ridge-Regression jedoch nicht zur Feature Selection, auch wenn einzelne Koeffizienten auf Null minimiert werden können. Da keine Selektion durchgeführt wird, nimmt die Anfälligkeit gegenüber Datensätzen mit starker Multikollinearität ab. Auch Datensätze mit großem  $P$  und kleinem  $N$  können besser abgebildet werden [107].

**Elastic net Regression** Die Elastic Net methode ist eine lineare Kombination der Lasso- und Ridge-Regression [114]. Mittels des zusätzlichen Parameters  $0 \leq \rho \leq 1$  wird der Anteil der  $\ell_1$ - und  $\ell_2$ -Norm festgelegt. Bei geeigneter Wahl der Parameter können somit die Vorteile beider Verfahren kombiniert werden.

$$S_{EN} = \frac{1}{2N} S_{OLS} + \rho \alpha \|\beta\|_1 + (1 - \rho) \alpha \|\beta\|_2^2 \quad (3.48)$$

Für  $\rho = 1$  resultiert eine reine Lasso-Regression, für  $\rho = 0$  eine Ridge-Regression. Die Parameter  $\alpha$  und  $\rho$  sind gute Kandidaten für eine Hyperparameteroptimierung mittels Kreuzvalidierungs-Algorithmen oder Rastersuche.

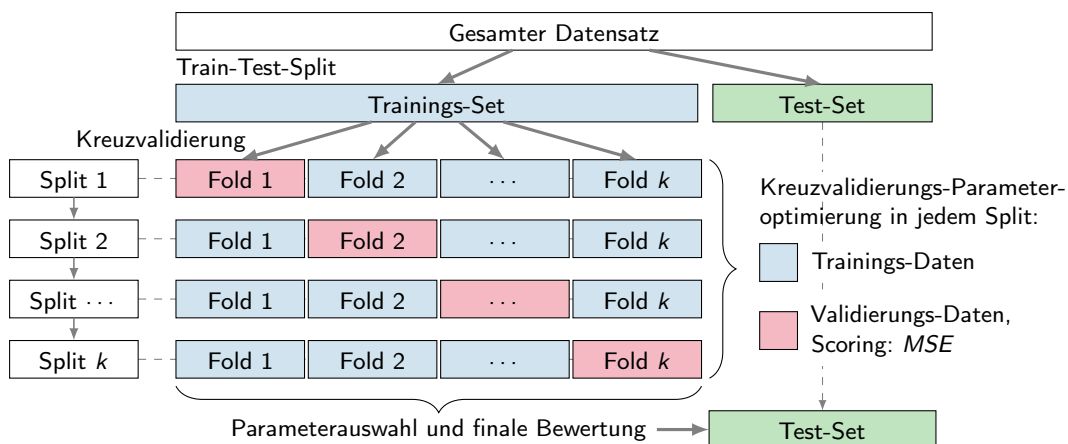


### 3.3.2.4 Scoring, Kreuzvalidierung und Hyperparameteroptimierung

**Scoring** Zur Bewertung der Abbildungstreue des berechneten Regressionsmodells, dem sogenannten Scoring, können je nach Einsatzzweck unterschiedliche Kennzahlen zum Einsatz kommen. Verbreitet sind der *MSE*, siehe Gleichung (3.30), und der Determinationskoeffizient, siehe Gleichung (3.33). Hier wird der *MSE* für die modellinterne Kreuzvalidierung und Parameteroptimierung sowie der Determinationskoeffizient für die finale Validierung mittels des Test-Datensatzes verwendet.

**Kreuzvalidierung** Nach dem Aufteilen des Datensatzes auf ein Trainings- und Test-Set in einem Verhältnis von beispielsweise 70 : 30 wird das Modell auf das Trainings-Set trainiert. Beinhaltet das Modell zu optimierende Parameter wie die Stärke der Regularisierung  $\alpha$ , besteht die Gefahr einer Überanpassung. Um dies zu vermeiden ohne gleichzeitig einen zusätzlichen Datenanteil vorhalten zu müssen, kommt die Kreuzvalidierung zum Einsatz. Zwei Verfahren sind die einfache und die stratifizierte Kreuzvalidierung.

Bei der einfachen Kreuzvalidierung wird das Trainings-Set in  $k$  möglichst gleich große weitere Teile, sogenannte Folds, unterteilt. Die Methode wird daher auch als  $k$ -Fold Kreuzvalidierung bezeichnet. Das Modell wird im Anschluss  $k$  mal auf  $k - 1$  Folds trainiert, während immer ein anderer Fold für die Validierung verwendet wird. Abschließend wird das Modell anhand des separaten Test-Sets erneut bewertet [107]. Dieses Vorgehen ist in Abb. 3.4 verdeutlicht. Zum Scoring während der Kreuzvalidierung kommt häufig der *MSE* zum Einsatz, für die finale Bewertung der Determinationskoeffizient.



**Abbildung 3.4:** Einfache  $k$ -Fold Kreuzvalidierung, nach [115]

Eine Erweiterung der einfachen Kreuzvalidierung ist die stratifizierte Kreuzvalidierung, bei welcher das Aufteilen auf die Folds unter einer Erhaltung der Verteilung der Variablen erfolgt.

**Hyperparameteroptimierung** Eine Hyperparameteroptimierung bezeichnet die Optimierung von Parametern, die dem unterliegenden Modell nicht immanent sind. Das heißt während die Regressionskoeffizienten  $\beta$  Teil der Modellberechnung sind, werden Parameter wie die Stärke der Regularisierung  $\alpha$  oder auch die nach einer Feature Extraction mittels Hauptkomponentenanalyse erklärbare Varianz oder der Grad der Polynomtransformation optimiert. Um eine Überanpassung zu vermeiden, wird die Hyperparameteroptimierung in der Regel mit einer Kreuzvalidierung kombiniert.

Zur Hyperparameteroptimierung existieren verschiedene Verfahren, unter anderem die Gittersuche,

Bayessche Optimierung und die Zufallssuche. Die gradientenbasierte Gittersuche ist am weitesten verbreitet und für glatte und konvexe Funktionen gut geeignet, das heißt für unendlich oft stetig differenzierbare Funktionen bei denen jedes lokale Minimum auch ein globales Minimum ist. Da die Hyperparameteroptimierung von statistischen Modellen häufig jedoch nicht glatt und konvex ist, führt der Einsatz gradientenbasierter Methoden häufig zu nicht optimalen Ergebnissen wie lokalen Minima. Eine ausführliche Gittersuche ohne Gradienten ist hingegen aufwendig und skaliert exponentiell mit der Anzahl der Parameter. Eine Zufallssuche innerhalb kontinuierlicher Parameterverteilungen für eine festgelegte Anzahl an Stichproben kann im Vergleich dazu bei geringerem Aufwand bessere Optimierungsergebnisse erzielen. Insbesondere das hinzufügen von Parametern, die sich im Nachhinein als nicht relevant herausstellen, bedeutet keinen Mehraufwand und verschlechtert nicht das Ergebnis. Weiterhin kann mit geringem Rechenaufwand eine schnelle Abschätzung erzielt werden. Aus diesen Gründen wird von der Verwendung der klassischen Gittersuche abgeraten und eine Zufallssuche oder Bayesschen Optimierung empfohlen [116].

### 3.3.3 Interpretation statistischer Modelle

Viele statistische Modelle können direkt anhand der ermittelten Koeffizienten interpretiert werden. Dazu gehören unter anderem Modelle der linearen und logistischen Regression oder Decision Trees. Die Interpretation der Koeffizienten ist bei einfachen Modellen ohne aufwendiges Preprocessing geeignet. Linearkombinationen wie bei einer Hauptkomponentenanalyse, höhergradige Terme und Interaktionen bei Polynomtransformationen oder Potenzfunktionen wie bei der Box-Cox-Transformation erschweren jedoch eine menschlich interpretierbare Aussage. Die gezielte Beurteilung des Einflusses einzelner Variablen unabhängig von anderen wird verhindert. Weiterhin ist der Vergleich verschiedenartiger Modelle nicht möglich, da Koeffizienten eines Decision Trees eine andere Bedeutung haben, als bei einer linearen Regression [117].

Abhilfe schaffen hier modellagnostische Methoden. Diese erlauben eine Beurteilung des Modells unabhängig von der Art des Modells und dem Preprocessing der Daten. Auch die Erklärung der Zusammenhänge sowie deren Darstellung ist flexibel. Unabhängig von den statistischen Modellen kann die Erklärung anhand von einzelnen Koeffizienten bis hin zu komplexen funktionalen Zusammenhängen erfolgen [118], [119].

Eine verbreitete Vorgehensweise ist es, zuerst die wichtigsten Einflussgrößen zu identifizieren und die Sensitivität des Modells bezüglich einer Auswahl dieser im Anschluss gezielt zu untersuchen [107]. Die Identifikation der wichtigsten Parameter erfolgt anhand einer globalen Sensitivitätsanalyse. Dabei werden die Veränderungen des Modell-Ausgabe bei einer gleichzeitigen Veränderung aller Parameter evaluiert [117], [120]. Dies kann anhand verschiedener Methoden wie der Permutation Feature Importance, der SHAP-Werte oder einer Sensitivitätsanalyse nach Sobol erfolgen [121]–[123]. Auch klassische Methoden wie eine Varianzanalyse, auch ANOVA genannt, kann diese Informationen liefern, sind jedoch häufig in der Anwendung auf komplexe Modelle des maschinellen Lernens eingeschränkt. Die Detailuntersuchung des Einflusses einzelner Variablen, das heißt die Analyse der lokalen Sensitivitäten, kann im Anschluss für die wichtigsten Parameter durchgeführt werden. Methoden hierfür sind beispielsweise Partial Dependence Plots, insbesondere unter Einbezug einzelner Betrachtungen, sogenannter Individual Conditional Expectations, oder auch SHAP-Werte [107], [122], [124].

Bezüglich der lokalen Sensitivitätsanalyse liegen verschiedene Terminologien vor: Entweder wird eine Analyse *lokal* im Sinne der isolierten Variation und Betrachtung einzelner Parameter unter Ausschluss des Einflusses von Interaktionen etc. vorgenommen. Dies wird auch als One-at-a-Time-Methode bezeichnet [117], [125]. Oder es erfolgt eine *lokale* detaillierte Betrachtung des Einflusses einzelner Parameter innerhalb des Wertebereichs dieser unter Einbezug anderer Parameter [118], [122]. Diese Arbeit nimmt Bezug auf letztere Definition.

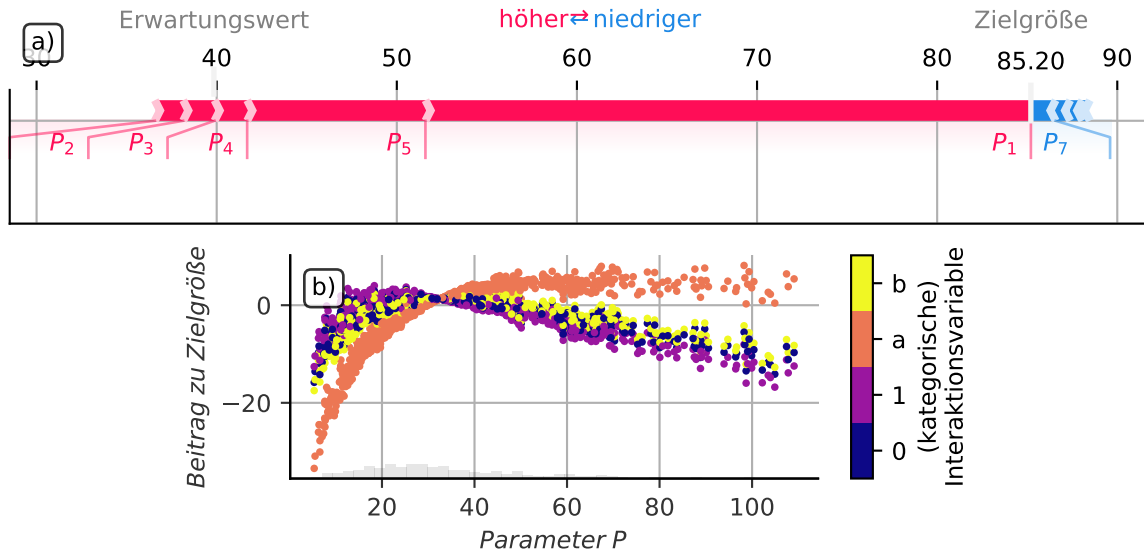
### 3.3.3.1 Shapley additive explanations

Die Methodik der Shapley additive explanations (SHAP) sind ein Ansatz aus der Spieltheorie, um die Vorhersage von statistischen Modellen zu erklären. SHAP-Werte basieren auf Shapley-Werten und berechnen diese mittels lokaler Ersatzmodelle. Die Shapley-Werte werden unter der Annahme berechnet, dass jeder Parameterwert ein Teilnehmer an einem Spiel ist und die Vorhersage des statistischen Modells den Spielgewinn darstellt. Die Shapley-Werte der einzelnen Parameter stellen den Gewinnanteil eines jeden Teilnehmers dar, das heißt den Beitrag, den jeder Parameter zum vorhergesagten Wert leistet [119], [126]. Sie erlauben damit sowohl eine lokale Allokation des Einflusses jedes einzelnen Parameterwerts jeder einzelnen Stichprobe zum Ergebnis, als auch eine verallgemeinerte globale Interpretation. Für die Berechnungsvorschrift wird auf [122] verwiesen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Shapley-Werte die einzige bekannte Möglichkeit sind, die Wichtigkeit der einzelnen Parameter zu bewerten und dabei die Bedingungen der lokalen Genauigkeit und die Konsistenz zu erhalten. Unter lokaler Genauigkeit wird verstanden, dass die Differenz zwischen dem erwarteten Modellwert, das heißt dem Mittelwert aller Vorhersagen, und der vorliegenden Vorhersage korrekt abgebildet wird. Das heißt unter anderem, dass die Addition des Beitrags einzelnen Parameter repräsentativ für die gesamte Vorhersage ist. Konsistenz besagt, dass einem Parameter die entsprechende Wichtigkeit auch tatsächlich korrekt zugeordnet werden kann. Die Folge der Bedingungen ist, dass es nur eine einzige Möglichkeit der Zuordnung der Beiträge der einzelnen Parameter zum Ergebnis gibt und diese durch die Shapley-Werte gegeben ist [122], [126].

Eine beispielhafte Auswertung des Beitrages mehrerer Parameter  $P_1, \dots, P_7$  zu einem Modell ist in Abb. 3.5 a) aufgeführt. Anhand einer ausgewählten Stichprobe wird der Anteil der Variablen zur Differenz zwischen dem vorhergesagten Wert des Modells und dem Erwartungswert, dem Mittelwert der Vorhersagen aller Stichproben, erklärt. Die Summe aller Beiträge der unabhängigen Variablen ergibt die gesamte Differenz.

Abb. 3.5 b) zeigt die lokale Sensitivitätsanalyse eines Modells bezüglich aller Stichproben eines Parameters  $P$ . Die Abweichung zum Erwartungswert ist auf der Ordinate aufgetragen. Eine vertikale Streuung der Punkte eines  $x$ -Wertes repräsentiert einen Interaktionseffekt mit mindestens einer weiteren Variable. Dies ist hier anhand einer Farbkodierung einer kategorischen vierstufigen Interaktionsvariable verdeutlicht. Eine mögliche Interpretation wäre, dass die abhängige Variable bei den drei Stufen 0, 1 und  $a$  bis zu einem Scheitelpunkt ansteigt und danach mit ansteigendem Parameter  $P$  wieder abnimmt. Die Lage des Scheitelpunktes ist auf den Erwartungswert bezogen. Das heißt weichen andere Einflussgrößen wie die Wohnfläche von diesem ab, verschiebt sich die Lage des Scheitelpunktes beispielsweise zu höheren Werten von  $P$ . Die Kategorie  $b$  zeigt hingegen ein davon abweichendes Verhalten: Eine Sättigung der Zielgröße tritt bei höheren Parameterwerten ein.



**Abbildung 3.5:** SHAP-Werte eines statistischen Modells zur Berechnung des Ertrags – a) Detailauswertung des Beitrags einzelner Parameter  $P_1, \dots, P_7$  einer ausgewählten Stichprobe zur Differenz zwischen Erwartungswert und vorhergesagter Zielgröße; b) Lokale Erklärung eines Parameters  $P$  für alle Stichproben in Abhängigkeit von einer gemischten kategorischen Interaktionsvariable

Die Berechnung der Shapley-Werte ist ein sehr rechenaufwändiger und komplexer Vorgang. Die Einführung der SHAP-Werte, das heißt über lokale Ersatzmodelle angenäherte Shapley-Werte, reduziert diese Problematik. Weiterhin kann mittels SHAP-Werten auch der Einfluss einzelner Parameter erklärt werden, während die ursprünglichen Shapley-Werte nur die gleichzeitige Erklärung aller Parameter erlaubten. Auch das Auslassen eines Parameters oder einer Parameterkombination beeinflusst die restlichen Ergebnisse nicht, da diese unabhängig von den anderen Parametern sind [119], [122].

### 3.3.3.2 Permutation Feature Importance

Die Permutation Feature Importance ist eine Modell-agnostische Methode zur Bestimmung der betragsmäßigen Wichtigkeit der Parameter. Sie wurde ursprünglich für die Beschreibung von Random Forest Modellen entwickelt [121]. Nach [127] ist jedoch auch eine Anwendung auf andere statistische Modelle wie die lineare Regression valide, solange die Eingabedaten tabellarisch vorliegen.

Für die Berechnung der Permutation Feature Importance werden alle Stichproben einer einzelnen Einflussgröße  $P_j$  per Zufallsverfahren für  $K$  unabhängige Wiederholungen neu gemischt. Für jede der  $K$  Mischungen wird die Modell-Score  $s_{k,j}$ , bei einer linearen Regression beispielsweise der Determinationskoeffizient, berechnet. Mittels der Referenz-Score  $s$  der ungemischten Daten ist die Permutation Feature Importance  $i_j$  der unabhängigen Variable  $j$  nach Gleichung (3.49) definiert [115], [121].

$$i_j = s - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s_{k,j} \quad (3.49)$$

Je größer dabei der Rückgang der Modell-Score ist, desto abhängiger ist das Modell von der Variable. Für die Berechnung kann entweder das Trainings- oder das Test-Set verwendet werden. Wird das

Test-Set verwendet, so beschreibt die Permutation Feature Importance zusätzlich, welche Parameter am meisten zur Anwendbarkeit des Modells auf allgemeine Daten beitragen. Einflussgrößen, die eine höhere Permutation Feature Importance bei Trainings-Daten als bei Test-Daten aufweisen, deuten auf eine Überanpassung hin [115].

Neben den allgemeinen Vorteilen Modell-agnostischer Methoden hat die Permutation Feature Importance gegenüber einigen anderen Methoden den Vorteil, dass transformierte Variablen, wie kategoriale Variablen mit mehreren Stufen, nicht überbewertet werden [128].

### 3.3.3.3 Sobol-Methode

Die Sobol-Methode, auch varianzbasierte Sensitivitätsanalyse, ist eine globale Methode zur Analyse der Sensitivität. Sie ist eine von der Varianzanalyse abgeleitete Methode. Eine probabilistische Zerlegung der Varianz der Zielgröße ordnet jeder unabhängigen Variable und Interaktionstermen zwischen diesen einen Anteil an der Varianz zu [123]. Dazu wird angenommen, dass das zu interpretierende Modell der Form

$$y = f(\mathbf{X}) = f(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_p) \quad (3.50)$$

mit der abhängigen Variable  $y$ , der Design-Matrix  $\mathbf{X}$  und dem funktionalen Zusammenhang  $f$  entspricht und alle Terme der Funktion orthogonal sind. Über eine anschließende Zerlegung werden die Modellkoeffizienten bestimmt [123].

Der Anteil der Varianz, der direkt durch die einzelnen Parameter beschrieben wird, der sogenannte Haupteffekt oder Sensitivitätsindex erster Ordnung  $S_1$ , ist damit durch

$$S_{1,i} = \frac{\text{var}(E[y|x_i])}{\text{var}(y)} \quad (3.51)$$

gegeben, mit der Varianz  $\text{var}$  und dem Erwartungswert  $E$ . Die Interaktionseffekte  $S_2$  zwischen zwei Variablen  $i$  und  $j$  ergeben sich nach Gleichung (3.52). Höhergradige Interaktionen können nach dem gleichen Schema berechnet werden, werden hier jedoch nicht betrachtet.

$$S_{2,ij} = \frac{\text{var}(E[y|x_i, x_j]) - \text{var}(E[y|x_i]) - \text{var}(E[y|x_j])}{\text{var}(y)} \quad (3.52)$$

Der Totaleffekt  $S_{tot}$  einer Einflussgröße ist die Summe des Haupteffekts sowie aller diese Variable betreffenden Interaktionseffekte bis zum gewählten Grad [117], [120], [123].



## 4 Feldtest einer flexiblen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage

Das Flexibilisierungspotential, das aus der LowEx-Technologie hervorgeht, soll in diesem Kapitel anhand eines Feldtests analysiert werden. Weiterhin wird auf die resultierende Betriebscharakteristik des BHKWs eingegangen. Hierzu zählen die erreichte Effizienz, Schaltzahlen und Laufzeiten sowie die Auswirkungen des BHKW-Betriebs auf Stromeinspeisung und Netzbezug.

Der Feldtest wird mit allen relevanten Randbedingungen und dem umgesetzten Konzept in Abschnitt 4.1 vorgestellt. Im Anschluss erfolgt in Abschnitt 4.2 eine Auswertung der erfassten Daten.

### 4.1 Projektbeschreibung

Die Umsetzung der LowEx-Technologie mit BHKW als primäre Wärmequelle erfolgt in einem Mehrfamilienhaus mit 46 Wohneinheiten und 4450 m<sup>2</sup> beheizter Wohnfläche. Das Gebäude wurde 1982 errichtet. Die Wärmedämmung ist nach WSVO 1977 ausgeführt. Im Vergleich zu heutigen Dämmstandards sind somit hohe Wärmeverluste der Gebäudehülle sowie Übertragungsverluste in den Rohrleitungen zu erwarten. Die Wohnanlage befindet sich im zentralen Stadtgebiet von München. Abb. 4.1 zeigt die Wohnanlage in der Außenansicht.



**Abbildung 4.1:** Außenansicht der Wohnanlage des Feldtests

Vor dem Umbau auf die neue Anlagentechnik waren ein Speicherladesystem mit 2x850 L sowie zwei Gaskessel mit je 300 kW ohne Brennwertnutzung verbaut. Die Rücklauftemperatur betrug im Mittel 64 °C. Die Flexibilität lag im Minutenbereich. Ungefähr 20 Einschaltvorgängen der Gaskessel je

Tag wurden im Sommer verzeichnet. Die Werte gehören zum Standardbereich vieler Anlagen. Weitere Details sind [22] zu entnehmen.

**Konzept** Das Konzept sieht ein BHKW mit einer thermischen und elektrischen Leistung von  $\dot{Q} = 38,7 \text{ kW}$  und  $P_{el} = 20 \text{ kW}$  vor. Durch Nachschaltung eines Abgas-Wärmeübertragers soll mittels der zu erwartenden niedrigen Rücklauftemperaturen eine zusätzliche Wärmeauskopplung realisiert werden. Bei einem durchschnittlichen Wärmebedarf von 20 kW für PWH und PWH-C ist davon auszugehen, dass das BHKW im Sommer und in der Übergangszeit zur Wärmeversorgung ausreicht. Im Winter und im Wartungsfall können zwei Gas-Brennwertkessel mit insgesamt 300 kW zusätzliche Wärme zur Verfügung stellen, um Lastspitzen auszugleichen. Der durch das BHKW produzierte Strom soll, soweit möglich, vor Ort in einem Mieterstromprojekt verbraucht werden.

Der TES ist der Angelpunkt der Anlage. Kaltes und warmes Wasser werden gezielt eingeschichtet und entnommen, um die Durchmischung zu reduzieren. Das BHKW belädt den TES. Der Rücklauf zum BHKW wird auf drei verschiedenen Höhen entnommen, um eine sequentielle Beladung zu ermöglichen und jederzeit kaltes Wasser zur Abgaskondensation zur Verfügung zu haben. Aus dem TES werden sowohl die Heizung als auch die TWE gespeist.

Anstelle der üblichen PWH-Speicher wird das LowEx-TWE-System eingesetzt. Dieses wird an die Gebäudegröße angepasst, indem zwei Frischwasserstationen verbaut werden. Die Zirkulationsnachheizung erfolgt über einen separaten Wärmeübertrager. Die Heizungswärme wird vorrangig aus dem TES bezogen. Reicht dies nicht aus, schaltet ein Gas-Brennwertkessel zu.

Durch die Umsetzung des Feldtests soll gezeigt werden, dass die TWE mittels LowEx-Technologie förderlich für den Betrieb eines Gebäudeenergiesystems sein kann. Dies steht der allgemeinen Annahme entgegen, dass die TWE „kaum optimierbar“ sei und mit steigendem Anteil einen negativen Effekt auf die Betriebscharakteristik hat. Um diese Annahme zu widerlegen, liegt der Fokus der Auswertungen auf der Effizienz und Flexibilität des BHKWs.

#### 4.1.1 Umsetzung

Zur Beschreibung der umgesetzten Anlagentechnik wird der Aufbau in drei Ebenen unterteilt:

**Speicherebene** TES mit allen Anschlüssen

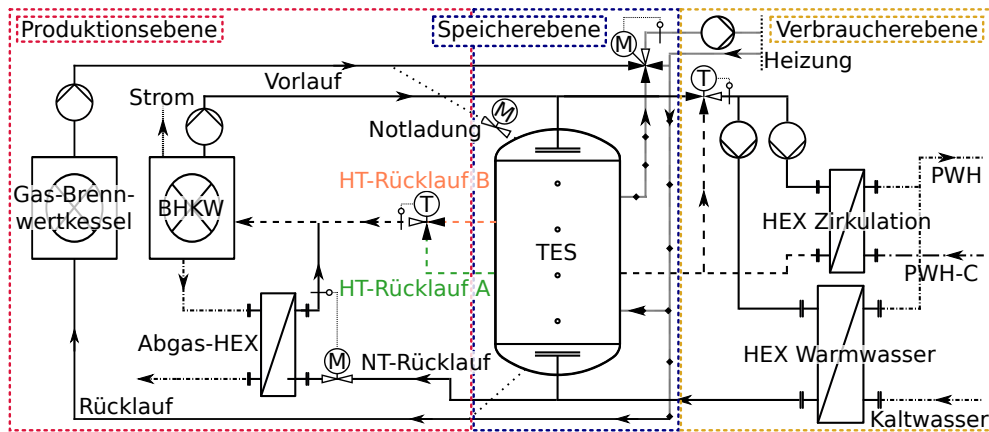
**Produktionsebene** BHKW mit Abgaswärmeübertrager und Gas-Brennwertkessel

**Verbraucherebene** LowEx-TWE und Heizkreisverteiler

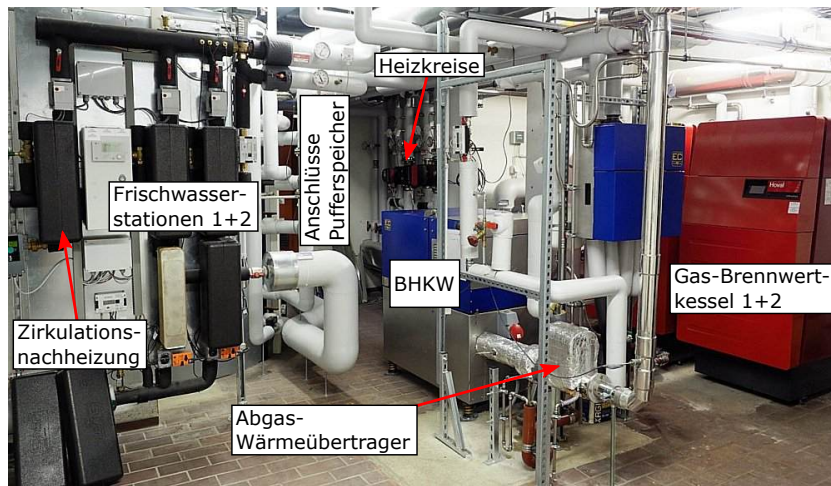
Die Unterteilung in Ebenen ist im reduzierten Funktionsschema der Anlage in Abb. 4.2 vermerkt. Die drei- und vier-Wege-Mischventile in den Vorläufen zu den Verbrauchern werden im Gegensatz zu den Ventilen im Rücklauf zum BHKW noch zur Speicherebene gezählt, da diese jeweils einen Vor- und Rücklauf einbinden.

Das Foto in Abb. 4.3 gibt einen Überblick über die Anlage. Die markierten Bestandteile werden in den folgenden Unterkapiteln genauer beschrieben. Der TES befindet sich auf der Rückseite der TWE-Anlage. Allgemeine Kennzahlen der Anlagentechnik sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.





**Abbildung 4.2:** Vereinfachtes Funktionsschema des Feldtests mit Unterteilung in Systemebenen (HT: Hochtemperatur, NT: Niedertemperatur)



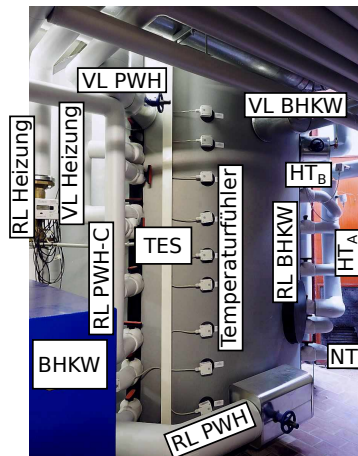
**Abbildung 4.3:** Feldtest – Übersicht des Heizkellers

**Tabelle 4.1:** Allgemeine Kennzahlen des Feldtests – BHKW, Gas-Brennwertkessel und TES nach Datenblatt

Gebäudeheizlast	Norm-Außentemperatur	$\theta_{min} = -16\text{ °C}$
	Heizlast bei $\theta_{min}$	270 kW
Wärmeerzeuger	BHKW	$\dot{Q}_{CHP} = 38,7\text{ kW}$
		$P_{el, CHP} = 20\text{ kW}$
		$\eta_{th} = 63,3\%$
		$\eta_{el} = 32,7\%$
Wärmespeicher	Gas-Brennwertkessel	$\dot{Q} = 2 \times 150\text{ kW}$
	TES	$V_{TES} = 7,1\text{ m}^3$

#### 4.1.1.1 Speicherebene

Der TES hat bei einem Durchmesser von 2 m und einer Höhe von ca. 2,4 m ein Volumen von  $7,1 \text{ m}^3$ . Am Kaltwassereintritt ist ein gelochtes Rohr zur Strömungsberuhigung installiert. Zur vollständigen Ausnutzung des vorhandenen Volumens sind für die Beladung mittels BHKW Bogenrohre verbaut. Die Messung des Temperaturprofils erfolgt anhand von zehn Sensoren mit je 0,4 m Tauchtiefe. Zusätzlich wird die Temperatur an allen Anschlüssen vermessen. Zur Untersuchung der optimalen Anschlussposition verfügt der TES zusätzlich über 18 in der Höhe umschaltbare Anschlüsse. Das Foto in Abb. 4.4 zeigt den TES mit Anschlüssen und Temperaturfühlern.



**Abbildung 4.4:** TES des Feldtests mit Anschlüssen und Temperaturfühlern in 0,4 m Tauchhülsen (RL: Rücklauf, VL: Vorlauf, HT: Hochtemperatur, NT: Niedertemperatur)

Die Anschlusspositionen unterteilen den TES grob in drei Segmente: Oben, zwischen den Vorläufen des BHKWs und der Heizkreise, liegt das Bereitschaftsvolumen für die TWE von ca.  $1,5 \text{ m}^3$ . Dieser Heißwasserbereich stellt sicher, dass auch im Winter und bei hohen Lastspitzen zu jeder Zeit ausreichend Warmwasser zur Verfügung steht. Am unteren Ende des TES befindet sich das Kaltwasserreservoir mit ca.  $1,3 \text{ m}^3$  Volumen. Dieses ist nach oben durch die Rückläufe zum BHKW und den Rücklauf vom Heizkreis begrenzt. Mittels des Kaltwasserreservoirs verfügt der Abgas-Wärmeübertrager jederzeit über kaltes Wasser, um einen möglichst hohen Anteil der Kondensationsenthalpie nutzen zu können. Dazwischen liegt das Taktvolumen mit einer Größe von ca.  $4,3 \text{ m}^3$  zur Bereitstellung von Flexibilität.

**Verbindung zur Produktionsebene** Die Beladung des TES erfolgt über das BHKW. Eine Besonderheit stellt die Entnahme des Rücklaufs aus drei Anschlüssen dar. Am Niedertemperaturanschluss (NT) wird Wasser aus dem Kaltwasserreservoir entnommen und über den Abgas-Wärmeübertrager geleitet. Der untere Hochtemperaturanschluss (HT<sub>A</sub>) entzieht dem TES oberhalb des Kaltwasserreservoirs Wasser. Hierdurch wird das Risiko einer Durchmischung des Kaltwasserreservoirs mit warmem Wasser reduziert. Eine stabilere Schichtung ist die Folge. Der obere Hochtemperaturanschluss (HT<sub>B</sub>) wird auf der Höhe des Rücklaufs der Zirkulationsnachheizung platziert. Dadurch kann das unerwünschte und unbrauchbare Wasser der Temperatur von ca.  $56 \text{ °C}$  abgesaugt werden. Dieses ist zu kalt, um Exergie zu beinhalten und zu warm, um eine Brennwertnutzung zu ermöglichen. Wird das BHKW gewartet, kann der TES durch die Gas-Brennwertkessel geladen werden.

Die Aufteilung der Massenströme zwischen den Rückläufen wird nach der Wassertemperatur am

Austritt des Abgas-Wärmeübertragers sowie der Mischtemperatur der beiden Hochtemperaturanschlüsse geregelt. Ob die Aufteilung des Rücklaufs auf mehrere Anschlüsse einen Nutzen hat und ob der zusätzliche Aufwand und die erhöhten Kosten in Relation zum gegebenenfalls vorhandenen Nutzen stehen, soll in Abschnitt 6.3 genauer untersucht werden.

**Verbindung zur Verbraucherebene** Die TWE entnimmt warmes Wasser am oberen Ende des TES. Der kalte Rücklauf wird zur Strömungsberuhigung über ein gelochtes Rohr mit großem Querschnitt im Kaltwasserreservoir eingespeist. Der Rücklauf der separaten Zirkulationsnachheizung wird im oberen Drittel des TES eingespeist und bei großem Wärmebedarf wieder entnommen und der TWE beigemischt. Im Winter wird das Taktvolumen zur Wärmeversorgung der Heizung verwendet. Der Massenstrom wird so geregelt, dass das BHKW durchgängig in Betrieb ist, während der Gas-Brennwertkessel den verbliebenen Heizwärmebedarf deckt.

**Bestimmung des Ladezustandes** Die näherungsweise Bestimmung des Ladezustandes eines TES mittels einer Sigmoid-Kurve, wie in Abschnitt 2.4.1, erlaubt nur eine Temperaturgrenzschicht bzw. zwei Temperatursegmente. Moderne TES mit Schichtladeeinrichtungen können jedoch mehrere Segmente und Grenzschichten aufweisen. Der im Feldtest verwendete TES wird anhand der vorhandenen Anschlüsse in drei Segmente unterteilt. Im Winter kann zusätzlich ein viertes Segment auftreten. Das Sigmoid-Modell in Gleichung (2.7) wird daher in das n-Sigmoid-Modell in Gleichung (4.1) überführt, welches die Zusammensetzung des Temperaturprofils  $\theta(h)$  in Abhängigkeit von der Höhe im TES aus einer beliebigen Anzahl von  $n$  Grenzschichten beziehungsweise  $n + 1$  Segmenten erlaubt. Weiterhin kann die Bestimmung der TES-spezifischen Konstante  $h_0$  durch eine Umformulierung des Nenners vermieden werden.

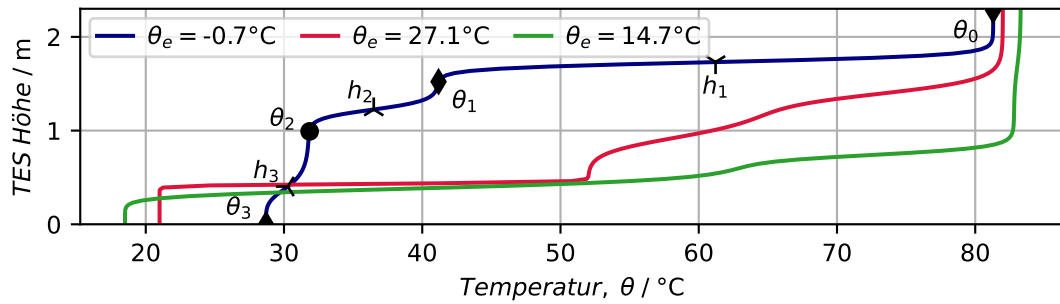
$$\theta(h) = \theta_n + \sum_{i=1}^n \frac{(\theta_{i-1} - \theta_i)}{1 + (h/h_i)^{\lambda_i}} \quad (4.1)$$

Die Randbedingungen  $\theta_n = \theta_{min}$  und  $\theta_0 = \theta_{max}$  ergeben sich direkt aus den Messdaten. Die mittleren Temperaturen der einzelnen Segmente  $\theta_i$  für  $i \notin \{0, n\}$ , die Lagen der Grenzschichten  $h_i$  sowie die Krümmungsparameter  $\lambda_i$  der Sigmoid-Kurven müssen mittels eines Optimierungs- oder Curve-Fitting-Algorithmus bestimmt werden. Die Anzahl der zu ermittelnden Parameter beträgt dabei  $3(n - 1) + 2$ . Am Beispiel eines Ladezustands im Winter bei einer Außentemperatur von  $\theta_e = -0,7^\circ\text{C}$  sind die ermittelten Segmenttemperaturen und Grenzschichthöhen in Abb. 4.5 dargestellt. Weiterhin sind die Temperaturverläufe für drei Außentemperaturen abgebildet. Während bei kalten Temperaturen drei eindeutige Grenzschichten vorliegen, werden im Sommer eine scharf begrenzte und eine diffuse Grenzschicht ermittelt. Dies entspricht dem zu erwartenden Ladeverhalten des TES.

#### 4.1.1.2 Produktionsebene

Die Produktionsebene ist in das BHKW und den Gas-Brennwertkessel unterteilt.

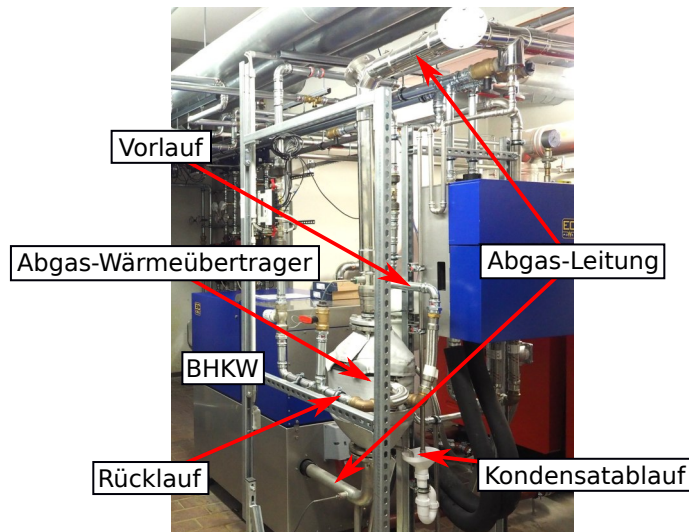
**BHKW** Das BHKW hat eine thermische und elektrische Nennleistung von  $\dot{Q}_{CHP} = 38,7 \text{ kW}$  und  $P_{elCHP} = 20 \text{ kW}$ . Im Vergleich zur üblichen Auslegung in der Wohnungswirtschaft ist das BHKW relativ groß dimensioniert. Der thermische Wirkungsgrad ohne Abgas-Wärmeübertrager beträgt  $\eta_{th} = 63,3\%$  bezüglich des Heizwertes, mit Abgas-Wärmeübertrager nach Datenblatt  $\eta_{th} = 69\%$ . Die elektrische Effizienz beträgt  $\eta_{el} = 32,7\%$ . Die Vorlauftemperatur ist herstellerseitig auf ca.  $83^\circ\text{C}$  eingestellt.



**Abbildung 4.5:** Trisigmoid-Temperaturverlauf des TES mit  $n = 3$  Schichten für drei Außentemperaturen  $\theta_e$ ; Schichttemperaturen und Wendepunkte für einen Fall eingezeichnet

Der produzierte Strom wird in einem Mieterstromprojekt verbraucht. Die Teilnahmequote lag Anfang 2020 bei ungefähr 75 %. Überschüssiger Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist. Nach Wunsch des Betreibers wird das BHKW wärmegeführt ohne Modulation betrieben.

Das Abgas des BHKWs hat eine Temperatur von 110 °C. Mit dem anfänglich von Seiten des Herstellers verbauten Kreuzstrom-Rohrbündelwärmeübertrager konnte das Abgas trotz Rücklauftemperaturen von unter 22 °C nur auf 64 °C abgekühlt werden. Eine Brennwertnutzung war nicht möglich. Im Laufe des Projekts wurde dieser gegen einen auf Kondensation ausgelegten Abgas-Wärmeübertrager ausgetauscht, um die verbliebene Enthalpie zu nutzen. Auf die Ergebnisse wird in Abschnitt 4.2.3 im Detail eingegangen. Das BHKW mit dem ursprünglichen Wärmeübertrager ist in Abb. 4.6 abgebildet.



**Abbildung 4.6:** BHKW des Feldtests mit Abgaswärmeübertrager

**Gas-Brennwertkessel** Beide Gas-Brennwertkessel haben eine Nennleistung von jeweils  $\dot{Q} = 150 \text{ kW}$ . Sofern das BHKW den Heizwärmebedarf nicht mehr decken kann, stellen die Gas-Brennwertkessel die benötigte Wärme zur Verfügung. Dieser Fall tritt nur im Winter oder bei Wartungsarbeiten ein.

### 4.1.1.3 Verbraucherebene

Die Verbraucherebene besteht aus der TWE und den Heizkreisen. Die Regelung der Vorlauftemperatur zu den Heizkreisen wird der Speicherebene zugerechnet, diejenige zur TWE der Verbraucherebene.

**Trinkwassererwärmung** Das LowEx-TWE-System besteht aus einer getrennten PWH-Bereitung und PWH-C-Nachheizung. Die Zirkulation wird über einen Wärmeübertrager, mit 55 °C vom Gebäude kommend, auf 60 °C erwärmt. Die Warmwasserbereitung erfolgt über zwei parallel geschaltete Frischwasserstationen mit jeweils ca. 120 kW maximaler Wärmeleistung bei einer mittleren Leistung von 10,5 kW für die PWH-C- und 9,6 kW für die PWH-Erwärmung. Aufgrund des großen Temperaturhubs von 12 °C auf 60 °C werden je Station zwei Wärmeübertrager in Reihe geschaltet. Die primärseitige Vorlauftemperatur zu den Wärmeübertragern wird aus dem TES sowie dem Zirkulationsrücklauf auf 65 °C gemischt. Die LowEx-TWE ist in Abb. 4.3 auf der linken Seite abgebildet.

**Heizung** Das Gebäude wird durch zwei getrennte Heizkreise versorgt. Die Vorlauftemperatur der Heizkreise wird über je ein vier-Wege-Ventil geregelt. Bei niedriger Heizlast wird der Rücklauf mit dem Vorlauf aus dem TES gemischt, bei höherer Heizlast werden die Gas-Brennwertkessel zugeschaltet.

## 4.2 Analyse der Messdaten

Der Feldtest ist Ende November 2018 in Betrieb gegangen. Seit dem 6. März 2019 werden Messdaten von 174 Sensoren erfasst. Eine detaillierte Auswertung des Verbrauchs erfolgte bereits in [22], daher soll in diesem Abschnitt vorrangig auf die Effizienz und Flexibilität des BHKWs eingegangen werden.

### 4.2.1 Überblick

Werden die Tagesmittelwerte des Wärmebedarfs über der Außentemperatur aufgetragen, so kann daraus der Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Wärmebedarf abgeleitet werden. Dieser ist in guter Näherung linear, wie die flächenspezifischen Werte in Abb. 4.7 zeigen. Die Heizlast ist wie erwartet stark von der Außentemperatur abhängig, die Leistungen der PWH- und PWH-C-Erwärmung zeigen nur eine schwache Korrelation.

Tabelle 4.2 fasst die Verbrauchs- und Produktionskennwerte des Feldtests über den Zeitraum von einem Jahr zusammen. Das BHKW hat 7188 Vollbetriebsstunden erreicht. Mit der produzierten Wärme konnte der gesamte Wärmebedarf der PWH und PWH-C-Erwärmung gedeckt werden. Trotz des niedrigen Dämmstandards des Gebäudes hat das BHKW 57 % des Heizwärmebedarfs zur Verfügung gestellt. Der Wirkungsgrad im Jahresmittel beträgt ohne Abgas-Wärmeübertrager  $\eta_{th,H_i} = 62,9\%$  und  $\eta_{el,H_i} = 32,0\%$ . Der Abgas-Wärmeübertrager steigert die thermische Gesamteffizienz um  $\eta_{th,HEX,H_i} = 10,5\%$  auf  $\eta_{th,tot,H_i} = 73,4\%$ . Ungefähr 8,9 % der produzierten Wärme geht durch Verluste verloren, davon ca. 2,6 % im Heizkreisverteiler. Der TES und sämtliche Rohre sind für 6,3 % der Verluste verantwortlich. In Anbetracht dessen, dass der TES zu Forschungszwecken über 18 zusätzliche Anschlüsse verfügt, davon neun im Heißbereich, sind die Verluste vertretbar. Eine detaillierte Betrachtung der Verluste findet in [22] statt.

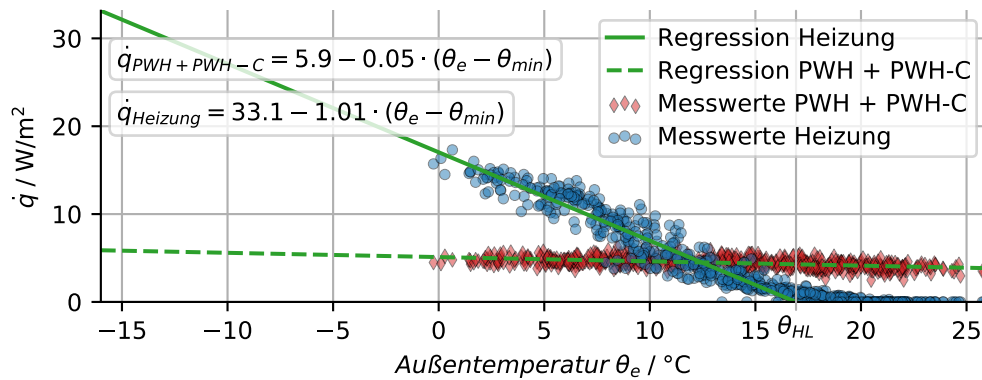


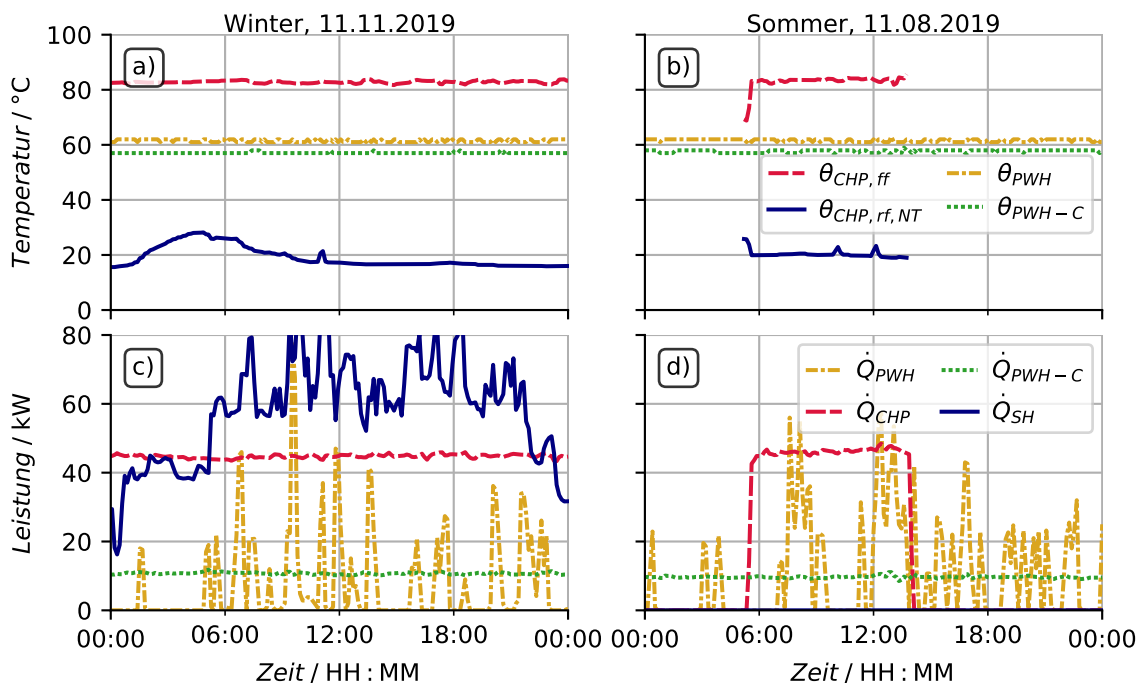
Abbildung 4.7: Spezifischer Wärmebedarf des Feldtests in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Tabelle 4.2: Verbrauchs- und Produktionskennwerte des Feldtests von März 2019 bis inklusive Februar 2020

Zuordnung	Größe	Wert	Einheit
Warmwasser	Jahresverbrauch	90.31	MW h/a
	spez. Energieverbrauch	20.29	kW h/(m <sup>2</sup> a)
	mittlere Leistung	10.31	kW
Zirkulation	Jahresverbrauch	102.36	MW h/a
	spez. Energieverbrauch	23.00	kW h/(m <sup>2</sup> a)
	mittlere Leistung	11.68	kW
Heizung	Jahresverbrauch	233.16	MW h/a
	spez. Energieverbrauch	52.40	kW h/(m <sup>2</sup> a)
BHKW	Jahresproduktion Wärme	325.62	MW h/a
	Jahresproduktion Strom	138.62	MW h/a
	Jahresverbrauch Erdgas	440.17	MW h/a
	mittlere Leistung ohne Abgas-HEX	39.16	kW
	mittlere Leistung Abgas-HEX	6.14	kW
	Deckungsgrad total	76.47	%
	Deckungsgrad PWH+PWH-C	100.00	%
	Deckungsgrad Heizung	57.02	%
Gaskessel	Vollbetriebsstunden pro Jahr	7187.84	h/a
	Jahresproduktion	138.11	MW h/a

#### 4.2.2 Betrieb des Blockheizkraftwerks

Der BHKW Betrieb an zwei repräsentativen Tagen im Winter und im Sommer ist in Abb. 4.8 abgebildet. Die gesetzlichen Vorgaben für die PWH- und PWH-C-Temperatur werden zu jeder Zeit eingehalten. Im Winter ist das BHKW durchgängig in Betrieb. Der Mittelwert der Rücklauftemperatur beträgt 19,1 °C. In der Nacht werden kurzzeitig bis zu 28 °C erreicht. Bei einer Außentemperatur von 4,8 °C liegt die Heizlast im Mittel bei 58 kW. Im Sommer schaltet das BHKW ein Mal am Tag für ca. 8 h an und belädt den Speicher. Ansonsten wird der gesamte Wärmebedarf aus dem Speicher geliefert. Die Rücklauftemperatur liegt während des BHKW-Betriebs an diesem Tag bei 20,3 °C. Die Vorlauftemperatur des BHKWs beträgt im Winter und Sommer 83 °C. Die hohe Spreizung resultiert in geringen Massenströmen. Turbulenzen werden vermieden, die Schichtung im Speicher bleibt erhalten. Rohre können kleiner dimensioniert werden, wodurch Kosten und Verluste sinken.



**Abbildung 4.8:** Temperaturen und Leistungen der PWH-Erwärmung, PWH-C-Nachheizung, Heizung und des BHKWs – a) Temperaturen im Winter; b) Temperaturen im Sommer; c) Leistungen im Winter; d) Leistungen im Sommer

Tabelle 4.3 fasst die Temperaturen über den Zeitraum von einem Jahr zusammen. Die Mittelwerte der Vorlauftemperatur und der Niedertemperatur-Rücklauftemperatur sind im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Hervorzuheben ist, dass eine mittlere Rücklauftemperatur von unter 20 °C erreicht wird. Der Hochtemperatur-Rücklauf wird im Winter durch die Entnahme von Heizungswärme aus dem Speicher beeinflusst. Während der Rücklauf der Zirkulation mit einer Temperatur von ca. 57 °C im Sommer im Speicher eingelagert wird, wird dieser im Winter wieder entnommen und der Heizung beigemischt.

**Tabelle 4.3:** Mittelwerte der gemessenen Vor- und Rücklauftemperaturen nach Jahreszeit

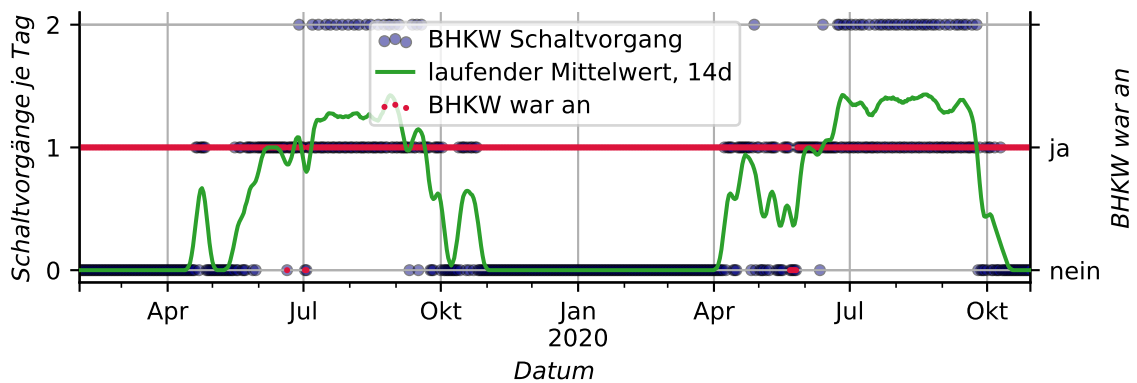
Temperatur \	Sommer	Winter	Jahresmittel
$\theta_{CHP,ff}$ (Vorlauf)	83,7 °C	82,8 °C	83,2 °C
$\theta_{CHP,rf,NT}$ (Niedertemperatur-Rücklauf)	19,2 °C	18,4 °C	18,7 °C
$\theta_{CHP,rf,HT}$ (Hochtemperatur-Rücklauf)	58,0 °C	38,0 °C	46,1 °C

#### 4.2.2.1 Schaltvorgänge

Während des An- und Abschaltvorgangs von Wärme- und Stromerzeugern fließt ein zusätzlicher Teil der umgewandelten Energie in Aufwärmprozesse oder bleibt ungenutzt. Die Effizienz ist während dieser Phasen deutlich geringer beziehungsweise es wird keine nutzbare Energie zur Verfügung gestellt. In der Folge führen häufige Schaltvorgänge zu einer verminderten Gesamteffizienz des Energiesystems.

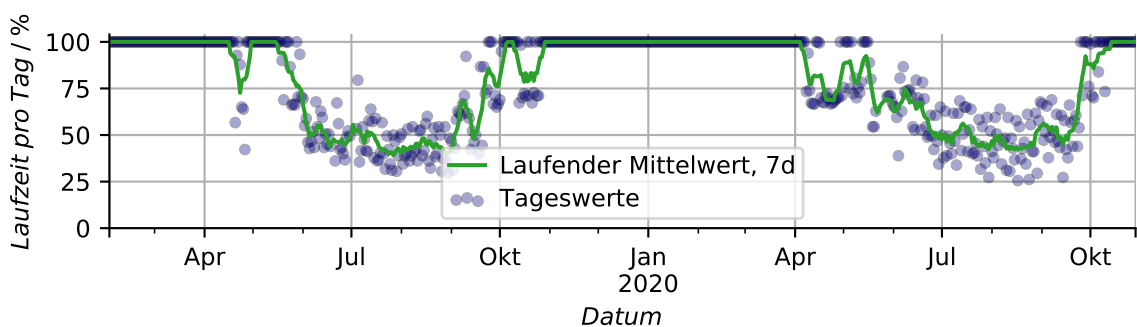
Darüber hinaus belasten zum Beispiel thermische Spannungen die Antriebsmaschine und führen zu erhöhtem Verschleiß. Zusätzliche Verluste durch Durchmischungen im TES oder Einregelvorgänge müssen in Kauf genommen werden. Weiterhin ist die Anzahl der Schaltvorgänge ein guter Indikator für die Flexibilität des Anlagensystems. Im Rahmen des Forschungsprojektes HochEff-TWE untersuchte Standardanlagen mit Gaskessel weisen zwischen 17 und 84 Einschaltvorgänge je Tag auf [22].

Die Anzahl der täglichen Einschaltvorgänge des BHKWs ist in Abb. 4.9 dargestellt. Im Sommer werden an ca. jedem vierten Tag zwei Schaltvorgänge registriert. Durchschnittlich schaltet das BHKW im Sommer 1,27 mal pro Tag an, wie anhand des laufenden Mittelwerts verdeutlicht wird. Im Winter wird das BHKW unterbrechungsfrei betrieben. Schaltvorgänge werden nicht verzeichnet. Das BHKW war dabei, wie in roten Punkten verdeutlicht, immer an. Nur zur Wartung und zum Umbau des Abgas-Wärmeübertragers Ende Juni und Anfang August war das BHKW insgesamt drei Tage abgeschaltet. Im Jahresmittel schaltet das BHKW 0,43 mal pro Tag an.



**Abbildung 4.9:** Anzahl täglicher Anschaltvorgänge des BHKWs sowie BHKW-Betrieb je Tag

Die tägliche BHKW-Laufzeit ist in Abb. 4.10 anhand von Tageswerten sowie des laufenden Mittelwerts über 7 d aufgetragen. Im Winter ist das BHKW zu 100 % der Zeit, entsprechend 24 h pro Tag, in Betrieb. Im Sommer wird der Wärmebedarf des Gebäudes mit einer Laufzeit von 40 % bis 45 % gedeckt. Aufgrund der geringen Dämmstärke der Gebäudehülle wird bei Unterschreiten einer Außentemperatur von ca. 11,4 °C ein Vollbetrieb erreicht.



**Abbildung 4.10:** Tägliche Laufzeit des BHKWs; 100 % entsprechen 24 h/d



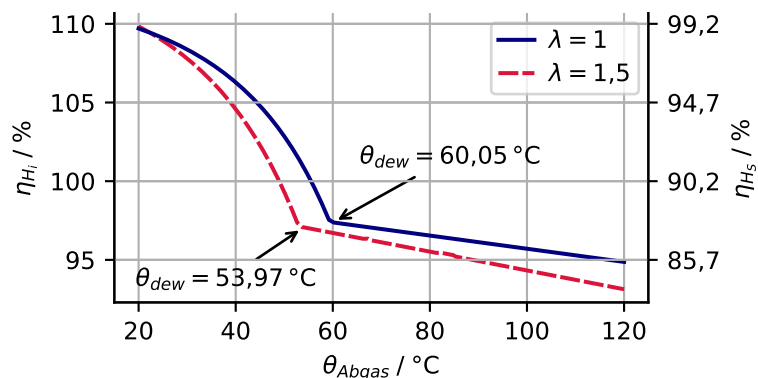
### 4.2.3 Effizienz

Die Ermittlung der Effizienz des BHKWs erfolgt anhand des über eine Zeitspanne von acht Monaten aufgezeichneten Gasverbrauchs. Die Effizienz wird hierbei in drei Teilwirkungsgrade unterteilt: Den elektrischen Wirkungsgrad  $\eta_{el}$ , den thermischen Wirkungsgrad ohne Abgas-Wärmeübertrager  $\eta_{th,CHP}$  und den thermischen Wirkungsgrad des Abgas-Wärmeübertragers  $\eta_{th,HEX}$ .

#### 4.2.3.1 Effizienz des Abgas-Wärmeübertragers

Der dem BHKW nachgeschaltete Abgas-Wärmeübertrager ist ein auf Abgaskondensation ausgelegter Plattenwärmeübertrager mit 40 Platten und zwei Pässen. Bei einem mit Erdgas betriebenen BHKW ohne Turbolader ist der Öleintrag im Abgas in der Regel vernachlässigbar, sodass die Verschmutzung des Wärmeübertragers gering ausfallen sollte. Herstellerseitig wird ein fouling factor von 5 % für das erste Betriebsjahr angegeben.

Das BHKW wird mit einem Verbrennungsluftverhältnis von  $\lambda \approx 1$  betrieben, einem typischen Wert für Gasmotoren ohne Turboaufladung. Die Abgastemperatur des BHKWs vor dem Wärmeübertrager beträgt konstant  $111\text{ °C}$ . Der Zusammenhang zwischen der Effizienz, dem Taupunkt  $\theta_{dew}$ , und der Abgastemperatur ist für zwei verschiedene Verbrennungsluftverhältnisse in Abb. 4.11 dargestellt. Es wird die Verbrennung von Erdgas der Qualitätsstufe H mit einem Methananteil von 96 % bei einer Außentemperatur von  $10\text{ °C}$  und einer relativen Luftfeuchte von 79 % betrachtet. Zudem werden Verluste von 1,5 % angenommen. Die Berechnungsmethodik mittels Abgasrechnung ist im Detail in [48] erläutert. Sobald der Taupunkt unterschritten wird, reicht eine geringe Abkühlung des Abgases aus, um die Effizienz erheblich zu steigern. Es ist sinnvoll, einen Kompromiss aus Effizienz und Aufwand zu finden, da der technische Aufwand für die Abkühlung mit jedem Grad steigt. Beispielsweise kann die Effizienz bei  $\lambda = 1$  bezüglich des Heizwertes bei einer Abkühlung des Abgases von  $111\text{ °C}$  auf  $40\text{ °C}$  um 11 % gesteigert werden. Mit einer weiteren Abkühlung auf  $25\text{ °C}$  können nur weitere 2,5 % Energie gewonnen werden.

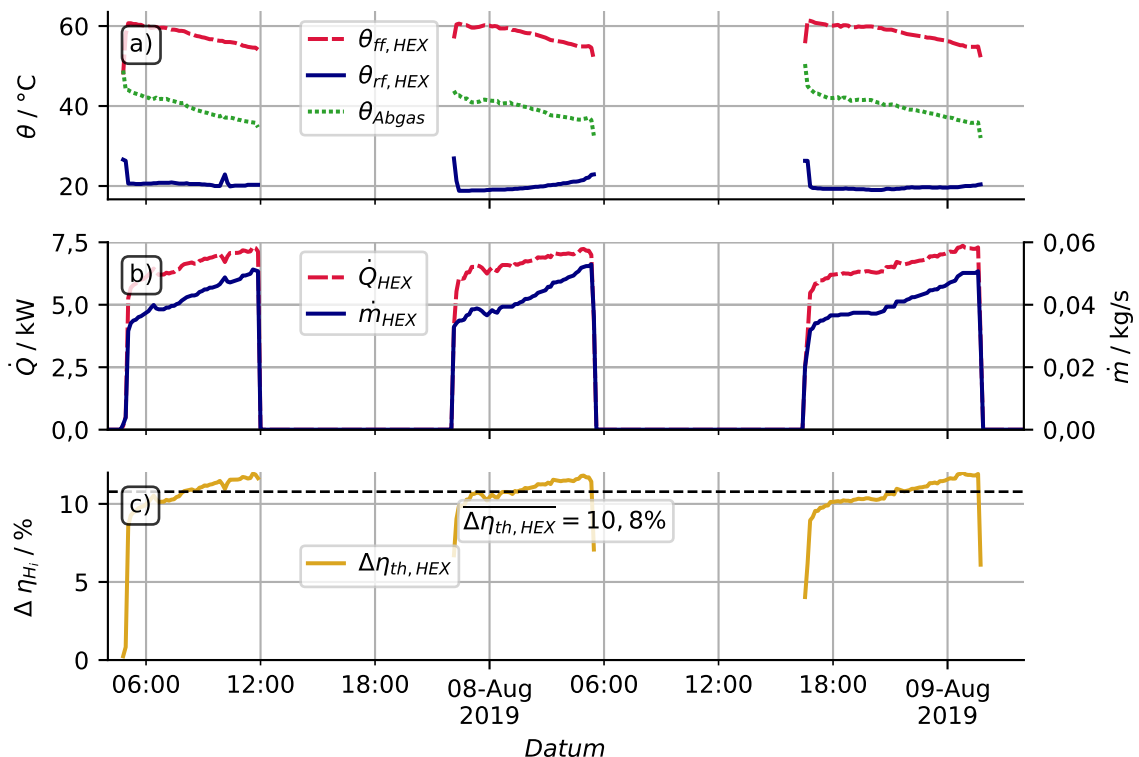


**Abbildung 4.11:** Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Abgastemperatur und vom Verbrennungsluftverhältnis

Messdaten des Abgas-Wärmeübertragers über drei TES-Ladezyklen sind in Abb. 4.12 aufgeführt. Die Temperaturen in Teilabbildung a) zeigen, dass das Abgas im Mittel auf  $39,6\text{ °C}$  abgekühlt werden kann. Bei einer Eintrittstemperatur von  $111\text{ °C}$  ergibt sich ein Temperaturhub von  $\Delta\theta_{Abgas} = 71\text{ °C}$ . Der

Taupunkt des Abgases wird um 20 °C unterschritten. Die Vorlauftemperatur nach dem Wärmeübertrager liegt bei 54 °C bis 60 °C, die Rücklauftemperatur ist konstant. Mit zunehmender Dauer des Ladezyklus erhöht die BHKW-interne Regelung den Massenstrom, um bei steigender Temperatur der Rückläufe HT<sub>A</sub> und HT<sub>B</sub> eine konstante Leistung des internen Kühlkreislaufes zu erzielen. Dadurch steigen der Massenstrom und die Leistung über den Abgas-Wärmeübertrager, siehe Abb. 4.12 b). Die zugehörigen Temperaturen nehmen ab.

Die Wirkungsgradsteigerung bezüglich des Heizwertes durch Einsatz des zusätzlichen Wärmeübertragers wird in Abb. 4.12 c) analysiert. Es werden im Laufe des Ladezyklus 9,3 % bis 13,6 % erreicht. Der Mittelwert liegt bei 10,8 %. Die Abweichungen zum zuvor mittels Abgasrechnung berechneten Wert sowie zum Jahresmittel von  $\Delta\eta_{th,HEX} \approx 10,6\%$  nach Abschnitt 4.2.1 sind vernachlässigbar.



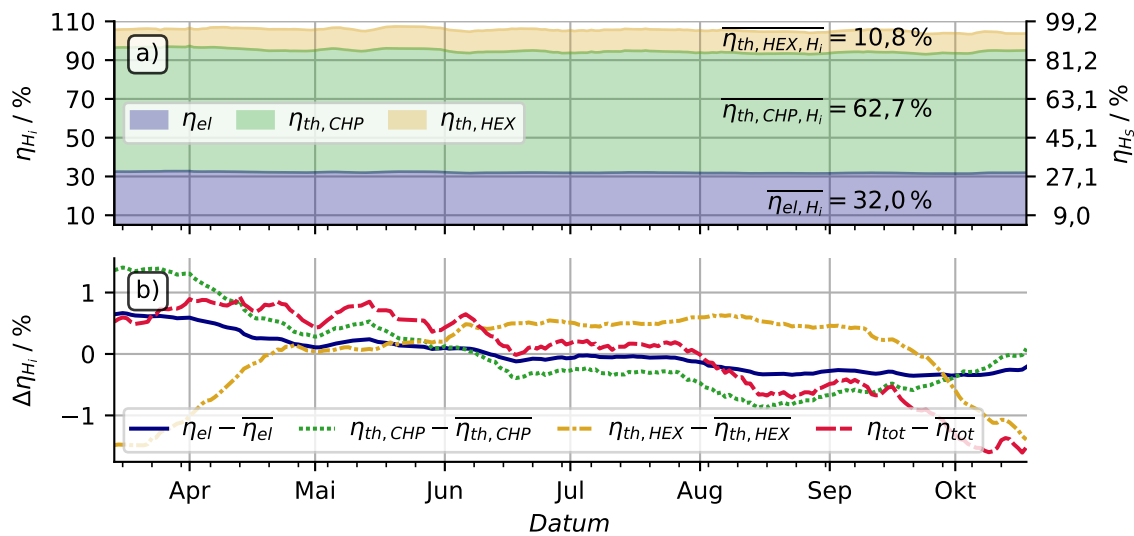
**Abbildung 4.12:** BHKW-Abgaswärmeübertrager – a) Temperaturen; b) Leistung und Massenstrom; c) Steigerung des Wirkungsgrades bezüglich des Heizwertes durch Abgas-Wärmeübertrager

Eine weitere Steigerung der Effizienz wäre möglich, würde die Vorlauftemperatur und somit der Massenstrom über den Abgaswärmeübertrager höher eingestellt werden. Diese zusätzliche Wärmeauskopplung ginge jedoch zu Lasten der Flexibilität. Da das Hauptziel des Feldtests das Aufzeigen hoher Flexibilitäten ist, wird auf diesen Schritt verzichtet.

#### 4.2.3.2 Gesamtwirkungsgrad des BHKWs

Die Gesamtwirkungsgrad des BHKWs ist in Abb. 4.13 a) abgebildet. Dieser ist aus dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad des Kern-BHKWs sowie dem thermischen Wirkungsgrad des Abgas-

Wärmeübertragers zusammengesetzt. Im Verlauf über sieben Monate sind nur geringe Schwankungen zu erkennen. Abweichungen zu den Jahresmittelwerten sind dadurch bedingt, dass die jeweiligen Wirkungsgrade von den Schaltzahlen des BHKWs, der Temperatur der Rückläufe sowie den Massenströmen abhängig sind. Diese sind wiederum von der Außentemperatur, das heißt saisonal, bedingt. Diese Abhängigkeiten sind in Abb. 4.13 b) anhand der saisonalen Abweichungen der Wirkungsgrade von deren Erwartungswerten dargestellt.



**Abbildung 4.13:** Effizienz des BHKWs im Jahr 2020 – a) Effizienz bezüglich Heizwert und Brennwert im Wochenmittel; b) Abweichung der Effizienz vom Erwartungswert

Im Winter ist der mittlere Bereich des TES kalt. Der Massenstrom über das BHKW ist geringer. Es kann weniger Kondensationsenthalpie entnommen werden,  $\eta_{th,HEX}$  sinkt um bis zu 1,5%. Der elektrische und thermische Wirkungsgrad des BHKWs zeigen eine geringe Abhängigkeit von der Temperatur der Rückläufe. Hier ist vorrangig die Anzahl der Schaltvorgänge entscheidend. Bei jedem Anschaltvorgang vergehen ca. 10 min Betriebszeit, bevor das BHKW Energie liefert. Nach Abb. 4.9 schaltet das BHKW im August und September 2020 1,4 mal pro Tag an. Dies ist für einen thermischen Effizienzverlust von bis zu 1% verantwortlich. Der elektrische Verlust liegt bei ca. 0,35%. Läuft das BHKW konstant, steigt der Wirkungsgrad gegenüber dem Mittelwert um bis zu 1,4% bzw. 0,7%.

Die saisonalen Abweichungen der Wirkungsgrade vom Erwartungswert gleichen sich zum Großteil gegenseitig aus. Dadurch liegt die Gesamteffizienz des BHKWs über ein vollständiges Jahr nahezu konstant bei  $\eta_{CHP,tot,H_i} \approx 105,5 \pm 1,5\%$  beziehungsweise  $\eta_{CHP,tot,H_s} \approx 95,1 \pm 1,4\%$ . Der mittlere Wertebereich mit maximaler Abweichung ist in Tabelle 4.4 für alle Teileffizienzen zusammengefasst.

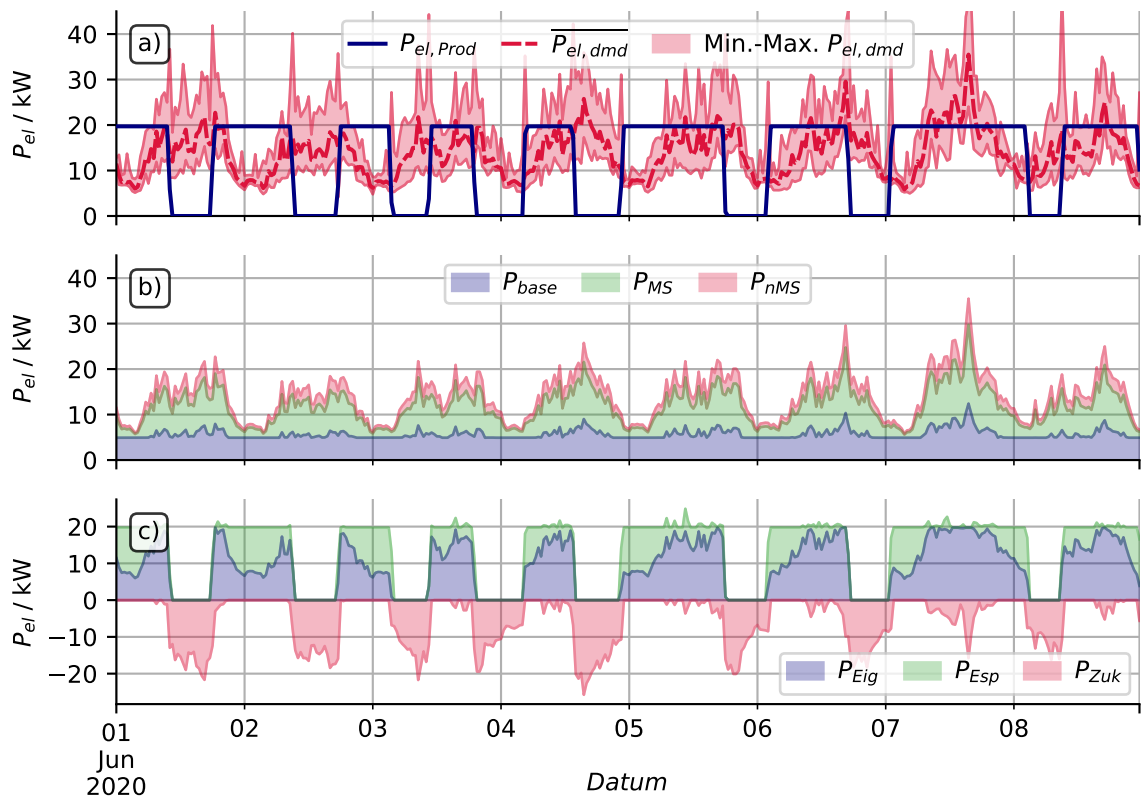
**Tabelle 4.4:** Effizienz des BHKWs bezüglich Heizwert und Brennwert nach Quelle

	$\eta_{el} / \%$	$\eta_{th,CHP} / \%$	$\eta_{th,HEX} / \%$	$\eta_{th,tot} / \%$	$\eta_{CHP,tot} / \%$
Heizwert	$32,0 \pm 0,7\%$	$62,9 \pm 1,4\%$	$10,6 \pm 1,5\%$	$73,4 \pm 1,2\%$	$105,5 \pm 1,5\%$
Brennwert	$28,9 \pm 0,6\%$	$56,7 \pm 1,2\%$	$9,5 \pm 1,3\%$	$66,2 \pm 1,1\%$	$95,1 \pm 1,4\%$

#### 4.2.4 Stromlastprofile

Die Stromprofile des Feldtests werden anhand der BHKW-Produktion  $P_{el,Prod}$  sowie der ein- und ausgehenden elektrischen Energie im sub-Sekunden-Bereich gemessen. Daraus können der Stromverbrauch des Gebäudes  $P_{el,dmd}$ , die Eigennutzung  $P_{Eig}$ , die Einspeisung  $P_{Esp}$  und der Bezug  $P_{Zuk}$  berechnet werden. Im Gegensatz zu Abschnitt 2.5.4 wird der bezogene Strom für alle Mieter bilanziert. Das heißt auch für diejenigen, die nicht am Mieterstrommodell teilnehmen. Zur Berechnung der Grundlast  $P_{base}$  und des Mieterstroms  $P_{MS}$  wird angenommen, dass die Grundlast etwa 40 % des gesamten Strombedarfs ausmacht. Stichprobenartige Analysen der Verbraucher haben gezeigt, dass diese Annahme gerechtfertigt ist. Der restliche Strombedarf wird anhand einer Teilnahmequote am Mieterstrommodell von 75 % auf den Mieterstrom und den restlichen Strombedarf  $P_{nMS}$  aufgeteilt.

Die Ergebnisse dieser Bilanzierung sind für eine Woche im Juni in Abb. 4.14 aufgeführt. Tabellen 4.5 und 4.6 fassen die Ergebnisse für den Sommer 2020, exklusive Sommerferien, sowie den Winter 2020, vor Beginn der Corona-Krise, zusammen.



**Abbildung 4.14:** Stromlastprofile Juni 2020 – a) Stromverbrauch und Produktion; b) Aufteilung des Stromverbrauchs auf Grundlast, Mieterstrom und Sonstige; c) Aufteilung der Produktion auf Eigennutzung, Einspeisung sowie zugekauften Strom

Das BHKW wird auf Wunsch des Betreibers wärmegeführt betrieben, daher weisen die Betriebszeiten nur gelegentlich Überdeckungen mit den Verbrauchsspitzen auf. Dennoch können im Winter und im Sommer 68 % des Stroms vor Ort genutzt werden, wovon etwa 75 % in das Mieterstromprojekt fließen. Dies ist auf die vergleichsweise hohe Grundlast des Gebäudes zurückzuführen. Aufgrund einer großen

Tiefgarage mit ständiger aktiver Belüftung sowie fünf separaten Treppenhäusern mit je einem Aufzug liegt die Grundlast ungefähr 20 % über dem, was beispielsweise auf Basis der BDEW Standardlastprofile für Strom nach H0 angenommen wird.

Im Sommer müssen 45 % des Stroms aus dem Netz bezogen werden. Im Winter sind es 6 %. Kurzfristige Lastspitzen, wie in Abb. 4.14 a) anhand der Fläche markiert, haben auf die Bezugsmenge einen vernachlässigbaren Einfluss. Nur zu Zeiten, zu denen der mittlere Strombedarf über der Produktion liegt, wird eine relevante Strommenge bezogen.

**Tabelle 4.5:** Mittlerer täglicher elektrischer Energiebedarf des Wohngebäudes; aufgeteilt auf Verbraucher

	$E_{el,dmd}$ kW h/d	$E_{el,Prod}$ kW h/d	$E_{base}$ kW h/d	$E_{MS}$ kW h/d	$E_{nMS}$ kW h/d	$E_{Eig}$ kW h/d	$E_{Esp}$ kW h/d	$E_{Zuk}$ kW h/d
Sommer	323,5	259,8	130,3	144,9	48,3	176,8	83,0	146,5
Winter	341,2	471,0	140,3	150,7	50,2	320,7	150,3	20,4

**Tabelle 4.6:** Anteile des täglichen elektrischen Energiebedarfs der Verbraucher am Gesamtbedarf des Wohngebäudes

	$\frac{E_{base}}{E_{el,dmd}}$ %	$\frac{E_{MS}}{E_{el,dmd}}$ %	$\frac{E_{nMS}}{E_{el,dmd}}$ %	$\frac{E_{Eig}}{E_{el,Prod}}$ %	$\frac{E_{Esp}}{E_{el,Prod}}$ %	$\frac{E_{Zuk}}{E_{el,dmd}}$ %
Sommer	40,3	44,8	14,9	68,1	31,9	45,3
Winter	41,1	44,2	14,7	68,1	31,9	6,0

#### 4.2.5 Flexibilität der Anlage

Die Flexibilität der Anlage wurde bereits in [22], [49] ausgewertet. Dieser Abschnitt sowie zugehörige Unterabschnitte sind zu Teilen den genannten Quellen entnommen.

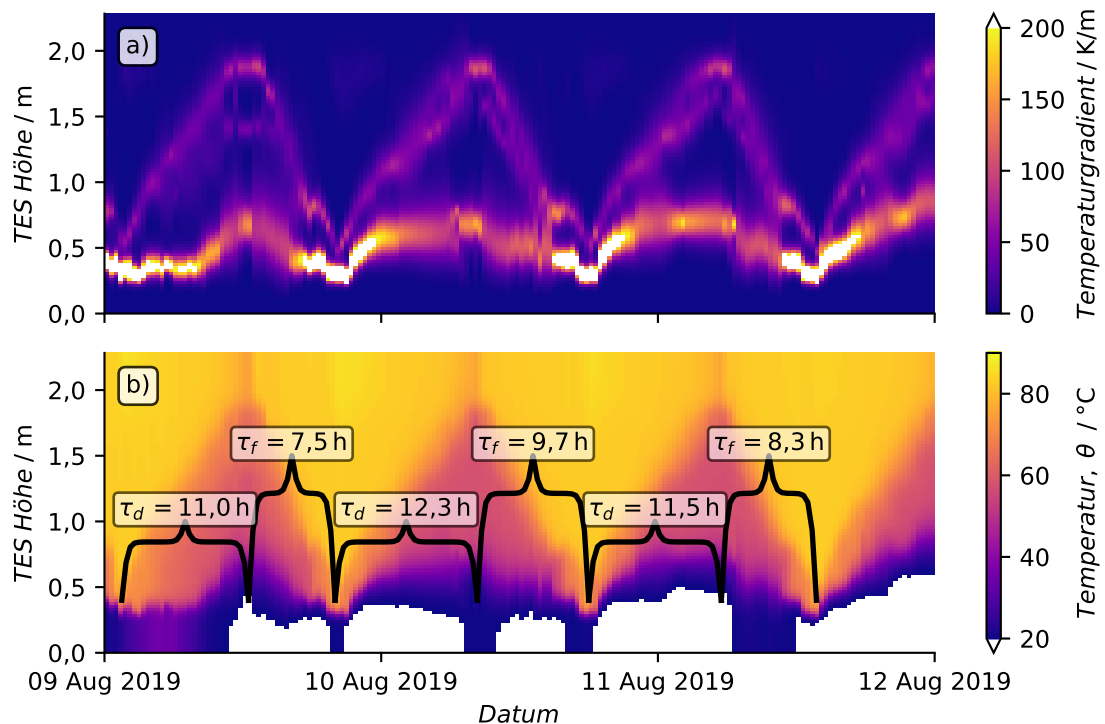
Die Flexibilität von KWK-Anlagen ist einer der elementaren Parameter, um auch im Sommer von Konzepten wie zum Beispiel Mieterstrom und virtuellen Kraftwerken zu profitieren und den Ausfall von Vergütungen nach dem KWK-Gesetz zu Zeiten negativer Strompreise zu vermeiden. Weiterhin sieht der Entwurf des neuen KWKG nach §8 Abs. 4, Stand Oktober 2020, eine Reduktion der jährlichen förderfähigen Vollbetriebsstunden auf 3500 h vor. Ein wärmegeführter Betrieb eines kleinen BHKWs, wie es im Gebäudebereich derzeit üblich ist, wird damit unrentabel. Eine in Relation zum Wärmebedarf hohe BHKW-Leistung wird notwendig, um von den Förderungen zu profitieren. Um ein solches BHKW betreiben zu können, ohne durch häufige Starts und Stopps große Einbußen bei der Effizienz hinnehmen zu müssen, muss die Anlagentechnik eine hohe Flexibilität aufweisen.

Zur qualitativen und quantitativen Bewertung der Lastverschiebungskapazitäten wird die zeitliche Flexibilität verwendet, siehe Abschnitt 2.4. Es wird zwischen der verzögerten Flexibilität  $\tau_d$  und der erzwungenen Flexibilität  $\tau_f$  unterschieden. Das Bereitstellen von Wärme durch ein Hilfsaggregat oder das „Vernichten“ von Wärme durch Notkühler wird nicht betrachtet.

Eine erste qualitative Auswertung der Flexibilität erfolgt in Abb. 4.15 b) anhand der Temperaturen im TES über drei Ladezyklen im Sommer. Abb. 4.15 a) zeigt die zugehörigen Temperaturgradienten. Auf der Abszisse ist die Zeit aufgetragen, auf der Ordinate die Höhe des Pufferspeichers.

Hohe Temperaturgradienten sind ein Zeichen für gute Schichtungen im Speicher. Typische Werte liegen im Bereich von 20 K/m mit Maxima bis zu 50 K/m. In der Pilotanlage werden in der unteren Mischzone durchschnittlich Werte von über 150 K/m erreicht, mit Maxima von bis zu 400 K/m. Hier liegt in einer Höhe von ca. 0,25 m die Grenzschicht zwischen dem Kaltwasserreservoir und dem Zirkulationsrücklauf. Die obere Grenzschicht, zwischen Zirkulationsrücklauf und Heißwasserreservoir, hat einen Temperaturgradienten von durchschnittlich 80 K/m.

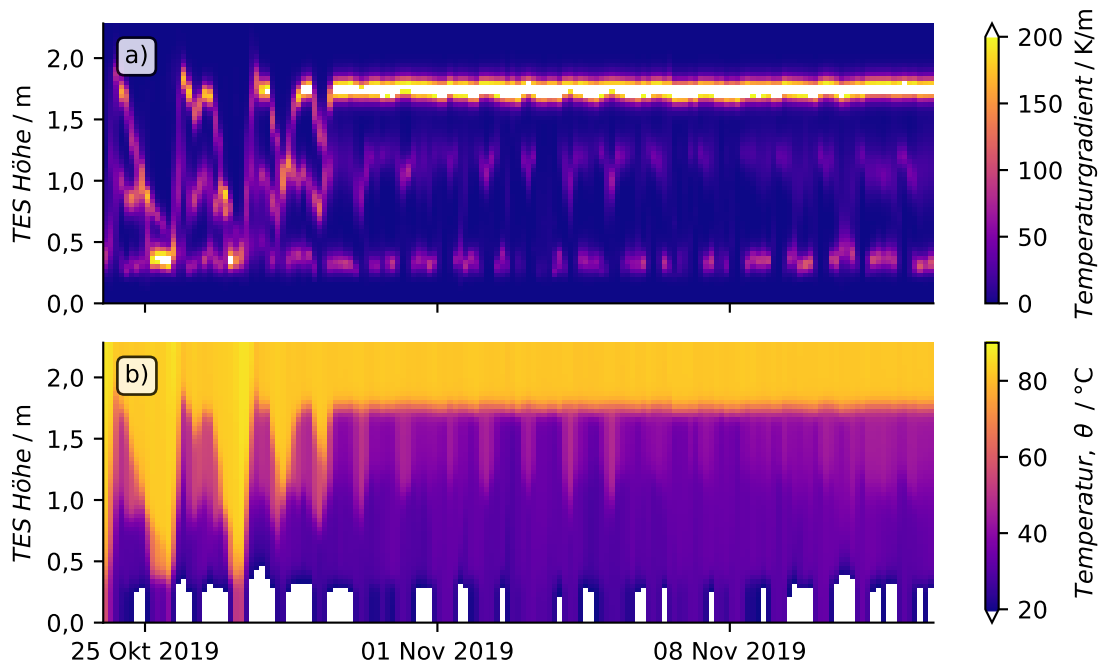
Diese Grenzschichten sind auch im Temperaturverlauf des Speichers in b) zu erkennen. Um die kalten verfügbaren Temperaturen hervorzuheben, werden Temperaturen unter 20 °C in weiß dargestellt. Weiterhin sind die Ladezyklen/Flexibilitäten des BHKWs eingetragen. Es können erzwungene Flexibilitäten von 7,5 h bis 9,7 h und verzögerte Flexibilitäten von 11 h bis 12,3 h erzielt werden. Eine Abhängigkeit der gemessenen Flexibilitäten vom Einschaltzeitpunkt des BHKWs ist zu erkennen. Schaltet das BHKW in der Mittagszeit an, wie am 10. August, so kann aufgrund des höheren Verbrauchs eine große erzwungene Flexibilität erreicht werden. Fällt die Phase der Abschaltung in die Nacht, siehe Übergang vom 9. auf den 10. August, ist hingegen die erreichte verzögerte Flexibilität besonders hoch.



**Abbildung 4.15:** Flexibilität im Sommer – a) Temperaturgradient im TES, Werte >200 K/m in weiß dargestellt; b) Temperaturverlauf im TES, Werte unter <20 °C in weiß dargestellt, Flexibilität eingetragen

Mit abnehmender Außentemperatur beziehungsweise zunehmender Heizlast geht die Anlage in den Winterbetrieb über. Aufgrund der derzeitigen Vergütungen für KWK-Anlagen ist ein Dauerbetrieb einem flexiblen Betrieb vorzuziehen. Mit Einführung der Novelle des KWKG und mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im Stromnetz kann jedoch auch ein flexibler Betrieb im Winter profitabel werden. In diesem Fall kann die Pilotanlage auch im Winter strom-/netzgeführt betrieben werden. In Abb. 4.16 ist der Übergang des Anlagenbetriebs von der Übergangszeit in den Winter dargestellt.

Teil a) zeigt den Temperaturgradienten. Pendelt dieser im Sommerbetrieb und in der Übergangszeit mit dem Beladestatus des TES, so ist im Winterbetrieb auf Höhe des Vorlaufs zu den Heizkreisen, bei ca. 1,75 m, eine konstante Mischzone mit einem Gradienten  $\geq 200$  K/m zu erkennen. Dies zeigt auch der Temperaturverlauf in Abb. b). Bis zum Vorlauf zu den Heizkreisen ist der Speicher zur Sicherstellung der Warmwasserbereitung auf über  $80^\circ\text{C}$  erwärmt. Darunter ist eine Mischzone, in welcher die Temperatur aus einer Mischung des BHKW-Vorlaufs, des Heizungsrücklaufs und des Zirkulationsrücklaufs bestimmt wird. Am unteren Ende des Speichers wird auch im Winter ein Kaltwasserreservoir zur Steigerung der Effizienz vorgehalten.



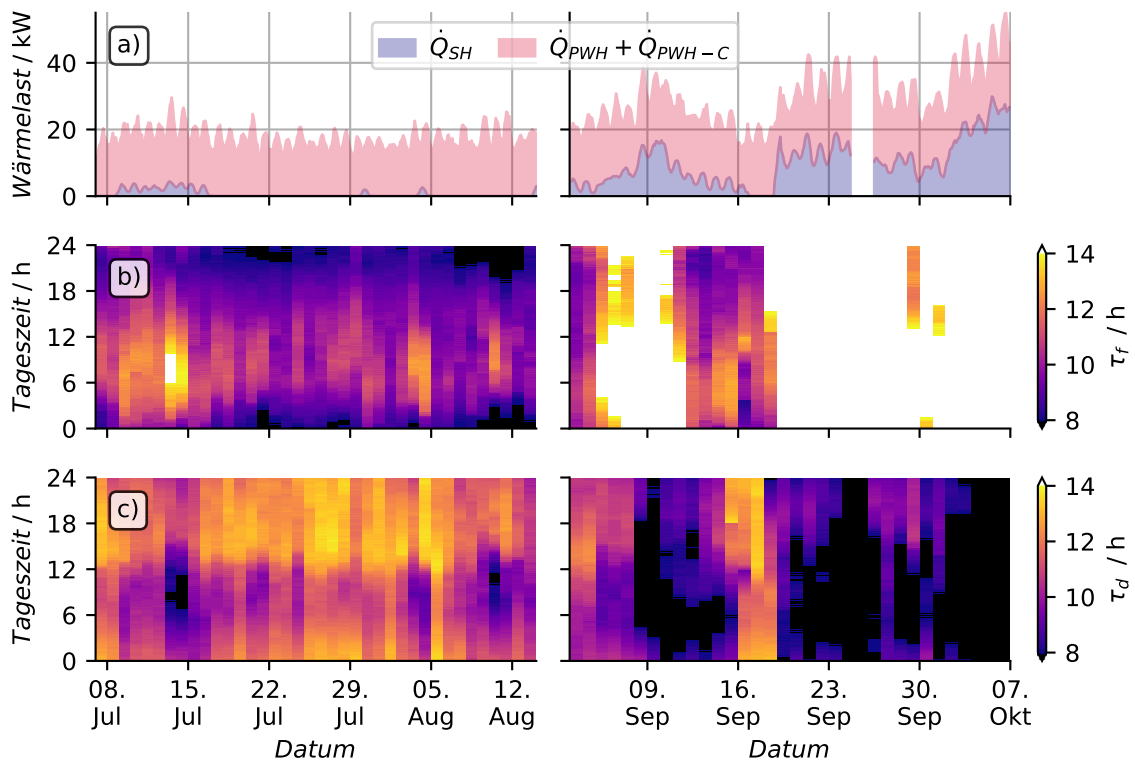
**Abbildung 4.16:** Flexibilität in der Übergangszeit und im Winter – a) Temperaturgradient im TES, Werte  $>200$  K/m in weiß dargestellt; b) Temperaturverlauf im TES, Werte  $<20^\circ\text{C}$  in weiß dargestellt

Eine vergleichbare qualitative und quantitative Bewertung der BHKW-Flexibilität zu jedem Zeitpunkt wird erreicht, indem die Flexibilitäten unabhängig von der BHKW-Startzeit berechnet werden. Die Ergebnisse für zwei Zeiträume im Jahr 2019 sind in Abb. 4.17 dargestellt. In Zeile a) sind die an der Anlage anliegenden Wärmelasten dargestellt. Zeile b) zeigt die erzwungene Flexibilität, Zeile c) die verzögerte Flexibilität. In der linken Spalte ist ein Datumsbereich mit vernachlässigbarer Heizlast gewählt, in der rechten Spalte liegt eine Heizlast vor. Die Ordinate bildet bei b) und c) die Stunden des Tages ab. Das heißt die im Tagesverlauf auftretenden Flexibilitäten können auf der Ordinate untersucht werden, der tägliche Verlauf auf der Abszisse. Werte über 14 h werden in weiß dargestellt, Werte unter 8 h in schwarz.

In der linken Reihe, bei vernachlässigbarer Heizlast, ist ein tägliches Muster zu erkennen. Tagsüber ist der Warmwasserverbrauch hoch.  $\tau_f$  erreicht zu diesen Zeiten die höchsten Werte.  $\tau_d$  ist demgegenüber am höchsten, wenn die Verbräuche gering sind, das heißt ab dem Nachmittag bis um ca. 6 h morgens. Schon ein geringer Anstieg der Heizlast vom 9. bis zum 17. Juli verursacht ein Ansteigen der erzwungenen und ein Abfallen der verzögerten Flexibilität.

Auf der rechten Seite liegt eine geringe Heizlast an. Die Außentemperatur beträgt zwischen dem

09. und 11. September ca. 13 °C. Durch den zusätzlichen Wärmebedarf ist eine deutlich erhöhte erzwungene Flexibilität zu erkennen. Werte über 14 h werden fast durchgängig erreicht. Überschreitet die Summe der Wärmelast die BHKW-Leistung von ca. 45 kW, wird die Flexibilität unendlich groß. Das BHKW kann ohne Unterbrechung betrieben werden. Am 23. September liegt beispielsweise der Mittelwert mit Standardabweichung bei  $26,8 \pm 3,6$  h, am 5. Oktober schon bei  $184,8 \pm 9,4$  h. Die gesamte Wärmelast beträgt an diesen Tagen im Mittel 34,7 kW beziehungsweise 42,9 kW. Im Gegenzug sinkt die verzögerte Flexibilität. So beträgt diese am 23. September  $\bar{\tau}_d \pm \sigma(\tau_d) = 7,2 \pm 0,9$  h, am 5. Oktober  $4,3 \pm 1,0$  h. Schwankungen aufgrund der Tageszeit bleiben erhalten, haben jedoch einen geringeren Einfluss.



**Abbildung 4.17:** Tageszeitabhängige Flexibilität im Sommer (links) und in der Übergangszeit (rechts) – a) Heizlast sowie PWH- und PWH-C-Erwärmung; b) erzwungene Flexibilität  $\tau_f$ ; c) verzögerte Flexibilität  $\tau_d$ ; Werte  $>14$  h sind in weiß dargestellt, Werte  $<8$  h in schwarz

Die Wertebereiche der Flexibilität sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. Es werden nur Zeiträume betrachtet, zu denen keine Heizlast vorliegt. Es können zu nahezu jeder Zeit mindestens 7 h Flexibilität bereitgestellt werden.

**Tabelle 4.7:** Erzwungene und verzögerte Flexibilität in Zeiten ohne Heizlast

	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert tagsüber	Mittelwert nachts
$\tau_f$ / h	6,9	13,1	9,9	8,6
$\tau_d$ / h	7,5	14,9	11,5	12,7



## 5 Simulation von dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mittels Parametervariation

Die in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse des Feldtests zeigen, dass mithilfe einer modernen LowEx-TWE-Anlage auch im Sommer niedrige Rücklauftemperaturen und somit eine hohe Effizienz, Lastglättung und Flexibilität erreicht werden können. Um einen Ergebnistransfer von der vorgestellten Einzelanlage auf eine große Bandbreite an Anlagentypen und Anlagengrößen zu ermöglichen, wird in diesem Kapitel eine Simulation von TWE-Anlagen mittels Parametervariation durchgeführt. Im Fokus steht hierbei die Auswertung bezüglich der erreichten Flexibilität.

In Abschnitt 5.1 wird das eigens für diesen Zweck programmierte Simulationstool „MultiSim“ vorgestellt. Eine Validierung eines mit „MultiSim“ simulierten LowEx-Anlagensystems wird in Abschnitt 5.2 anhand von Labormessdaten und Messdaten aus dem Feldtest vorgenommen. Abschnitt 5.3 erläutert die im Zuge des Ergebnistransfers simulierten Anlagentypen. Für jeden Anlagentyp werden aus dem in Abschnitt 5.4 mittels Design of Experiments erstellten Parametergitter spezifische Parametersätze entnommen. Jeder Parametersatz wird über ein Simulationszeitfenster von 15 Tagen simuliert. Eine erste Auswertung der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 5.5.

### 5.1 Vorstellung des Simulationsprogramms

Das Simulationsprogramm „MultiSim“ ist nahezu vollständig in der objektorientierten Programmiersprache Python, Version 3.7, geschrieben. Es ermöglicht das Erstellen einer Anlage aus verschiedenen Bauteilen wie Rohren, Speichern und Wärmeübertragern. Die Bauteile werden dazu an Konnektoren gekoppelt. Verschiedene Regler, zum Beispiel PID- oder Zweipunktregler, steuern aktive Bauteile wie Pumpen und Ventile. Randbedingungen werden konstant oder als Zeitreihe vorgegeben. Massenströme werden vereinfacht als Kolbenströmung betrachtet, Wärmetransportphänomene werden über die Konvektions-Advektions-Gleichung mit einem zusätzlichen Quellen/Senken-Term abgebildet.

Durch die Verwendung von Klassen können mittels Vererbung neue Komponenten modular aus bestehenden Komponenten kombiniert oder bestehende Komponenten um Funktionen erweitert werden. Zum Beispiel basiert ein verzweigtes Rohr auf einem einfachen Rohr und ein PID-Regler auf einer abstrakten Regler-Klasse, ohne dass zur Erstellung auf interne Programmabläufe zugegriffen werden muss. Dadurch wird bei geringer Komplexität eine hohe Modularität sichergestellt. Weiterhin werden alle rechenintensiven Prozesse und empirische Relationen durch eine Just-in-time-Kompilierung in Maschinencode übersetzt, wodurch diese schneller und auch parallel ausgeführt werden können. Auch diese kompilierten Funktionen können modular zusammengesetzt und weiterverwendet werden, wenn neue Komponenten erstellt werden.

Um dem offenen Charakter aus Bundesmitteln finanzierter Forschungsprojekten zu entsprechen, wird das hier vorgestellte Simulationstool „MultiSim“ auf GitHub zur Verfügung gestellt [129]. Eine Weiterentwicklung, Versionsverwaltung und Zusammenarbeit am Programm ist dadurch möglich. Weiterhin wird Travis CI für eine agile Softwareentwicklung mit kontinuierlicher Integration genutzt. Automatische Tests des Quellcodes auf Fehler und Brüche des Programmierstils werden bei jeder Änderung des Quellcodes durchgeführt.

### 5.1.1 Programmablaufplan MultiSim

Der Programmablaufplan des Simulationsprogramms ist in Abb. 5.1 dargestellt. Nach der Erstellung einer Instanz der Simulations-Klasse können in beliebiger Reihenfolge Bauteile, Regler, Randbedingungen, Bauteil-Konnektoren hinzugefügt und Einstellungen wie die Datenspeicherung, der Lösungsalgorithmus, die Simulationsdauer und Weitere spezifiziert werden. Mit dem Aufruf der Funktion `initialize_sim()` wird die Eingabe beendet. Die Simulationsumgebung wird zusammengesetzt. Es wird überprüft, ob alle Parameter im Rahmen der Gültigkeitsbereiche liegen, alle Konnektoren der Bauteile verbunden und alle steuerbaren Bauteile geregelt sind und ob Randbedingungen und weitere Eingaben in einem korrekten Format vorliegen. Im Anschluss werden alle Arrays preallokiert, die Simulationsumgebung konstruiert und die Netztopologie zur Massenstromberechnung ermittelt. Die Ausführung von `start_sim()` startet die Simulation. Der Ablaufplan der iterativen Lösung wird im Anschluss im Detail erläutert. Ist dieser Sub-Prozess beendet, können Sensoren wie Temperaturfühler oder Wärmemengenzähler an Bauteilen hinzugefügt werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse nachbearbeitet. Nur relevante Informationen werden nach einem Downsampling gespeichert, um den Speicherplatzbedarf gering zu halten. Im Anschluss wird ein kurzer Ablaufbericht erstellt und die Simulation beendet.

Da alle Bestandteile des Simulationsprogramms serialisierbar sind, können mehrere Simulationen nach dem Paradigma „embarrassingly parallel“ auf Mehrkernprozessoren parallel laufen. Wird dies nicht oder werden dabei nicht alle Kerne genutzt, laufen vorkompilierte rechenintensive Sub-Prozesse parallel.

Den Ablaufplan der iterativen Lösung der Differentialgleichungssysteme zeigt Abb. 5.2. Während das Zeitfenster nicht vollständig berechnet ist, wird in jedem Schritt die Strömungstopologie angepasst. Dies beinhaltet beispielsweise die Anpassung des Massendurchsatzes von Pumpen oder die Aufteilung des Massenstroms anhand von drei-Wege-Ventilen nach aktualisierten Stellwerten der Regler.

Im Anschluss wird die Schleife des numerischen Löser betreten. Hier werden nicht-steife Differentialgleichungen explizit gelöst, siehe Abschnitt 5.1.2.4, andere implizit. Werden dabei Stabilitätsgrenzen nach von-Neumann verletzt, wird der Schritt abgebrochen und nach einer Anpassung der Schrittweite erneut berechnet. Sollte ein Schritt nicht lösbar sein, zum Beispiel da eine steife Differentialgleichung explizit gelöst wird und die stabile Schrittweite unter der minimalen Schrittweite liegt, wird die Simulation abgebrochen.

Ist der Schritt in allen Stufen stabil, greift die Schrittweitensteuerung nach Abschnitt 5.1.2.5 ein. Bei einem Fehler  $\epsilon \geq 1$  wird der Schritt abgelehnt und wiederholt. Bei kleineren Fehlern wird die Schrittweite angepasst und die Löser-Schleife verlassen. Anschließend stellen Regler die aktiven Bauteile anhand der neuen Stellgrößen nach, zeitreihenbasierte Randbedingungen werden gegebenenfalls interpoliert und aktualisiert. Überschreitet die Simulationszeit das gewählte Zeitfenster, wird der iterative Programmablauf beendet und zum äußeren linearen Programmablauf zurückgekehrt.

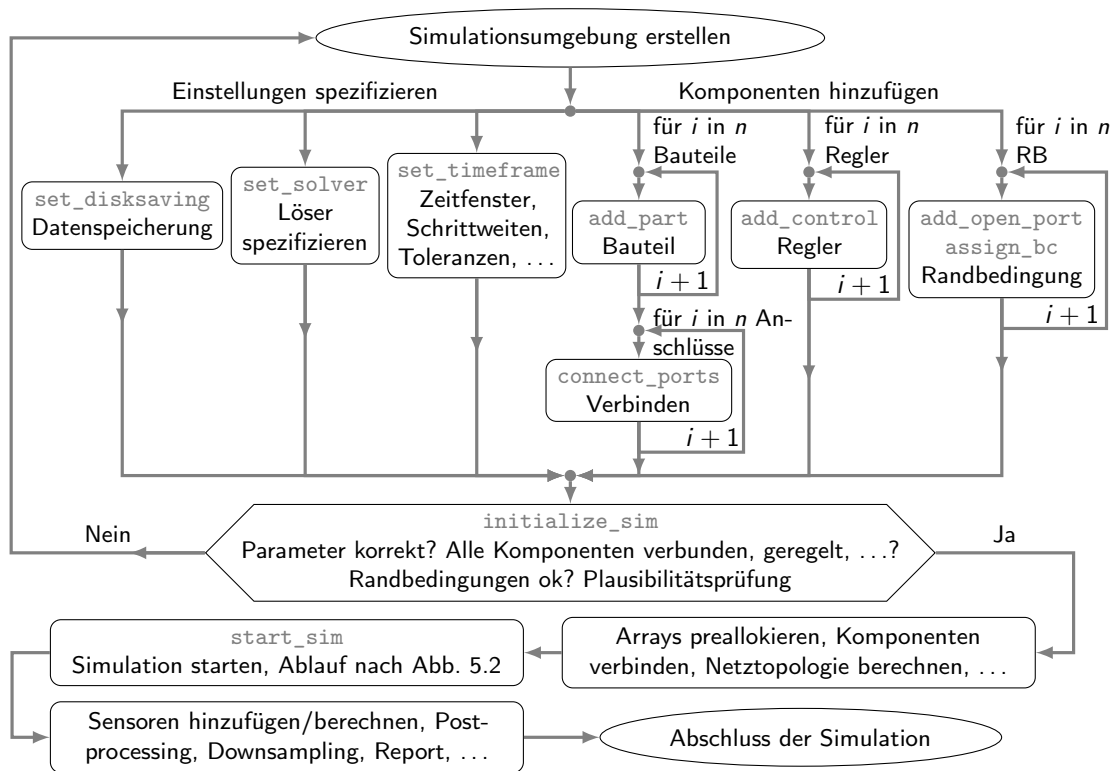


Abbildung 5.1: Programmablaufplan des Simulationsprogramms MultiSim

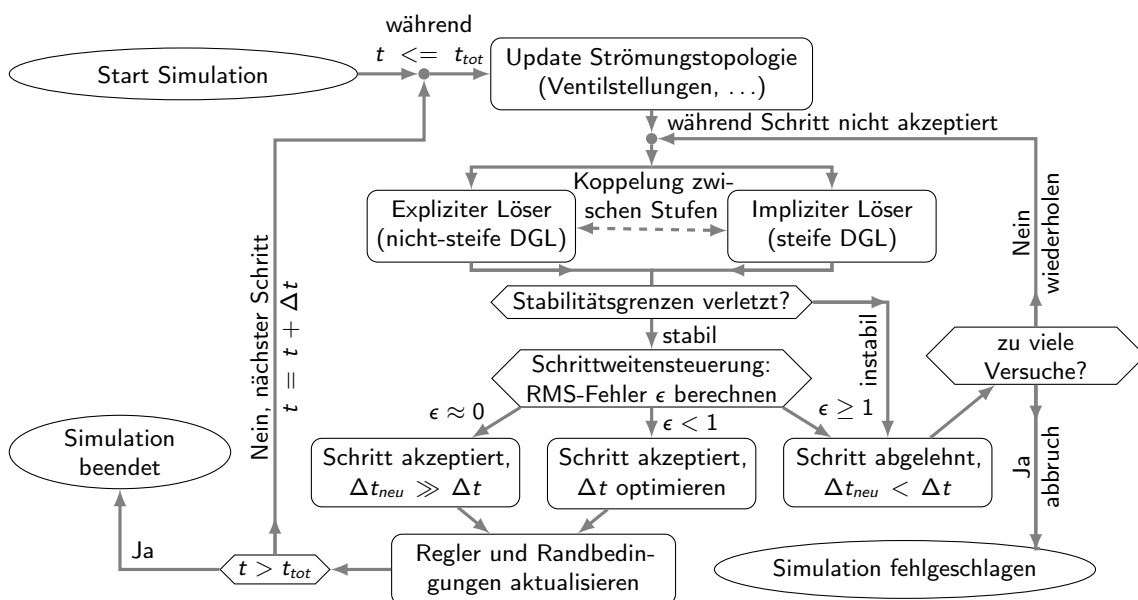


Abbildung 5.2: Programmablaufplan des iterativen Lösungsverfahrens für Differentialgleichungssysteme

### 5.1.2 Gleichungsmodell

Die speziellen Anforderungen einer zeitlich hoch aufgelösten Simulation von TWE-Anlagen mit Lastspitzen von wenigen Sekunden auf mehr als das zehnfache der Durchschnittsleistung erfordern eine hohe Flexibilität des Löser. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird der gesamte Löser inklusive Fehlerschätzer und Schrittweitensteuerung selbst geschrieben. Die Schrittweitensteuerung wird anhand aktueller Veröffentlichungen aus den Bereichen der Numerik implementiert.

Der Löser kann alle mittels Finite-Differenzen-Methode lösbaren Differentialgleichungen approximieren. In der hier betrachteten Konfiguration beschränkt sich dies bei allen Komponenten auf die Konvektions-Diffusions-Gleichung, gegebenenfalls mit Reaktionsterm. Abschnitt 5.1.2.1 behandelt die in „MultiSim“ verwendete Diskretisierung dieser Gleichung mittels Finite-Differenzen-Methode.

Der Konvektionsterm wird dazu auf eine eindimensionale Kolbenströmung reduziert und mittels des Upwind-Schemas diskretisiert. Dies ist eine übliche Vereinfachung für die Simulation von komplexen aus heterogenen Komponenten zusammengesetzten Energiesystemen, in denen kleinskalige Strömungseffekte eine untergeordnete Rolle spielen. Der Diffusionsterm wird, je nach Anforderung, zwei- oder dreidimensional mit zentralen Differenzen zweiter Ordnung diskretisiert. Die Berechnung der Wärmeleitung erfolgt anschließend anhand der in Abschnitt 5.1.2.2 erläuterten Zusammenhänge. Energieströme durch Konvektion und Diffusion werden in Energiebilanzen an den Zellen zusammengefasst, siehe Abschnitt 5.1.2.3.

Die Ableitung der Differentialgleichung nach der Zeit wird für nicht-steife Differentialgleichungen mittels der Heun-Methode ermittelt, wie in Abschnitt 5.1.2.4 ausgeführt. Steife Gleichungen werden über das implizite Trapezverfahren berechnet. Dies entspricht der impliziten Variante der Heun-Methode. Die in Abschnitt 5.1.2.5 eingeführte Schrittweitensteuerung sorgt dafür, dass jeder Schritt stabil ist und einen Kompromiss aus Genauigkeit und Simulationsfortschritt erfüllt.

#### 5.1.2.1 Diskretisierung der Konvektions-Diffusions-Gleichung mittels Finite-Differenzen-Methode

Wird die zeitliche Ableitung einer Differentialgleichung mittels einer Vorwärtsdifferenz approximiert, kann diese explizit gelöst werden. Dies soll im Folgenden mithilfe der in Abschnitt 3.1.1 erläuterten Finite-Differenzen-Methoden hergeleitet werden. Die vereinfachte Konvektions-Diffusions-Gleichung wird dazu ohne Reaktionsterm im eindimensionalen Raum betrachtet:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - v \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5.1)$$

Die Diskretisierung im zeitlichen Raum erfolgt mit der Schrittweite  $\Delta t$ , im räumlichen Koordinatensystem mit  $\Delta x$ . Die Zeitpunkte im Gitter werden mit dem Index  $i$  dargestellt, die räumlichen Koordinatenpunkte mit  $j$ . Für die zeitliche Ableitung ergibt sich mittels der Vorwärtsdifferenz:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_j^{i+1} - u_j^i}{\Delta t} \quad (5.2)$$

Der Diffusionsterm wird in Gleichung (5.3) mit einer zentralen Differenz zweiter Ordnung approximiert, der Konvektionsterm in Gleichung (5.4) mittels des Upwind-Schemas erster Ordnung.

$$D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = D \frac{u_{j+1}^i - 2u_j^i + u_{j-1}^i}{\Delta x^2} \quad (5.3)$$

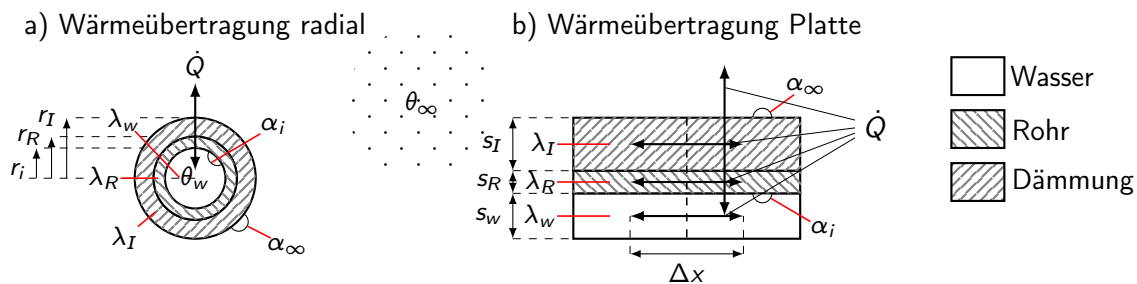
$$v \frac{\partial u}{\partial x} = \begin{cases} v \frac{u_j^i - u_{j-1}^i}{\Delta x} & \text{für } v \geq 0 \\ v \frac{u_{j+1}^i - u_j^i}{\Delta x} & \text{für } v < 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Das Upwind-Schema ist eine Vor- oder Rückwärtsdifferenz in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung. Im Folgenden soll vereinfachend nur der Fall  $v \geq 0$  betrachtet werden. In die Konvektions-Diffusions-Gleichung eingesetzt ergibt dies die vollständig diskretisierte Lösung:

$$\frac{u_j^{i+1} - u_j^i}{\Delta t} = \frac{\Delta u}{\Delta t} = D \frac{u_{j+1}^i - 2u_j^i + u_{j-1}^i}{\Delta x^2} - v \frac{u_j^i - u_{j-1}^i}{\Delta x} \quad (5.5)$$

### 5.1.2.2 Wärmeleitung

Der Diffusionskoeffizient  $D = \lambda / c_p \rho$  der Diffusionsgleichung kann über den Zusammenhang mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten  $\lambda = U \Delta x$  für die Wärmeleitung in heterogenen Materialien umgeformt werden. Damit kann die Berechnung des Wärmeübergangs einheitlich für unterschiedliche Geometrien und Phasen erfolgen. Dies ist in Abb. 5.3 a) für eine Wasserströmung in einem isolierten Rohr und in b) an einer ebenen Platte dargestellt.



**Abbildung 5.3:** Wärmeübergang zwischen Wasser (w), Rohr (R), Isolierung (I) und Umgebung ( $\infty$ ) für eine – a) Rohrströmung; b) angeströmte Platte

Für den U-Wert zwischen einer Wasserströmung in einem isolierten Rohr und der Umgebung gilt der Zusammenhang in Gleichung (5.6) bezüglich des Radius  $r_i$  beziehungsweise der Rohrrinnenfläche  $A_i$ . Äquivalent gilt Gleichung (5.7) für eine angeströmte ebene Platte mit den Schichtdicken  $s$ . Die Wärmeleitung in  $x$ -Richtung in den Schichten der ebenen Platte ergibt sich zu Gleichung (5.8). Der strömungsabhängige Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  kann über empirische Relationen wie die Nusselt-Gleichungen berechnet werden. Diese liegen für eine Vielzahl an Geometrien und Strömungsarten vor, zum Beispiel ebene Platten, Rohre innen sowie außen, jeweils horizontal, vertikal oder angestellt sowie für freie oder erzwungene Konvektion. Auch der Umschlag einer laminaren in eine turbulente Strömung in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit, Geometrie oder Lauflänge wird betrachtet [130].

$$U_r = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i (\ln r_R - \ln r_i)}{\lambda_R} + \frac{r_i (\ln r_I - \ln r_R)}{\lambda_I} + \frac{r_i}{r_I} \frac{1}{\alpha_\infty}}, \quad \text{Bezugsfläche: } A_i \quad (5.6)$$

$$U_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_R}{\lambda_R} + \frac{s_I}{\lambda_I} + \frac{1}{\alpha_\infty}} \quad (5.7)$$

$$U_{w/R/I} = \frac{\lambda_{w/R/I}}{\Delta x} \quad (5.8)$$



Schritt eines expliziten Euler-Verfahrens berechnet, siehe Gleichung (5.9). An dieser Stelle wird die Steigung erneut ausgewertet. Eine Mittelwertbildung beider Steigungen, das Trapezverfahren, ist ein sogenannter Korrektor-Schritt. Dieser liefert nach Gleichung (5.10) den vollständigen Heun-Schritt. Die Heun-Methode ist damit ein Prädiktor-Korrektor-Verfahren [90].

$$\tilde{y}_{i+1} = y_i + hf(t_i, y_i) \quad (5.9)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2}h(f(t_i, y_i), f(t_{i+1}, \tilde{y}_{i+1})) \quad (5.10)$$

Die Konvergenzordnung der Heun-Methode beträgt  $P = 2$ . Im Vergleich zum expliziten Euler-Verfahren mit  $P = 1$  kann eine höhere Konvergenz bei geringfügig höherem Rechenaufwand erreicht werden. Der numerische Fehler ist in der Regel deutlich geringer als bei zwei halben Euler-Schritten. Das Heun-Verfahren wird üblicherweise nur für gewöhnliche Differentialgleichungen eingesetzt. Die Anwendung auf partielle Differentialgleichungen wie die Konvektions-Diffusions-Gleichung erfordert eine gute Konditionierung der Randbedingungen und eine sensible Schrittweitensteuerung mit Stabilitätskontrolle. Die erforderlichen Schrittweiten liegen in der Größenordnung, die für eine detaillierte Abbildung von kurzfristigen PWH-Spitzenlasten ohnehin benötigt werden. Die Vermeidung des hohen Rechenaufwandes für implizite Verfahren kann daher gerechtfertigt werden.

#### 5.1.2.5 Schrittweitensteuerung

Nach Abschnitt 3.1.1 bestimmen die Gitterabstände der Diskretisierung einer Differentialgleichung maßgeblich den Abbruchfehler des numerischen Verfahrens. Eine zu kleine Zeitschrittweite führt jedoch sowohl zu einer höheren numerischen Diffusion, als auch zu langen Simulationszeiten. Eine Schrittweitensteuerung kann das Optimum zwischen einem schnellen Simulationsfortschritt und einem geringen Fehler finden.

Dies ist umso wichtiger, je größer die Unterschiede zwischen den Minimal- und Maximalwerten der Ableitungen im Laufe einer Simulation sind. Besteht zum Beispiel während hoher Wärmelasten ein hoher Energieeintrag im System, nehmen die Differenzenquotienten hohe Werte an. Ein kleiner Zeitschritt wird benötigt, um einerseits die Stabilität eines nicht A-stabilen Algorithmus zu garantieren und andererseits den numerischen Fehler zu reduzieren. In Schwachlastzeiten, in einem Gebäudeenergiesystem beispielsweise nachts, gleicht die Simulation einer stationären Problemstellung. Im Rahmen der von-Neumann-Stabilität und der Fehlertoleranzen kann der Zeitschritt maximiert werden.

Eine Variante den Fehler abzuschätzen ist die Richardson-Extrapolation. Dazu werden zwei unterschiedliche Schritte, zum Beispiel mit  $h$  und  $h/2$ , berechnet. Ein Vergleich der Ergebnisse liefert eine Abschätzung des Fehlers. Der zusätzliche Rechenaufwand ist erheblich, die Fehlerschätzung dafür genau. Bei Runge-Kutta- und einigen Mehrschrittverfahren existieren eingebettete Verfahren, die anhand der ohnehin berechneten Stufen oder Schritte den numerischen Fehler abschätzen. Der rechnerische Aufwand dafür ist insignifikant. Im Vergleich zur Richardson-Extrapolation werden ca. 50 % Rechenaufwand auf Kosten einer etwas ungenaueren Abschätzung gespart [132], [133]. Häufig eingesetzt werden die Runge-Kutta-Fehlberg- oder Dormand-Prince-Verfahren [90], [134].

Die hier verwendete Heun-Methode ermöglicht als Teil der Runge-Kutta-Verfahren die Verwendung einer eingebetteten Fehlerschätzung. Dazu wird das Ergebnis des gesamten Schritts  $y_{i+1}$  mit dem des Prädiktor-Schritts  $\tilde{y}_{i+1}$  abgeglichen und die  $\ell_2$ -Norm berechnet, auch Euklidische Norm genannt, um

den lokalen Fehler  $\epsilon$  zu erhalten [135]. Dieser ist abhängig von einer unbekanntem Konstante  $C$ , der Schrittweite und der Konvergenzordnung  $P$  des Verfahrens [136]:

$$\epsilon = \|y_{i+1} - \tilde{y}_{i+1}\|_2 = Ch^P \quad (5.11)$$

Mit dem Zusammenhang in Gleichung (5.12) für  $C$  sowie für die gesamte numerische Fehlertoleranz  $r_{tot}$  in Gleichung (5.13), zusammengesetzt aus der relativen und absoluten Toleranzen  $r_{rel}$  und  $r_{abs}$ :

$$C = r_{tot}/h_{opt}^P \quad (5.12)$$

$$r_{tot} = r_{abs} + r_{rel} \max(|y_{i+1}|, |y_i|) \quad (5.13)$$

ergibt sich die optimale Schrittweite  $h_{opt}$  zu Gleichung (5.14) und die neue Schrittweite  $h^*$  unter Berücksichtigung eines auf 0,5 bis 2 begrenzten Faktors und einer Sicherheit  $f_s$  zu Gleichung (5.15) [136]:

$$h_{opt} = h \sqrt[P]{\frac{r_{abs} + r_{rel} \max(|y_{i+1}|, |y_i|)}{\epsilon}} \quad (5.14)$$

$$h^* = h \max\left(0,5, \min\left(2,0, f_s \sqrt[P]{\frac{r_{tot}}{\epsilon}}\right)\right) \quad (5.15)$$

**Von-Neumann-Stabilität** Weiterhin wird die Stabilität der Lösung kontrolliert. Die dazu notwendige Betrachtung der Lax-Richtmyer-Stabilität wird in der Praxis häufig durch eine von-Neumann-Stabilitätsanalyse ersetzt, auch  $L_2$ -Stabilität genannt. Anhand dieser kann in Abhängigkeit von der Diskretisierung ermittelt werden, bei welcher Schrittweite ein Verfahren stabil sein kann [137].

Das Verfahren ist von der Diskretisierung der Differentialgleichung abhängig. Hier wird äquivalent zu Abschnitt 5.1.2.1 ein explizites Euler-Verfahren in der Zeit gewählt, während die Diffusion über eine zentrale Differenz und die Konvektion über ein Upwind-Schema diskretisiert werden. Für den maximalen Zeitschritt  $\Delta t$  in Abhängigkeit vom Diffusionskoeffizienten  $\lambda/c_p\rho$  und der Gitterweite  $\Delta x$  folgt Gleichung (5.16). Für den Konvektionsterm ergibt sich mit der Transportgeschwindigkeit  $v$  der auch als CFL-Zahl bekannte Zusammenhang in Gleichung (5.17) [138].

$$\frac{\lambda}{c_p\rho} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2} \quad (5.16)$$

$$v \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (5.17)$$

Wird die von-Neumann-Stabilität verletzt, so wird die neue Schrittweite durch Einsetzen der die Stabilität verletzenden Transportgrößen und Stoffeigenschaften mit Sicherheitsfaktor  $f_s = 0,9$  berechnet und auf den erforderlichen Wert begrenzt.

Eine Diskretisierung des Konvektionsterms mit einer zentralen Differenz würde unabhängig von der Zeitschrittweite in Instabilität resultieren, sofern für die Péclet-Zahl:

$$Pe = \frac{hvc_p\rho}{\lambda} \quad (5.18)$$

mit der charakteristischen Länge  $h$  des Transportphänomens  $|Pe| \geq 2$  gilt. Die Péclet-Zahl beschreibt das Verhältnis von konvektivem zu diffusivem Transport. Das heißt der konvektive Transport überwiegt gegenüber dem diffusiven Transport. In diesem Fall ist zudem der Einfluss stromab gelegener Zustände gering. Daher werden Probleme, in denen die Konvektion überwiegt, in der Regel mittels des Upwind-Schemas diskretisiert.



### 5.1.3 Komponenten

Die Simulationsumgebung wird aus Komponenten zusammengesetzt, die aus Python-Objekten bestehen. Hierzu gehören Bauteile, Aktuatoren, Regler sowie Mischformen daraus.

**Bauteile** Ein Bauteil in MultiSim ist darüber definiert, dass es eine Klasse mit einer Methode ist, welche die Summe der räumlichen Differenzenquotienten der zu lösenden Differentialgleichung für jede Zelle ausgibt. Eine numerische Lösung der Differentialgleichungen erfolgt nur für Bauteile. Form und Dimensionalität der Arrays kann für jedes Bauteil separat festgelegt werden. Typische Bauteile sind Rohre, Speicher oder Wärmeübertrager.

**Aktuatoren** Aktuatoren wie Pumpen und Mischventile werden nicht numerisch gelöst, sondern beeinflussen die Randbedingungen der Differentialgleichungen der Bauteile. Diese werden zu Beginn eines jeden Schrittes aktualisiert. Jeder Aktuator muss über eine Regelung gesteuert werden oder konstante Werte beziehungsweise eine Zeitreihe vorgegeben bekommen.

**Regelung** Die `Control`-Klasse bindet alle benötigten Informationen und Methoden der meisten Reglertypen ein. Jeder Regler, der auf dieser Klasse basiert, erbt diese Eigenschaften. Dadurch benötigen neue Regler nur minimalen Programmcode. Weitere eingebundene Standardregler sind Zwei-Sensor-Regler, die einen Sensor zum An- und einen zum Ausschalten verwenden und ein PID-Regler mit anti-windup, Tiefpassfilter und eingebundenem Ziegler-Nichols-Verfahren zum Einstellen der P-, I- und/oder D-Parameter. Weiterhin liegt ein modellprädiktiver Regler zur Optimierung der stromgeführten Betriebsweise eines BHKWs anhand des Speicherladezustandes und des vorhergesagten Stromverbrauchs vor.

**Modularität** Dadurch dass alle Bauteile, Aktuatoren und Regler als Python-Klassen vorliegen, können neue Komponenten leicht abgeleitet werden. Das BHKW baut zum Beispiel auf der Rohr-Klasse auf und erweitert diese unter anderem um einen Wärmeeintrag, An- und Abschaltpolynome. Mischtypen aus Ventilen, Pumpen oder mehreren Rohren sind beispielsweise regelbare und nicht-regelbare verzweigte Rohre oder Rohre mit Pumpen. Diese erlauben das Erstellen komplexer Topologien mit wenigen Komponenten.

### 5.1.4 Modellierung ausgewählter Bauteile

In diesem Abschnitt soll kurz auf zwei wichtige Bauteile eingegangen werden: Das Rohr und das davon abgeleitete BHKW.

**Rohr** Für Rohre wird vereinfachend angenommen, dass deren Achsen immer horizontal verlaufen. Vertikale Rohre können durch die Simulation zwar abgebildet werden, der Aufwand für den Anwender, eine dreidimensionale Abbildung der Anlagentechnik zu planen und auszulegen, übersteigt jedoch den Nutzen bei Weitem. Die diskretisierte Differenzialgleichung mit allen Komponenten ergibt sich für Rohre durch eine Energiebilanz an den Zellen, hier am Beispiel der Zelle  $j$ . Ein Einsetzen der

Zusammenhänge aus Abschnitt 5.1.2.2 in die Konvektions-Diffusions-Gleichung (5.5) ergibt:

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial t} = \frac{U_x A_x (\theta_{j-1} - 2\theta_j + \theta_{j+1}) + U_r A_i (\theta_\infty - \theta_j) + U_p A_p (\theta_p - \theta_j)}{m_j c_{p,j}} \quad (5.19)$$

$$+ \frac{\dot{m}_j^+ (\theta_{j-1} c_{p,j-1} - \theta_j c_{p,j}) + \dot{m}_j^- (\theta_{j+1} c_{p,j+1} - \theta_j c_{p,j}) + \dot{m}_j^{p+} (\theta_p c_{p,p} - \theta_j c_{p,j})}{m_j c_{p,j}}$$

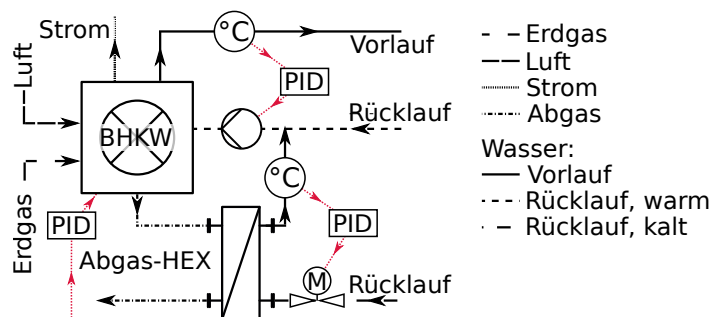
$$\text{mit } ((\dot{m}_j^+ > 0) \vee (\dot{m}_j^- > 0)) \vee ((\dot{m}_j^+ = 0) \wedge (\dot{m}_j^- = 0)) \quad (5.20)$$

mit dem Index  $x$  für Wärmeleitung in axialer Richtung,  $r$  in radialer Richtung zur Umgebung  $\infty$  und  $p$  für den Wärmestrom von und zu Anschlüssen. Für den Massenstrom  $\dot{m}$  gilt, dass dieser entweder exklusiv in Gitterrichtung positiv sein kann, das heißt  $\dot{m}_j^+ > 0$ , oder entgegen der Gitterrichtung fließen kann, das heißt  $\dot{m}_j^- > 0$ , oder komplett Null sein muss, siehe Gleichung (5.20). Dies folgt aus der Diskretisierung mittels Upwind-Schema nach Gleichung (5.4). Für den über Anschlüsse einfließenden Massenstrom  $\dot{m}_j^{p+}$  gilt dies auch. Durch Anschlüsse ausfließende Massenströme werden nach der Massenerhaltung den Massenströmen zwischen den Zellen hinzugerechnet und über  $\dot{m}_j^{+/-}$  bilanziert.

Das Modell eines TES ist dem des Rohres sehr ähnlich. TES werden als senkrechte Rohre betrachtet. Dadurch werden zusätzliche Zusammenhänge wie Auftriebsterme notwendig. Weiterhin müssen die empirischen Nusselt-Gleichungen für die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  an die neuen Gegebenheiten angepasst werden.

**Blockheizkraftwerk** BHKWs sind aus mehreren verschiedenen Bauteilen aufgebaut. Das Schema in Abb. 5.5 stellt ein BHKW mit Abgas-Wärmeübertrager und zweitem Rücklauf auf die wichtigsten Komponenten reduziert dar.

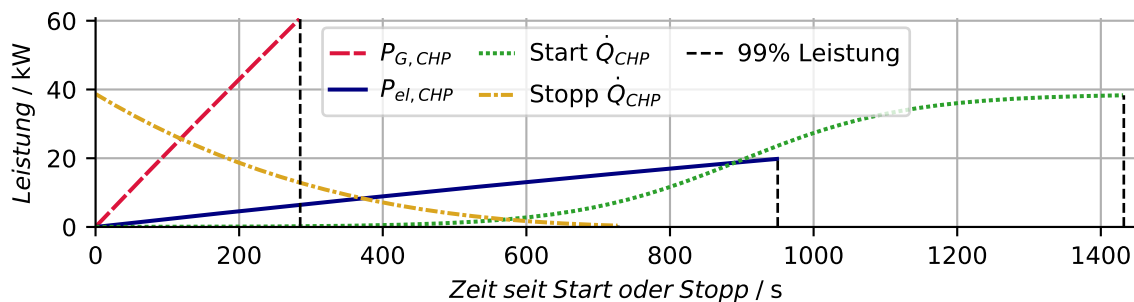
Der Wärmeeintrag wird über eine mittels Regler gesteuerte Beheizung eines Rohres realisiert. Der Sollwert wird von außen vorgegeben und kann beispielsweise die Einhaltung einer TES-Temperatur oder eine netzdienliche Betriebsweise sein. Eine ebenfalls über einen PID-Regler gesteuerte Pumpe regelt die Vorlauftemperatur. Dem BHKW ist ein auf Kondensation ausgelegter Abgas-Wärmeübertrager nachgeschaltet. Dieser wird von einem separaten kalten Rücklauf durchströmt. Diesen Massenstrom und damit das Verhältnis beider Rückläufe regelt wiederum ein PID-Regler anhand einer vorgegebenen Wasseraustrittstemperatur aus dem Wärmeübertrager.



**Abbildung 5.5:** Schema des im Simulationsprogramm implementierten BHKW-Moduls mit Abgas-Wärmeübertrager, optionalem separatem Hochtemperaturrücklauf und PID-Reglern

An- und Abschaltvorgänge werden über Regressionspolynome abgebildet. Diese werden aus Messdaten von 112 An- und Abschaltvorgängen des Feldtests berechnet. Abb. 5.6 zeigt die Polynome für die Gas-,

thermische und elektrische Leistung während des Anschaltvorgangs. Weiterhin kann noch Wärme gewonnen werden, wenn der BHKW-Motor schon abgeschaltet ist. Die Zeitpunkte, zu denen 99 % der Leistung erreicht sind, sind markiert. Der Gasbedarf steigt schnell und nahezu linear auf die volle Leistung. Nach 950 s erreicht die elektrische Leistung 99 % der maximalen Leistung, die thermische Leistung nach 1432 s. Der Abschaltvorgang ist nach 728 s abgeschlossen. Wird das BHKW früher wieder angeschaltet, wird die Restwärme auf den Anschaltvorgang angerechnet. Der Wirkungsgrad während des Anschaltvorgangs liegt bei 60 %. Wird die während der Abschaltung entnommene Wärme hinzugerechnet, liegt der Wirkungsgrad während An- und Abschaltung bei 69,1 % bzgl. des Heizwertes.



**Abbildung 5.6:** An- und Abschaltpolynome des im Simulationsprogramm verwendeten BHKW-Modells

## 5.2 Validierung

Die Validierung des Simulationsprogramms „MultiSim“ sowie der zu simulierenden LowEx-TWE-Anlage erfolgt nach den Vorgaben ANSI/BPI-2400-S-2015 zur Kalibrierung von Vorhersagen des Energieverbrauchs von Gebäuden. Es werden zwei Kennzahlen zur Bewertung der Validierung verwendet: Der Betrag des  $NME$  nach Gleichung (3.29) und der  $CV(RMSE)$  nach Gleichung (3.32). Für eine erfolgreiche Validierung gelten die Grenzwerte nach Gleichungen (5.21) und (5.22) [103].

$$|NME| \leq 0,05 \quad (5.21)$$

$$CV(RMSE) \leq 0,2 \quad (5.22)$$

Die Grenzwerte der Berechnungsmethoden gelten nach [103] für Auswertungsperioden von einem Monat oder länger. Da der  $CV(RMSE)$  Abweichungen quadratisch gewichtet, sind bei Simulationen mit höherer Auflösung tendenziell größere Fehlerwerte zu erwarten. Für eine stündliche Betrachtung können Fehlergrenzen von  $|NME| \leq 0,1$  beziehungsweise  $CV(RMSE) \leq 0,3$  gefunden werden [139]. Im Sekundenbereich sind nochmals höhere Fehler wahrscheinlicher. Dennoch werden hier die strengen monatlichen Kriterien zur Validierung verwendet.

Zur Validierung wird das LowEx-TWE-System des Laborprüfstands und des Feldtests, siehe Abschnitte 2.2.4 und 4.1.1, in „MultiSim“ aufgebaut. Für eine aussagekräftige Validierung der Verbraucher- und Speicherebene ist eine hoch aufgelöste Messtechnik notwendig, da die Entnahme von PWH hohen Spitzenlasten und Lastschwankungen im Sekundenbereich unterliegt. Die Beladung des TES ist hingegen ein vergleichsweise träger Vorgang. Abstraten von einigen Minuten sind ausreichend.

Die Messdaten aus dem Feldtest sind mit Abtastraten von 4 min bis 8 min ausschließlich für eine Validierung der Produktionsebene geeignet. Messdaten der Verbraucher- und Speicherebene mit einer Abtastrate von 1 s liegen von mehreren Testfällen während der Entwicklung der LowEx-TWE-Anlage auf dem Laborprüfstand im Rahmen des Forschungsprojektes „LowEx-Fernwärme-Systeme“ vor [21]. Daher wird die Validierung auf zwei Schritte aufgeteilt:

**Validierung der Verbraucher- und Speicherebene** LowEx-TWE des Laborprüfstands mit kleinem TES ( $0,842 \text{ m}^3$ ), sekundengenaue Simulation der PWH-Erwärmung, PWH-C-Nachheizung und TES-Beladung aus Fernwärme, Randbedingungen in 1 s-Auflösung

**Validierung der BHKW-Produktionsebene** LowEx-TWE des Feldtests mit großem TES mit  $7,1 \text{ m}^3$  Volumen, Simulation der TES-Beladung mittels BHKW mit Abgas-Wärmeübertrager und mehren Rückläufen, zeitliche Auflösung der Randbedingungen in 4 min Intervallen

Für eine erfolgreiche Validierung des gesamten Systems müssen alle zu validierenden Größen beider Teilsysteme innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen liegen.

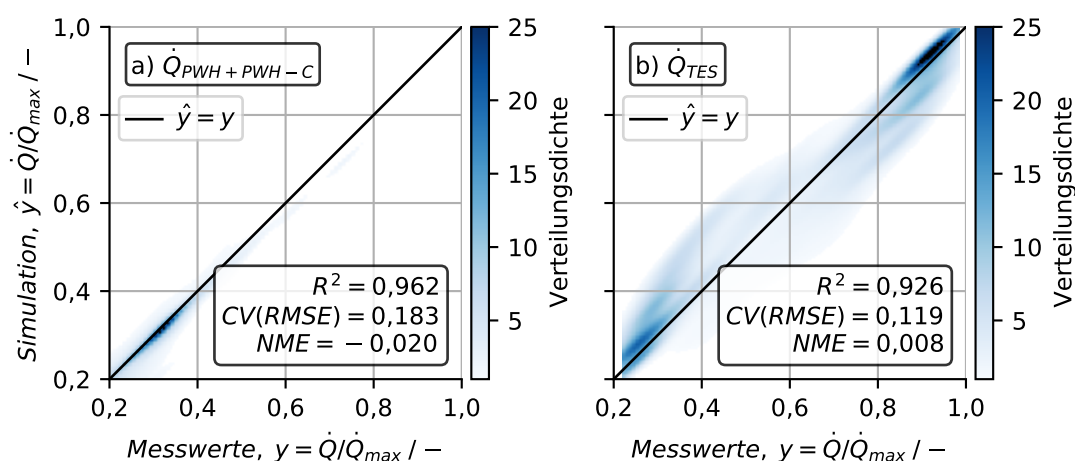
### 5.2.1 Validierung der Verbraucher- und Speicherebene

Die Validierung der Verbraucher- und Speicherebene erfolgt mittels Labormessdaten mit einer Abtastrate von 1 s. Dazu wird die in Abb. 2.4 b) dargestellte LowEx-Anlage in „MultiSim“ über ein Zeitfenster von zwei Tagen simuliert. Die adaptive Schrittweitensteuerung führt zu einer mittleren Schrittweite von 1,128 s. Vorgegebene Randbedingungen der Simulation sind die Verbrauchermassenströme  $\dot{m}_{PWH}$  und  $\dot{m}_{PWH-C}$  sowie deren Temperaturen am Eintritt in das Simulationsgebiet. Weiterhin sind die Vorlauf- und Rücklaufemperatur zur TES-Beladung vorgegeben. Die zeitliche Auflösung der Randbedingungen beträgt 1 s.

Die Massenströme zum PWH- und PWH-C-Wärmeübertrager werden jeweils von PID-Reglern so geregelt, dass auf der Verbraucherseite eine Austrittstemperatur von  $60^\circ\text{C}$  erreicht wird. Der Sollwert des PID-Reglers des Mischventils im Vorlauf zu den Wärmeübertragern ist auf  $65^\circ\text{C}$  eingestellt. Auch der Ladezustand des TES wird über einen PID-Regler geregelt.

Die Zielgrößen der Validierung sind die Verbraucherleistung  $\dot{Q}_{PWH+PWH-C}$  und die TES-Ladeleistung  $\dot{Q}_{TES}$ . Diese sind in Abb. 5.7 als Prediction-Realization-Plot dargestellt. Die Werte der simulierten Leistungen sind als Kerndichteschätzung auf der Ordinate aufgetragen, die der gemessenen auf der Abszisse. Die Leistungen sind auf eine Frequenz von  $1/5 \text{ Hz}$  gemittelt und einheitlich mit dem Maximalwert beider Achsen normiert. Die Fehlergrößen nach ANSI sind eingetragen. Die zur Validierung vorgegebenen Grenzwerte werden eingehalten. Während der  $CV(RMSE)$  der Verbraucherebene 92 % des zur Validierung zulässigen Grenzwerts beträgt, weist der  $NME$  einen großen Abstand zum Grenzwert auf. Dies spricht für das Vorhandensein von Ausreißern bei kleinen mittleren Fehlern. Lastschwankungen der TWE in Messdaten und Randbedingungen der Simulation auf das fünffache der mittleren Leistung innerhalb von wenigen Sekunden erklären die Ausreißer zwischen Laborprüfstand und Simulation. Bei der vergleichsweise konstanten TES-Beladung zeigen die Fehlergrößen eine dementsprechend geringere Neigung zu Ausreißern.

Weiterhin ist das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  gegeben. Demnach kann der überwiegende Teil der Varianz der Leistungen durch die Simulation abgebildet werden. Dies ist insbesondere bei der hohen Lastschwankungen unterliegenden Trinkwassererwärmung von Bedeutung.



**Abbildung 5.7:** Validierung der Verbraucher- und Speicherebene – Prediction-Realization-Plot mittels Kern-dichteschätzer von a) Trinkwassererwärmung und Zirkulation; b) TES-Ladung

Tabelle 5.1 fasst die kumulierten geflossenen Energie- und Wassermassen der Simulation und der zugehörigen Labormessdaten zusammen. Durch die Randbedingungen wird eine Abweichung von bis zu 2,2% eingeführt. Diese wird auf die Zielgrößen übertragen. Dennoch sind die Abweichungen der Zielgrößen im Simulationszeitfenster mit maximal 2% gering.

**Tabelle 5.1:** Validierung der Verbraucher- und Speicherebene – Kumulierte geflossene Wassermassen und Wärmemengen für Randbedingungen und Zielgrößen der Simulation und der Messdaten ( $m^*$ : primärseitige Versorgung des Wärmeübertragers)

	Randbedingungen		Zielgrößen			
	$m_{PWH}$	$m_{PWH-C}$	$m_{PWH+PWH-C}^*$	$Q_{PWH+PWH-C}$	$m_{TES}$	$Q_{TES}$
Messwert	3504 kg	20 443 kg	16 847 kg	1159 MJ	5189 kg	1137 MJ
Simulation	3474 kg	19 991 kg	16 501 kg	1136 MJ	5189 kg	1123 MJ
Abweichung	-0,86 %	-2,21 %	-2,05 %	-1,98 %	-0,01 %	-1,23 %

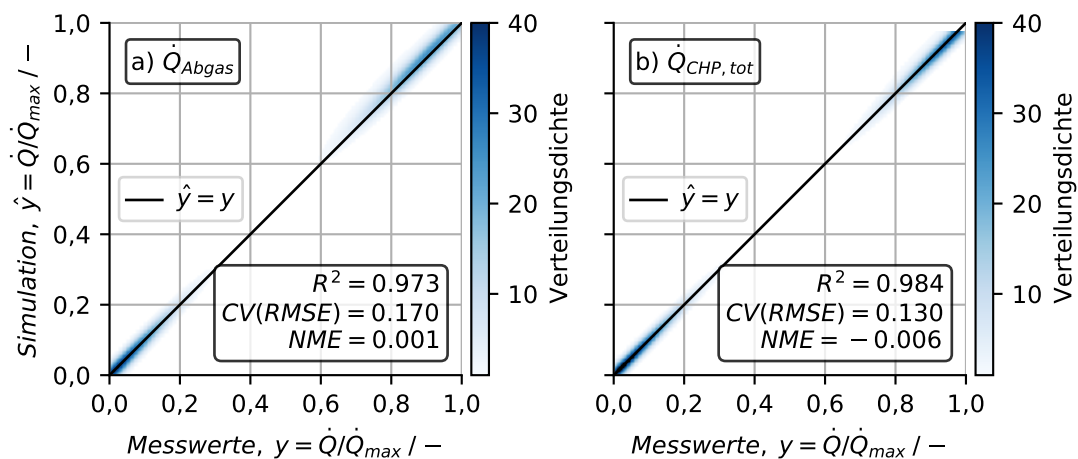
Folglich ist das im Simulationsprogramm aufgebaute LowEx-TWE-System in der Lage, sowohl Lastspitzen als auch kumulierte Energiemengen mit einer hohen Genauigkeit abzubilden. Insbesondere die Einhaltung des für hochaufgelöste Simulationen sehr strengen Monats-Grenzwerts des  $CV(RMSE)$  zeigt, dass die Lastschwankungen der TWE trotz des trägen Verhaltens diffusiver Prozesse gut modelliert werden können. Die Simulation des LowEx-TWE-Systems wird damit als validiert angesehen.

### 5.2.2 Validierung der BHKW-Produktionsebene

Zur Validierung der BHKW-Produktionsebene mit TES wird die in Abb. 5.8 abgebildete Anlage in „MultiSim“ über eineinhalb Tage simuliert. Die mittlere Schrittweite beträgt 0,571 s.

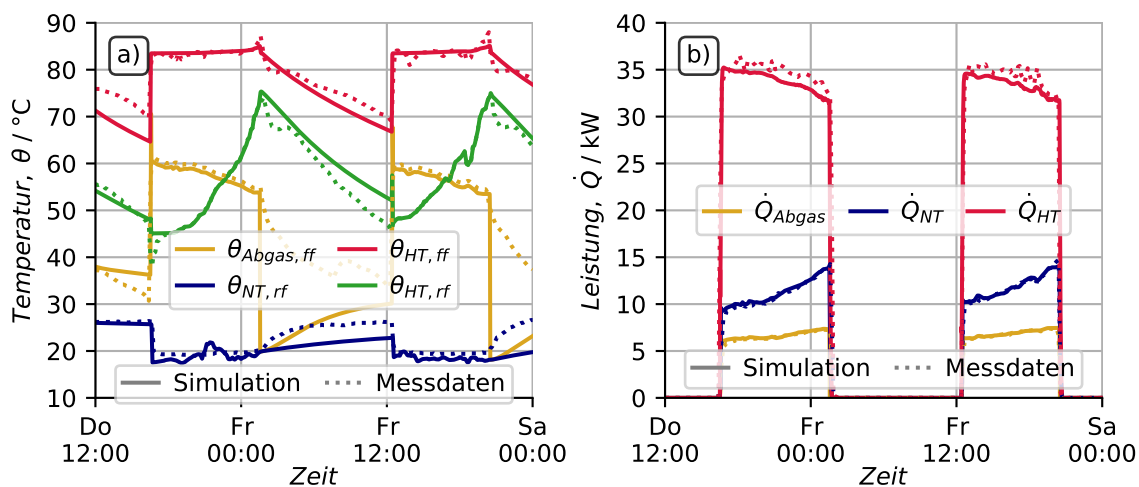
Der Fokus dieser Validierung liegt auf dem Betriebsverhalten des BHKWs, insbesondere mit dem nachgeschalteten Abgaswärmeübertrager und der Aufteilung des BHKW-Rücklaufs auf drei Entnah-





**Abbildung 5.9:** Validierung BHKW-Produktionsebene – Prediction-Realization-Plot mittels Kerndichteschätzer a) des Abgaswärmeübertragers; b) der Gesamtleistung des BHKWs

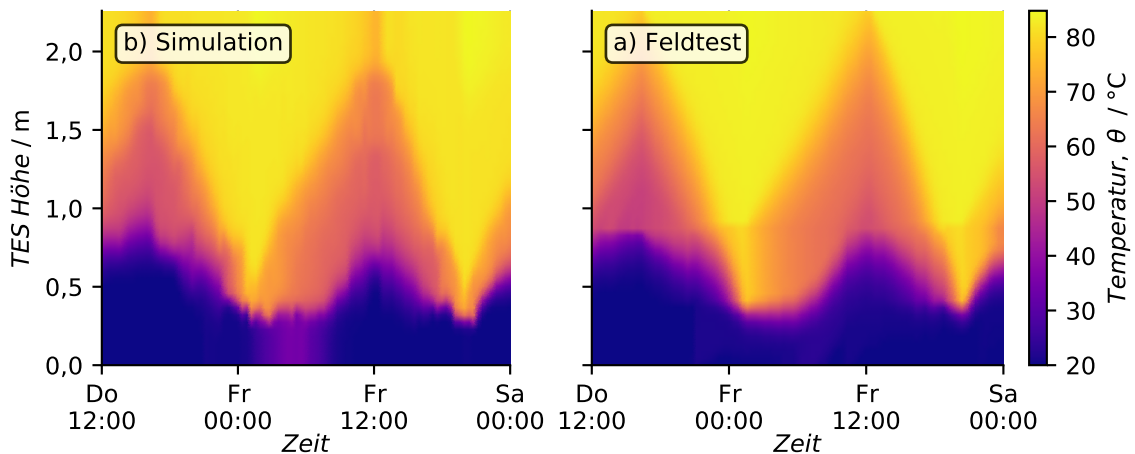
Wärmemengenzähler  $\dot{Q}_{NT}$  wird dies zum größten Teil ausgeglichen. Die Abweichungen sind auf minimale Unterschiede in der PID-Regelung der Massenströme über die verschiedenen Stränge zurückzuführen.



**Abbildung 5.10:** Validierung der BHKW-Produktionsebene – Abgleich von Simulationsergebnissen und Messdaten für a) Temperaturen; b) Leistungen

Die Temperaturverläufe des TES über 36 h sind in Abb. 5.11 a) für die Simulation und in b) für Messdaten des Feldtests dargestellt. Es sind kaum Unterschiede zu erkennen. Beide Grenzschichten zeigen eine vergleichbare Lage und Dicke. Das Kaltwasserreservoir zeigt die gleiche Ausdehnung und einen ähnlichen Verlauf. Die große Ähnlichkeit zwischen den Temperaturschichten hat zur Folge, dass auf der TES-Temperatur aufbauende Regelungen, wie die des BHKWs, in guter Übereinstimmung angesteuert werden.

Alle Grenzwerte werden bei der Validierung der BHKW-Produktionsebene eingehalten. Weiterhin kann



**Abbildung 5.11:** Validierung der BHKW-Produktionsebene – TES-Temperatur über 36 h für a) Messdaten aus Feldtest; b) Simulation der BHKW-Produktionsebene

gezeigt werden, dass die Regelung von BHKW, Pumpen und Ventilen im Rahmen der Genauigkeit nur vernachlässigbare Unterschiede der Temperaturen und Leistungen zwischen Simulations- und Messdaten zur Folge hat. Auch die Temperaturen im TES haben eine große Ähnlichkeit. Die Simulation der BHKW-Produktionsebene kann somit als validiert angesehen werden.

### 5.3 Simulierte Anlagentypen

Neben einem Ergebnistransfer auf eine Vielzahl an RB ist auch ein Vergleich mit einer dem Stand der Technik entsprechenden Anlage von Interesse. Daher wird in Abschnitt 5.3.1 ein Referenzsystem definiert. Anhand dessen können die berechneten Kennwerte der Simulationen, die Flexibilität, der Bruttoertrag und die Reduktion des PE-Bedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen, bewertet werden. Es kann untersucht werden, in welchen Bereichen die LowEx-Technologie Verbesserungen oder Verschlechterungen gegenüber marktüblichen Anlagen aufweist.

Weiterhin wird die LowEx-TWE-Anlage im Winter simuliert. Es soll der Einfluss untersucht werden, den eine Variation der Anlagenparameter zugunsten einer hohen Flexibilität im Sommer auf den Bruttoertrag im Winter hat. Die abschließende Simulation einer stromgeführten LowEx-TWE-Anlage soll das Potential zur Steigerung der Bruttoerträge und zur Senkung des PE-Bedarfs sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen aufzeigen, das mit einer hoher Flexibilität einhergeht.

Alle zu simulierenden Anlagentypen werden von den validierten Systemen abgeleitet. Die Anlagentypen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Das simulierte Zeitfenster beträgt 15 Tage, wovon der erste Tag ausschließlich zum Einschwingen der Simulationen verwendet wird. Zur Auswertung verbleibt ein Zeitfenster von 14 Tagen.

#### 5.3.1 Referenzsystem: Speicherladesystem

Das **Referenzsystem** (Ref) wird von den validierten Systemen abgeleitet. Dazu wird die LowEx-TWE in der Verbraucherebene durch einen PWH-Speicher mit Wärmeübertrager zur Speicherbeladung



**Tabelle 5.2:** Übersicht der simulierten Anlagentypen

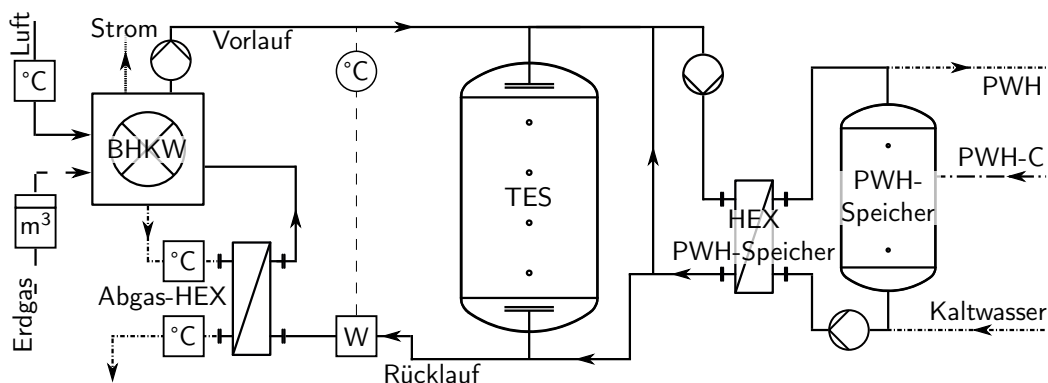
Bezeichnung	Sys	TWE-Anlage	BHKW-Betrieb	Modulation	Jahreszeit	Kapitel
Referenzsystem	0	Speicherladesystem	wärmegeführt	X	Sommer	5.3.1
LowEx Basis	1	LowEx-TWE	wärmegeführt	X	Sommer	5.3.2
LowEx Winter	2	LowEx-TWE	wärmegeführt	X	Winter	5.3.3
LowEx Strom	3	LowEx-TWE	stromgeführt	✓	Sommer	5.3.4

ersetzt. Es resultiert das in Abb. 5.12 dargestellte Speicherladesystem. Das Speicherladesystem ist unter den Standard-TWE-Systemen neben dem Speichersystem derzeit am weitesten verbreitet und stellt den aktuellen Stand der Technik dar [22]. Daher wird dieses im weiteren Verlauf als Referenzsystem und somit als Bezugspunkt zur Bewertung der Ergebnisse verwendet. Der im Folgenden verwendete Anlagenidentifikator ist  $Sys = 0$ .

Entsprechend dem üblichen Betrieb von Klein-BHKW in der Praxis, wird das BHKW wärmegeführt und ohne Modulation im I/O-Betrieb angesteuert. Das heißt bei Unterschreiten eines bestimmten TES-Ladezustands oder einer festgelegten Temperatur wird das BHKW auf Volllast betrieben, bis der Sollwert erreicht ist. Kann das BHKW die benötigte Wärme für die TWE nicht zur Verfügung stellen, liefert ein Gas-Brennwertkessel (nicht im Schema eingezeichnet) die fehlende Energie.

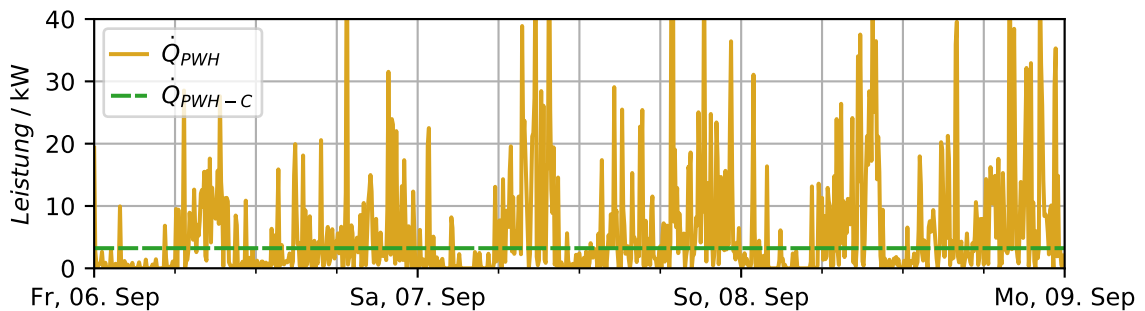
Die in den Eingangsdaten der Simulation definierte Speichergröße wird auf den TES und den PWH-Speicher aufgeteilt. Der PWH-Speicher wird dabei so klein wie möglich gehalten. Damit wird dem zusätzlichen Platzbedarf und den höheren Kosten aufgrund des PWH-Speichers nicht Rechnung getragen. Das heißt die Größe des TES und davon abhängige Kennzahlen, wie die Flexibilität und gegebenenfalls Bruttoerträge und Effizienz, werden tendenziell überschätzt, das Referenzsystem überbewertet.

Beim Referenzsystem ist nur eine Anschlusskonfiguration möglich. Der Rücklauf zum BHKW wird am unteren Ende des TES angeschlossen, der Vorlauf am oberen Ende.

**Abbildung 5.12:** Referenzsystem Speicherladesystem – reduziertes Funktionsschema

Maßgeblich den Betrieb der Anlage bestimmende Randbedingungen sind der PWH- und PWH-C-Verbrauch. Der PWH-C-Verbrauch kann als konstant angenommen werden, siehe auch Messungen in Abb. 4.8. Eine hohe Auflösung des PWH-Bedarfs ist hingegen von großer Bedeutung für die Qualität und Aussagekraft der Simulation, da starke Lastschwankungen einen großen Einfluss auf den Anlagenbetrieb haben. Dieser wird daher in 1 s-Auflösung als Randbedingung der Simulation vorgegeben.

Beide Verbräuche skalieren im Mittel nahezu linear mit der Gebäudegröße. PWH-Spitzenlasten hängen durch Überlagerungen und zeitlichen Versatz nur unterproportional von der Größe ab [51]. Dies wird in der Berechnung der größen-spezifischen PWH-Profile durch eine gezielte Aggregation einzelner Verbrauchsspitzen berücksichtigt. Der PWH-C-Verbrauch hängt weiterhin von der Dämmung der Rohrleitungen ab. Abb. 5.13 zeigt das verwendete Verbrauchsprofile über drei Tage am Beispiel eines Gebäudes mit 2000 m<sup>2</sup> nach EnEV 2009.



**Abbildung 5.13:** Randbedingungen der Simulation – sekundlich aufgelöste Trinkwasserverbrauchsprofile sowie konstante Zirkulationsleistung; Mehrfamilienhaus mit 2000 m<sup>2</sup> Wohnfläche nach EnEV 2009

### 5.3.2 LowEx Basis

Die Kombination beider Validierungsschritte aus dem vorigen Abschnitt an der Speicherebene ergibt ein vollständiges LowEx-TWE-System mit TES und BHKW, abgebildet in Abb. 5.14.

Wie beim Referenzsystem wird das BHKW auch hier wärmegeführt und ohne Modulationsstufen betrieben. Ein Gas-Brennwertkessel belädt im Notfall den TES. Die als Randbedingung vorgegebenen Verbrauchsprofile entsprechen denen des Referenzsystems. Eine Besonderheit des Systems ist der Rücklauf vom TES zum BHKW. Dieser kann in drei Varianten ausgeführt werden, welche im Schema mit  $r_{conf}$  gekennzeichnet sind:

1. Ein Rücklauf über den Abgaswärmeübertrager,  $r_{conf} = 1$
2. Wie 1., zusätzlich ein weiterer Rücklauf aus dem Mitteltemperaturbereich des TES,  $r_{conf} = 2$
3. Wie 2., zusätzlich ein weiterer Rücklauf aus dem Hochtemperaturbereich des TES,  $r_{conf} = 3$

Mithilfe der zusätzlichen Anschlüsse können gezielt Temperaturschichten aus dem TES entnommen werden. Bei Altbauten mit schlechter Dämmung kann damit im TES der Zerstörung von Schichtungen entgegengewirkt werden. Ein Aufwärmen des Kaltwasserreservoirs wird reduziert. Dadurch steht immer kaltes Wasser für einen optimalen Wärmeübertrag im Abgaswärmeübertrager zur Verfügung. Der tatsächliche Effekt dieser Maßnahmen soll untersucht werden.

Diese Variante wird im Folgenden als **LowEx Basis** (LEB) bezeichnet. Während bei den Ergebnissen dieser Variante die erreichte Flexibilität im Vordergrund steht, sollen auch Bruttoerträge, PE-Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet werden. Der Anlagenidentifikator ist  $Sys = 1$ .

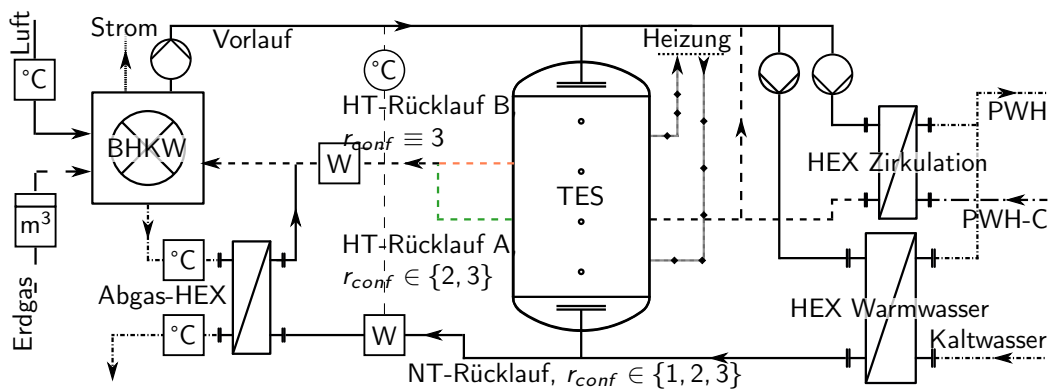


Abbildung 5.14: LowEx-System – reduziertes Funktionsschema (HT: Hochtemperatur, NT: Niedertemperatur)

### 5.3.3 LowEx Winter

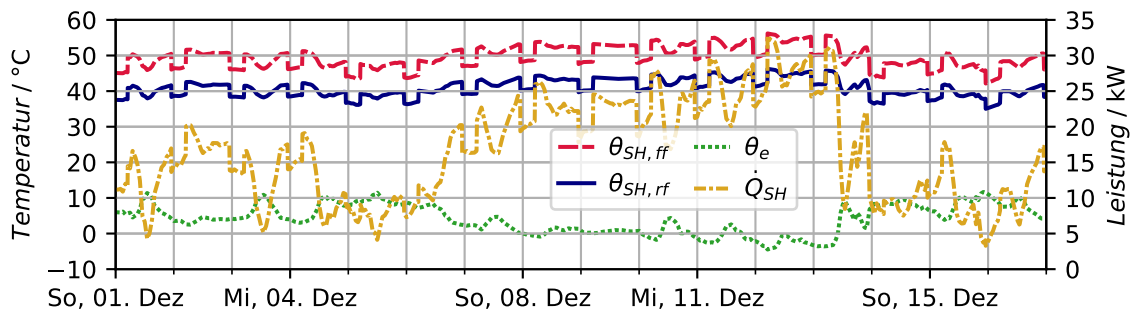
Flexibilität ist zum aktuellen Zeitpunkt nur im Sommer von Interesse. KWK-Vergütungen des KWKG 2016, Gaspreise und der aktuelle Strommix führen dazu, dass BHKWs so viel wie möglich laufen sollten, um Bruttoerträge, PE-Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen des Wohngebäudes zu reduzieren. Unter der Annahme, dass keine Wärme „notgekühlt“ werden darf und Strom ins Netz eingespeist werden kann, ist die Laufzeit nur durch den Wärmebedarf des Gebäudes begrenzt. Im Winter bedeutet dies, dass standardmäßig dimensionierte BHKWs nahezu durchgängig in Betrieb sind. Um die Auswirkung der Dimensionierung auf die Bruttoerträge in Abhängigkeit vom Anlagensystem zu ermitteln, wird daher ein LowEx-TWE-System im Winter simuliert, fortan als **LowEx Winter** (LEW) bezeichnet und unter dem Anlagenidentifikator  $Sys = 2$  geführt.

Der Aufbau des Systems entspricht dem Grundsystem LowEx Basis. Der Heizwärmebedarf wird hierbei vorrangig aus dem TES entnommen und somit durch das BHKW bereitgestellt. Dies ist in Abb. 5.14 dargestellt. Reicht dies nicht aus, produziert ein Gas-Brennwertkessel, in der Abbildung nicht aufgeführt, die benötigte Wärme.

Die Außentemperatur während der Winter-Simulationen beträgt zwischen  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $12^{\circ}\text{C}$ , siehe Abb. 5.15. Wird, wie in [140], [141] definiert, eine Außentemperatur von  $\theta_e = 5^{\circ}\text{C}$  als Grenze zwischen Winter und Übergangszeit angenommen, werden acht Wintertage und sieben Übergangstage abgebildet. Weiterhin sind in der Abbildung die Heizlast sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems am Beispiel eines Gebäudes mit  $2000\text{ m}^2$  nach EnEV 2009 aufgetragen, welche als Randbedingungen der Simulation vorgegeben werden. Diese skalieren mit dem Dämmstandard des Gebäudes. Mit besserem Dämmstandard sinken die Temperaturniveaus und die Heizlast. Die Heizlast nimmt zudem mit der Gebäudegröße zu. Eine Nachtabsenkung mit Aufheizspitze am Morgen wird der Simulation über die Messdaten aufgeprägt.

### 5.3.4 LowEx Strom

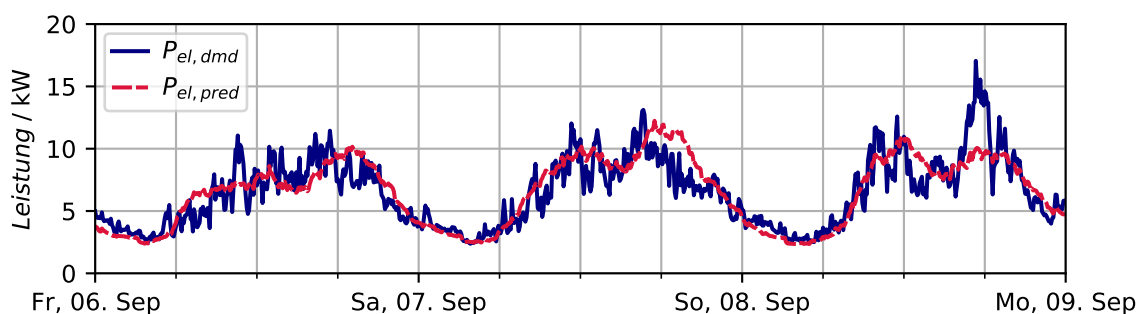
Das Vorhandensein von Flexibilität ist aufgrund des Kostendrucks im Baugewerbe und in der Energiewirtschaft noch kein ausreichendes Alleinstellungsmerkmal einer TWE-Anlage, um gegenüber Standardsystemen vorgezogen zu werden. Daher ist es von Interesse, welche Verbesserungen bezüglich Bruttoerträgen, PE-Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen mithilfe der höheren Flexibilität erzielt werden



**Abbildung 5.15:** Randbedingungen der Simulation – Heizlast, Vorlauf- und Rücklauf­temperatur der Heizkreise und Außentemperatur  $\theta_e$ ; Mehrfamilienhaus mit 2000 m<sup>2</sup> Wohnfläche nach EnEV 2009 im Winter 2019

können. Dies soll im Fall **LowEx Strom** (LES) mit dem Identifikator  $Sys = 3$  untersucht werden. Der Aufbau der Anlage entspricht dem System LowEx Basis. Im Gegensatz dazu wird das BHKW stromgeführt und mit einer kontinuierlichen Modulation im Bereich von 50 % bis 100 % der nominellen Leistung betrieben. Das Gebäude wird als Mieterstromprojekt mit einer Teilnahmequote von 70 % betrachtet. Das heißt es wird angenommen, dass ein Anteil des vom BHKW produzierten Stroms direkt vor Ort verbraucht wird. Eine modellprädiktive Regelung übernimmt die Betriebsoptimierung anhand von gemittelten Strom- und Wärmeverbrauchsprofilen über einen Zeithorizont von zwei Tagen. Die stündlichen Bruttoerträge stellen dabei die Kostenfunktion der Optimierung. Voraussetzung der Optimierung ist die Sicherstellung der Wärmeversorgung.

Für eine genaue Berechnung der im Mieterstrommodell verbrauchten, eingespeisten und bezogenen Stromanteile ist eine hohe zeitliche Auflösung der Simulationen mit Schrittweiten von mindestens 10 min notwendig [142]. Die als Randbedingungen verwendeten aktuellen Stromverbrauchsprofile sowie die aus langfristigen Messdaten ermittelten jahreszeitabhängigen mittleren Verbräuche zur Lastprognose durch die modellprädiktive Regelung sind in Abb. 5.16 dargestellt. Die verwendeten Profile haben eine Auflösung von 1 s. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Verbrauchsprofile mit hoher Genauigkeit abgebildet werden. Am Beispiel eines Mehrfamilienhauses mit 2000 m<sup>2</sup> wird deutlich, dass auch eine Mittelung über mehrere Wochen bei einem ausreichend großen Gebäude nur geringe Abweichungen vom tatsächlichen Verbrauch aufweist.



**Abbildung 5.16:** Randbedingungen der Simulation – sekundlich aufgelöstes elektrisches Verbrauchsprofil  $P_{el,dmd}$  sowie aus langfristigen Daten errechnetes mittleres Verbrauchsprofil  $P_{el,pred}$  zur Verwendung im modellprädiktiven Regler; Mehrfamilienhaus mit 2000 m<sup>2</sup>

### 5.3.4.1 Modellprädiktive Regelung

Die nichtlineare modellprädiktive Regelung bestimmt zwei Tage im Voraus, wann ein BHKW-Betrieb lohnenswert ist. Der aktuelle TES-Ladezustand wird mit einer Prognose für den Strom- und Wärmebedarf in Einklang gebracht. Die Optimierung wird alle 15 min durchgeführt. Die modellprädiktive Regelung ist aus drei Ebenen aufgebaut:

**Ebene 1** Zweipunktregler zur Sicherstellung der Wärmeversorgung. Dieser schaltet das BHKW an/aus wenn der TES leer/voll ist.

**Ebene 2** Nichtlineare modellprädiktive Regelung zur langfristigen Betriebsplanung über einen Zeithorizont von 2 Tagen. Optimierung der BHKW-Fahrweise alle 15 Minuten Simulationszeit anhand gemittelter Strom- und Wärmeverbrauchsprofile und des TES-Ladezustands. Kostenfunktion sind die negativen Bruttoerträge.

**Ebene 3** Feinregelung der BHKW-Modulation in jedem Zeitschritt anhand des tatsächlich vorliegenden Stromverbrauchs und der Kostenfunktion.

Die Regler-Ebenen haben eine absteigende Priorität. Wenn Ebene 1 eingreifen muss, werden Ebenen 2 und 3 überschrieben. Ebene 3 ist nur dann in Betrieb, wenn Ebene 2 einen Betrieb im aktuellen Zeitfenster vorsieht.

**Kostenfunktion der modellprädiktiven Regelung** Die Kostenfunktionen der Betriebsoptimierung in Ebenen 2 und 3 sind die stündlichen Betriebskosten des BHKWs abzüglich der Erlöse. Im Unterschied zu den gesamten Betriebskosten und Erlösen nach Gleichungen (2.22) und (2.28) in Abschnitt 2.5.4 wird für die Kostenfunktion  $K_{MPC}$  der modellprädiktiven Regelung angenommen, dass die produzierte Wärme vollständig zwischengespeichert werden kann. Daher ist der Wärmeverkauf für die Optimierung des unmittelbaren Fahrplanes vernachlässigbar. Folglich ergibt sich die Kostenfunktion zu:

$$K_{MPC} = K_G + K_{Insh} + K_{EEGU} + K_{Zuk} \quad (5.23)$$

$$- (R_{KWKG} + R_{EEX} + R_{Verk} + R_{vNNEG})$$

$$= K_{tot} - (R_{tot} - R_{th,Verk}) \quad (5.24)$$

Die Stromlastprofile zur Berechnung von Einspeisung, Eigennutzung und Bezug werden aus den in Abschnitt 4.2.4 analysierten Messdaten erstellt. Diese werden dazu zuerst mittels der Dynamisierungsfunktion der H0-Standardlastprofile entdynamisiert. Im Anschluss wird der Stromverbrauch auf einen Wert von 29,3 kW h/(m<sup>2</sup> a) normalisiert. Dies entspricht dem bundesdeutschen Durchschnitt für Wohngebäude mit mehr als elf Wohneinheiten ohne Elektrospeicherheizung [143]. Im letzten Schritt werden die Profile für das Zeitfenster der Simulationen von 15 Tagen, vom 1. bis zum 16. September, re-dynamisiert.

**Nebenbedingungen und Schranken** Die Nebenbedingungen der modellprädiktiven Regelung legen fest, dass der Ladestand des TES zu jedem Zeitpunkt im Zeitfenster der Optimierung zwischen dem maximalen und minimalen Wert liegen muss, das heißt  $Q_{TES,min} \leq Q_{TES} \leq Q_{TES,max}$  muss zu jeder Zeit erfüllt sein. Dazu wird eine Vorhersage des Wärmeverbrauchs  $\dot{Q}_{dmd}$  anhand des üblichen Verbrauchs an vergleichbaren Wochentagen und Wetterbedingungen erstellt. Mit der BHKW-Leistung  $\mu(i) \dot{Q}_{CHP}$  zum Zeitschritt  $i$ , welche durch die Optimierung bestimmt wird, kann die vom aktuellen

Zeitpunkt der Simulation  $t$  ausgehende kumulative Energiebilanz  $Q_t(n_{opt})$  für alle zukünftigen Zeitpunkte  $t + \Delta t_{opt} n_{opt}$  innerhalb des Zeitfensters  $\Delta t_{opt} N$  der Optimierung berechnet werden. Diesen Zusammenhang zeigt Gleichung (5.25):

$$Q_t(n_{opt}) = \Delta t_{opt} \sum_{i=t}^{t+\Delta t_{opt} n_{opt}} (\mu(i) \dot{Q}_{CHP} - \dot{Q}_{dmd}(i)), \quad \text{für } n_{opt} = 1, 2, \dots, N \quad (5.25)$$

Für die Optimierung wird ein Zeitintervall von  $\Delta t_{opt} = 15$  min und ein Zeitfenster von 2 d gewählt. Die Optimierung wird somit alle 15 min für  $N = 192$  Zeitpunkte durchgeführt. Ausgehend davon können beide Nebenbedingungen, dass der Energieinhalt im TES zu keinem der 192 Zeitpunkte im Optimierungszeitfenster über den maximalen Wert steigt beziehungsweise unter den minimalen Wert fällt, in Gleichungen (5.26) und (5.27) formuliert werden:

$$0 \leq (Q_{TES}(t) - Q_{TES,min}) + Q_t \quad (5.26)$$

$$0 \leq (Q_{TES,max} - Q_{TES}(t)) - Q_t \quad (5.27)$$

Die Maximal- und Minimalwerte der TES-Ladung werden vor der Simulation des LowEx Strom Systems aus den Ergebnissen des LowEx Basis Systems bestimmt. Sollte die TES-Ladung dennoch die Nebenbedingungen verletzen, wird die modellprädiktive Regelung von Ebene 1 der Regelung überschrieben, bis die Nebenbedingungen wieder erfüllt werden können.

Als Schranke der Optimierung wird die Modulation auf den Bereich  $\mu \in \{0\%, 50\% \leq \mu \leq 100\%\}$  begrenzt.

## 5.4 Aufbau des Parametergitters

Das Parametergitter zur Variation der Simulationsparameter soll in diesem Abschnitt definiert werden. Zuerst werden die abhängigen Variablen festgelegt. Im Anschluss werden die unabhängigen Variablen und die zugehörigen Wertebereiche bestimmt. Zuletzt werden die statistischen Verteilungen der unabhängigen Variablen ausgewählt und die Versuchspläne des Computer-Experiments generiert.

### 5.4.1 Abhängige Variablen

Wie schon eingangs des Kapitels erwähnt, sind die zu untersuchenden Zielgrößen:

- Erzwungene Flexibilität  $\tau_f$  und verzögerte Flexibilität  $\tau_d$  der Anlage in h
- Bruttoertrag  $B$  der Anlage in €/d, vor Steuern, Zinsen, Abschreibungen
- Reduktion des PE-Verbrauchs  $Q_{P,red}$  und der CO<sub>2</sub>-Emissionen  $m_{CO_2,red}$ , jeweils in % in Relation zu einem Referenzgebäude

Je nach Einsatzzweck des Anlagentyps wird eine Auswahl aus den auszuwertenden Variablen getroffen.

**Flexibilität** Die Flexibilität wird nach Abschnitt 2.4 berechnet. Sie definiert den Zeitraum, in welchem das BHKW ohne Unterbrechung an- beziehungsweise abgeschaltet bleiben kann. Die Flexibilität dezentraler Klein-BHKWs bildet den Grundpfeiler dieser Arbeit. Daher werden sowohl die erzwungene als auch die verzögerte Flexibilität getrennt im Detail ermittelt und analysiert. Die Flexibilität wird für das Referenzsystem und das LowEx Basis System untersucht.

**Bruttoertrag** Der Bruttoertrag entspricht den verbrauchsgebundenen Kosten nach VDI 2067, siehe Abschnitt 2.5.4. Anhand des Bruttoertrags soll das Potential der TWE-Anlagentechnik aus einer wirtschaftlichen Perspektive erläutert werden. Der Einfluss der TWE-Anlage kann ausschließlich im Sommer von der Heizlast bereinigt ermittelt werden. Daher wird auf eine vollständige Annuitätenrechnung unter Einbezug des Winterbetriebs verzichtet. Dies ermöglicht weiterhin eine ausführlichere Betrachtung des Kernthemas der Flexibilität. Der Bruttoertrag wird für alle Anlagentypen berechnet.

**PE- und CEE Einsparung** Die Berechnungsvorschriften des PE-Verbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind in Abschnitt 2.6 gegeben. Um eine Bewertung der erzielten Reduktionen unabhängig von den Randbedingungen zu ermöglichen, werden die Einsparungen in Relation zu einem Referenzgebäude betrachtet. Für das Referenzgebäude wird angenommen, dass kein BHKW vorhanden ist. Das heißt, dass die gesamte Wärme mittels eines Gas-Brennwertkessels zur Verfügung gestellt wird, während der benötigte Strom vollständig aus dem Netz bezogen wird. Im Winter, mit zunehmender Heizlast, nimmt der Einfluss der TWE-Systeme ab. Somit werden die Unterschiede zwischen den Anlagensystemen geringer. Da das Ziel jedoch explizit eine Detailanalyse der mittels der TWE-Anlagensysteme erzielbaren Veränderungen ist, werden auch hier ausschließlich Sommerbetriebsdaten des Referenzsystems, des LowEx Basis und des LowEx Strom Systems analysiert.

### 5.4.2 Unabhängige Variablen und Wertebereiche

**Randbedingungen** Die nicht beeinflussbaren Parameter, die Randbedingungen, sind unabhängig von der verbauten Anlage und dienen somit als Vergleichsbasis. Da alle Zielgrößen vorrangig vom Energieverbrauch des Gebäudes abhängig sind, können die folgenden Gruppen von Randbedingungen ausgemacht werden:

1. Beheizte Wohnfläche, Anzahl Wohneinheiten, Personenbelegung
2. Dämmstandard der Gebäudehülle und der Verteilleitungen
3. Gebäudeform, Aufteilung der Wohnungen, Unterkellerung, Tiefgarage, Standort, etc.

Der Einfluss der ersten beiden Gruppen ist unbestritten relevant. Die dritte Gruppe kann hingegen nach Voruntersuchungen vernachlässigt werden. Der Einfluss ist einerseits zu gering, andererseits führt eine Abbildung dessen zu einem nicht proportionalem Anstieg der Parameteranzahl.

Weiterhin nimmt der Einfluss einzelner Wohnungen bei größeren Mehrfamilienhäusern ab. Daher wird die erste Gruppe mittels der mittleren Wohnfläche je Wohnung zusammengefasst und im Folgenden durch die beheizte Wohnfläche repräsentiert. Da hier ausschließlich Mehrfamilienhäuser mit mehr als zehn Wohneinheiten betrachtet werden, ist die Annahme einer mittleren Wohnfläche gerechtfertigt. Nach Daten des Statistischen Bundesamtes sind dies deutschlandweit im Jahr 2018 69,7 m<sup>2</sup> für Mehrfamilienhäuser mit mehr als drei Wohneinheiten [144].

RB der Simulationen im Parametergitter sind somit die beheizte Wohnfläche  $A_{Wff}$  in m<sup>2</sup> und die Dämmstärke von Gebäudehülle und Rohren  $d_{Ins}$  in %. Die Dämmstärke ist in Relation zur nach

EnEV 2009 vorgegebenen Standarddämmstärke angegeben. Das heißt ein Wert von  $d_{Ins} = 100\%$  entspricht EnEV 2009, ein Wert von  $d_{Ins} = 200\%$  entspricht einem aktuellen Passivhaus und  $35\%$  einem Gebäude vor Einführung der Wärmeschutzverordnung 1977.

Da für die Bereitstellung von Flexibilität mittels LowEx-TWE vorrangig größere Mehrfamilienhäuser von Interesse sind, wird der Wertebereich für die Wohnfläche auf  $900 \text{ m}^2 \leq A_{Wfl} \leq 10\,000 \text{ m}^2$  festgelegt, entsprechend ca. 13 bis 140 Wohneinheiten. Mit Dämmstärken zwischen  $50\% \leq d_{Ins} \leq 200\%$  wird nahezu der gesamte im Bestand anzutreffende Bereich abgedeckt. Eine detaillierte Auflistung ist in Tabelle 5.3 auf Seite 96 zu finden.

**Unabhängige Variablen** Durch die Anlagenkonfiguration beeinflussbare unabhängige Variablen liegen in großer Zahl vor. Hierzu können offensichtliche Parameter wie Leistungen und Speichergößen zählen. Jedoch haben auch Rohrlängen und verwendete Ventiltypen einen Einfluss auf die Zielgrößen. Anhand von Voruntersuchungen konnten die wichtigsten Parameter hervorgehoben werden. Dies sind die Speichergöße  $V_{TES}$  in  $\text{m}^3$ , die thermische Leistung des BHKWs  $\dot{Q}_{CHP}$  in kW bei einer Modulation von  $\mu = 100\%$ , die Vorlauftemperatur des BHKWs  $\theta_{ff,CHP}$  in  $^{\circ}\text{C}$  sowie die elektrische BHKW Leistung in Relation zu  $\dot{Q}_{CHP}$ , abgebildet über die dimensionslose Stromkennzahl  $s$  des BHKWs. Die Stromkennzahl und die BHKW-Leistung sind, wie in der Industrie üblich, auf die thermische Leistung des BHKWs ohne zusätzlichen Abgas-Wärmeübertrager bezogen.

Zusätzlich werden zwei für die LowEx-TWE-Anlage systemspezifische Parameter ausgewählt: Die Höhe der zusätzlichen Rücklaufanschlüsse  $h_{ff,CHP}$  relativ zur Höhe des TES in  $\%$  und die kategorische Variable  $r_{conf}$ , welche die Anschlusskonfiguration beschreibt. Beim Referenzsystem können diese Parameter nicht variiert werden, da nur zwei Anschlüsse vorhanden sind.

Die Wertebereiche der Speichergöße und BHKW-Leistung werden in Abhängigkeit von den Wertebereichen der RB gewählt. Die Speichergöße wird auf den Bereich  $0,5 \text{ m}^3 \leq V_{TES} \leq 15 \text{ m}^3$  begrenzt, während die thermische BHKW-Leistung 10 kW bis 100 kW beträgt. Die Vorlauftemperatur und Stromkennzahl sind in der Regel vom BHKW-Modul abhängig, mit einer Tendenz zu höheren Werten bei größeren Modulen. Für die Simulationen wird  $\theta_{ff,CHP}$  auf  $70^{\circ}\text{C}$  bis  $95^{\circ}\text{C}$  festgelegt. Die Stromkennzahl liegt im Bereich von  $0,4 \leq s \leq 0,6$ . Bei den LowEx-Systemen erlaubt der Parameter  $h_{ff,CHP}$  eine Verschiebung der Höhe der Rücklaufanschlüsse um  $\pm 8\%$ . Tabelle 5.3 zeigt eine Auflistung aller Parameter inklusive statistischer Kennzahlen.

### 5.4.3 Versuchsplanung - Häufigkeitsverteilungen und Design of Experiments

Die Versuchsplanung für die Durchführung der Parametervariation beinhaltet die Definition der statistischen Verteilungen der Parameter sowie die Auswahl und Generierung eines Versuchsplanes.

**Häufigkeitsverteilungen** Innerhalb der zuvor festgelegten Wertebereiche werden die Stichproben der Parametersätze anhand ausgewählter Häufigkeitsverteilungen verteilt. Bei den RB wird einerseits auf eine dem Bestand entsprechende Verteilung geachtet, andererseits wird diese auf den für LowEx-TWE-Anlagen relevanten Bereich ab ca. zehn Wohneinheiten begrenzt. Alle Einflussgrößen werden möglichst unabhängig voneinander definiert, um Kreuzkorrelationen gering zu halten. Da viele statistische Modelle sensibel bezüglich der Werteverteilung sind und eine Normalverteilung der Daten annehmen, wird, soweit umsetzbar, auf eine hohe Normalität der Grundgesamtheit geachtet. Die Verteilungen der unabhängigen Variablen ergeben sich damit zu:



- $A_{Wfl}$  (RB) Weibull-Verteilung mit Formparameter  $k = 1,8$ , Verschiebung nach rechts um  $900 \text{ m}^2$  und skaliert mit  $1/4200$ . Bildet gehäuft Wohnflächen unter  $4500 \text{ m}^2$  ab. Ähnlich einer rechts-schiefen Normalverteilung, jedoch mit unendlicher Steigung der Dichtefunktion bei  $900 \text{ m}^2$ , d.h. schneller Anstieg der Häufigkeit niedriger Wohnflächen.
- $d_{Ins}$  (RB) Linksschiefe Normalverteilung mit Mittelwert  $\mu = 115 \%$ , Standardabweichung  $\sigma = 37,5 \%$  und Schiefe  $\alpha = 0,037$ . Wertebereich von WärmeschutzV 1977 ( $d_{Ins} \approx 45 \%$ ) bis Passivhaus ( $d_{Ins} \approx 200 \%$ ). Es werden vermehrt Dämmstandards neuer als EnEV 2009 ( $d_{Ins} \approx 100 \%$ ) abgebildet, der Erwartungswert liegt bei EnEV 2014 ( $d_{Ins} \approx 125 \%$ ).
- $V_{TES}$  Trapezverteilung von  $0,5 \text{ m}^3$  bis  $15 \text{ m}^3$  und Plateau der höchsten Wahrscheinlichkeiten von  $1,5 \text{ m}^3$  bis  $10,9 \text{ m}^3$ . Zusätzlich überlagert mit Abhängigkeit von  $A_{Wfl}$ , um extrem kleine/große Speicher bei großen/kleinen Gebäuden zu vermeiden.
- $\dot{Q}_{CHP}$  Skalierung von  $A_{Wfl}$  mit ca.  $1/130$  und Überlagerung mit trapezverteilten Zufallswerten, um extrem kleine/große BHKWs bei großen/kleinen Gebäuden zu vermeiden.
- $\theta_{ff,CHP}$  Normalverteilung mit Mittelwert  $\mu = 82^\circ\text{C}$  und Standardabweichung  $\sigma = 5,5^\circ\text{C}$ . Schmale Verteilung um den Mittelwert bildet in der Praxis verfügbare Werte ab.
- $s$  Normalverteilung mit Mittelwert  $\mu = 0,5$  Standardabweichung  $\sigma = 0,0375$ . Schmale Verteilung um den Mittelwert bildet in der Praxis verfügbare Werte ab.
- $h_{rf,CHP}$  Normalverteilung mit Mittelwert  $\mu = 0 \%$  und Standardabweichung  $\sigma = 3 \%$ . In Relation zur gesamten TES-Höhe ( $\equiv 100 \%$ ) schmale Normalverteilung reduziert die Gefahr von Temperaturinversionen im TES.
- $r_{conf}$  Diskrete Häufigkeitsverteilung,  $75 \%$  der Grundgesamtheit enthalten zwei Anschlüsse ( $r_{conf} = 2$ ),  $15 \%$  einen Anschluss ( $r_{conf} = 1$ ) und  $10 \%$  drei Anschlüsse ( $r_{conf} = 3$ ). Mehr Anschlüsse führen zu besserem Erhalt der Schichtung, jedoch auch zu höheren Kosten und Wärmeverlusten. Daher entspricht die Verteilung einem Kompromiss aus Kosten und technischen Vorteilen.
- $Sys$  Anlagensystemidentifikator ohne berechnete Verteilung. Für Referenzsystem  $Sys = 0$ , LowEx Basis  $Sys = 1$ , LowEx Winter  $Sys = 2$ , LowEx Strom  $Sys = 3$ .

Die Abhängigkeit zwischen BHKW-Leistung, Speichergröße und Wohnfläche kann nicht vollständig minimiert werden, da ein kleines BHKW oder ein kleiner Speicher bei einer hohen Wohnfläche, sowie der umgekehrte Fall, keine verwertbaren Simulationsergebnisse liefern würden. Zwischen diesen Parametern wird daher systembedingt und unabhängig vom verwendeten Versuchsplan eine erhöhte Korrelation verbleiben. Weiterhin ist die Wohnfläche als RB nicht Teil der detaillierten Ergebnisbetrachtung. Daher ist diese Kreuzkorrelation bei geeigneter Konditionierung der Regressionsmodelle vernachlässigbar. Die restlichen Parameter zeigen keine direkten Abhängigkeiten.

**Design of Experiments** Weit verbreitet sind vollständige (faktorielle) Versuchspläne. Hierbei werden jegliche Kombinationen von Parameterwerten probiert. Oftmals wird nur ein Parameter pro Schritt angepasst. In diesem Fall wird das Verfahren auch One-factor-at-a-time-Methode genannt. Parameterwerte können vorher definierten Werteverteilungen entnommen werden. In der Regel werden die Parameter jedoch von Hand vorgegeben. Ein vollständiger Versuchsplan erlaubt es, den Einfluss jedes einzelnen Parameters auch ohne nachfolgende statistische Modellierung gezielt zu untersuchen. Abhängigkeiten der Variablen können minimiert und die erklärbare Varianz der Zielgröße maximiert werden. Jedoch ist hierfür eine sehr hohe Anzahl an Versuchen notwendig. Für die Untersuchung eines Einflusses von Grad  $d$  sind je Variable  $d + 1$  Stufen notwendig. Bei  $n$  Variablen von Grad  $d$  ergeben

sich mindestens  $N = (d + 1)^n$  Versuche. Der Berechnungsaufwand steigt exponentiell an. Würden im hier vorliegenden Fall nur sechs der acht Parameter mit je drei Stufen, das heißt mit quadratischen Effekten, bei allen  $n_{Sys} = 4$  Anlagentypen untersucht werden, ergäbe dies 2916 Simulationen:

$$N = n_{Sys} \cdot n_{A_{Wff}} \cdot n_{d_{Ins}} \cdot n_{V_{TES}} \cdot n_{\dot{Q}_{TES}} \cdot n_{\theta_{ff,CHP}} \cdot n_s = 4 \cdot 3^6 = 2916 \quad (5.28)$$

Aufgrund der erwünschten sekundengenauen Darstellung der TWE-Verbräuche sind 2916 Simulationen nicht umsetzbar. Darüber hinaus bedeute dies, dass wichtige Parameter wie die Speichergroße oder die Wohnfläche auf eine Parameterauswahl von drei Stichproben reduziert wären, beispielsweise  $V_{TES} \in \{1,5, 3,5, 6\} \text{ m}^3$  und  $A_{Wff} \in \{1500, 3000, 5000\} \text{ m}^2$ . Wichtige Wertebereiche würden nicht abgedeckt werden. Auch Sensitivitäten der Parameter in bestimmten Wertebereichen wären verdeckt. Weiterhin erfordert die Abbildung von funktionalen Zusammenhängen von Grad  $n$  im einfachsten Fall  $n + 1$  Stufen. In der Realität sind meistens deutlich mehr Stufen notwendig. Eine Modellierung der Zusammenhänge durch eine sogenannte Response Surface zweiten Grades wäre daher eingeschränkt oder nicht möglich. Die Response Surface stellt eine Näherung des Zusammenhangs zwischen mehreren unabhängigen und einer abhängigen Variable durch ein Polynom zweiter Ordnung dar. Die Berechnung einer Response Surface erlaubt beispielsweise das Auffinden von Minima, Maxima, Wendepunkten, Interaktionen und Sensitivitäten [145], [146].

Teilfaktorpläne, eine Weiterentwicklung vollständiger Versuchspläne, reduzieren die Anzahl der nötigen Versuche durch Auslassen von Kombinationen. Eine gegebenenfalls höhere Korrelation der Einflussgrößen und verringerte Erklärbarkeit der Varianz der abhängigen Variable muss akzeptiert werden. Die restlichen Probleme bleiben bestehen.

Bei Computer-Experimenten und dort, wo eine Randomisierung der Parameter möglich ist, wird daher häufig auf zufallsverteilte Parametersätze zurückgegriffen. Ein bekannter Vertreter dieser Verfahren ist die Monte-Carlo-Simulation. Eine Weiterentwicklung davon auf Basis Lateinischer Quadrate für eine beliebige Anzahl an Dimensionen ist das Latin Hypercube Sampling [147].

Einer der Vorteile von Latin Hypercube Sampling gegenüber der Monte-Carlo-Simulation ist, dass ein Parametersatz charakteristisch für die tatsächliche Varianz ist. In der Folge ist die Anzahl der benötigten Stichproben für die Abbildung der Varianz unabhängig von der Anzahl der Parameter. Dies führt zu der Faustregel, dass die Grundgesamtheit bei Latin Hypercube Sampling nach Gleichung (5.29)  $N$  Stichproben in Abhängigkeit von der Anzahl der Parameter  $P$  enthalten sollte [148].

$$N \geq \frac{4}{3} P \quad (5.29)$$

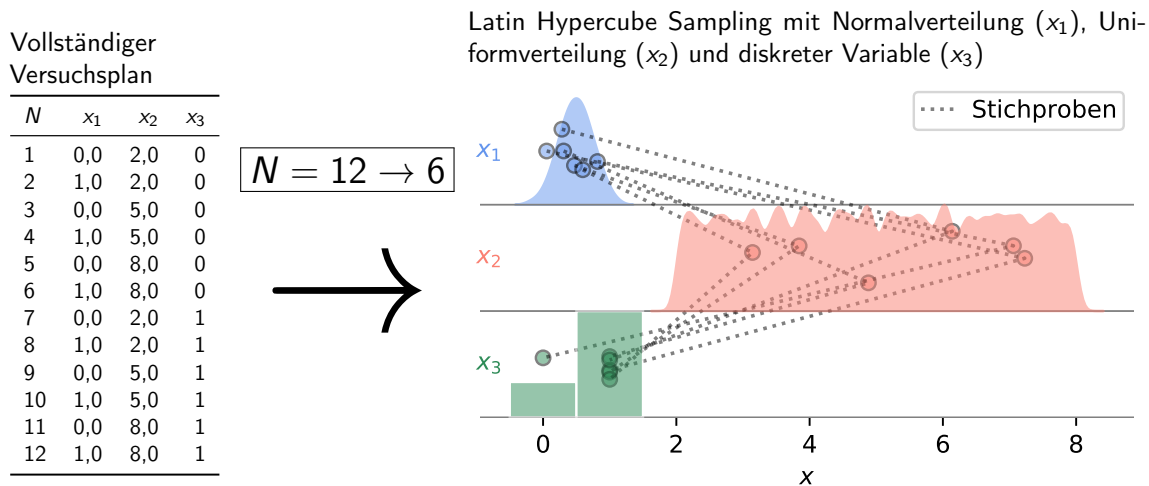
Eine vergleichbare Varianz wird bei Monte-Carlo-Simulationen erst bei der circa doppelten Anzahl an Stichproben erreicht, bei vollständigen und teilfaktoriellen Versuchsplänen werden nochmals deutlich mehr Stichproben benötigt [145]. Der Stichprobenmittelwert konvergiert bei Latin Hypercube Sampling mit steigendem  $N$  schnell gegen den Erwartungswert. Die Unsicherheit der beobachteten Effekte ist gering. Weiterhin kann der Einfluss eines jeden Parameters für  $N \gg P$  sehr effektiv durch eine Regressionsanalyse untersucht werden [117], [149]. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Kreuzkorrelation schon bei der Erstellung des Parametergitters kontrolliert und minimiert werden kann.

Die Faustregel nach Gleichung (5.29) wurde in [150], [151] weiter untersucht und mit  $N \approx 3P$  verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass bei beiden Stichprobengrößen die gleichen Parameter als wichtig identifiziert wurden. Weiterhin waren die Mittelwerte der Ergebnisse der Modelle in guter Näherung äquivalent. Die Sensitivitätsanalyse sowie die Varianz der Ergebniswerte zeigten jedoch eine Abhängigkeit von der Größe der Grundgesamtheit.

Abb. 5.17 zeigt die Vorteile von Latin Hypercube Sampling gegenüber vollständigen Versuchsplänen. Nach Gleichung (5.29) ergeben sich für Latin Hypercube Sampling ergeben sich bei  $P = 2$  kontinuierlichen Variablen  $x_1$  und  $x_2$  mit zwei und drei Werten und einer diskreten Variable  $x_3$ , mittels One-Hot-Encoding ohne Definition einer Referenzstufe für  $n = 2$  Stufen auf  $P^* = n = 2$  kodiert:

$$N \geq \frac{4}{3} \cdot (P + P^*) = \frac{4}{3} \cdot 4 \approx 5,3 \rightarrow N = 6 \quad (5.30)$$

Stichproben. Höhergradige Terme sind darstellbar, Häufigkeitsverteilungen sind einfach anwendbar. Die Definition einer Referenzstufe könnte die Anzahl der benötigten Stichproben auf  $N = 4$  reduzieren. Bei einem vollständigen Versuchsplan werden hingegen  $N = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12$  Stichproben benötigt. Eine quadratische Abbildung ist nur für  $x_2$  möglich, da nur diese mehr als zwei Stufen hat. Die erklärable Varianz der Zielgröße ist tendenziell geringer als bei Latin Hypercube Sampling. Das Design of Experiments wird daher mittels Latin Hypercube Sampling umgesetzt.



**Abbildung 5.17:** Design of Experiments – Von vollständigen (faktoriellen) Versuchsplänen zu Latin Hypercube Sampling

#### 5.4.4 Erstellung des Parametergitters

Das hier verwendete Parametergitter enthält bei den LowEx-Anlagen  $P = 7$  kontinuierliche Variablen und die kategorische Variable  $r_{conf}$  mit  $n = 3$  Stufen. Die kategorische Variable wird mittels One-Hot-Encoding auf  $P_{rl}^* = n - 1 = 2$  binäre Ersatzvariablen kodiert. Somit hat die kleinste Grundgesamtheit  $N \geq \frac{4}{3}(P + P_{rl}^*) = 12$  Stichproben. Beim Referenzsystem sind es  $P = 6$  kontinuierliche Parameter, es folgt  $N \geq 8$ .

Wird auch der Anlagentyp über eine zusätzliche kategorische Variable abgebildet, entstehen über One-Hot-Encoding der  $n = 4$  Anlagentypen  $P_{sys}^* = n - 1 = 3$  zusätzliche binäre Parameter. Die resultierende Grundgesamtheit beinhaltet mindestens  $N \geq \frac{4}{3}(P + P_{rl}^* + P_{sys}^*) = 16$  Stichproben. Dabei wird vernachlässigt, dass für das Referenzsystem zwei Parameter ohne Bedeutung sind.

Für das zu generierende Parametergitter wird mit  $N = 541$  eine deutlich größere Grundgesamtheit gewählt. Dies ist mehreren Umständen geschuldet: Zuallererst können die bei Anwendung der Faustregel zu erwartenden oben genannten Ungenauigkeiten der Sensitivität und Varianz vermieden werden. Weiterhin ist die Erstellung der Response Surface mittels Regressionsanalyse sensitiv für die Anzahl der Stichproben. Insbesondere bei einer Transformation zu einem Polynom zweiten oder höheren Grades steigt die Parameteranzahl der Design Matrix der Regression schnell an. Die Faustregel, dass die Stichprobengröße größer als die Anzahl der Freiheitsgrade des Gleichungssystems sein sollte, das heißt  $N - P - 1 > 0$ , ist bei regularisierten Verfahren wie Ridge- oder Lasso-Regression zwar nicht mehr zwingend notwendig, erhöht aber die Genauigkeit und Konvergenz des Verfahrens. Letztendlich sind  $V_{TES}$  und  $\dot{Q}_{CHP}$  abhängig von der Wohnfläche. Eine größere Grundgesamtheit kann den Einfluss dieser eingeführten Korrelation mindern.

Um die Relevanz der verschiedenen Anlagentypen für die Ergebnisse zu repräsentieren, werden die  $N = 541$  Stichproben nach Anlagen geschichtet und gezielt aufgeteilt:

**Referenzsystem** Anlagenidentifikator  $Sys = 0$ , mit  $N = 100$  Stichproben und 6 Parametern

**LowEx Basis** Anlagenidentifikator  $Sys = 1$ , mit  $N = 200$  Stichproben und 9 Parametern

**LowEx Winter** Anlagenidentifikator  $Sys = 2$ , mit  $N = 41$  Stichproben und 9 Parametern

**LowEx Strom** Anlagenidentifikator  $Sys = 3$ , mit  $N = 200$  Stichproben und 9 Parametern

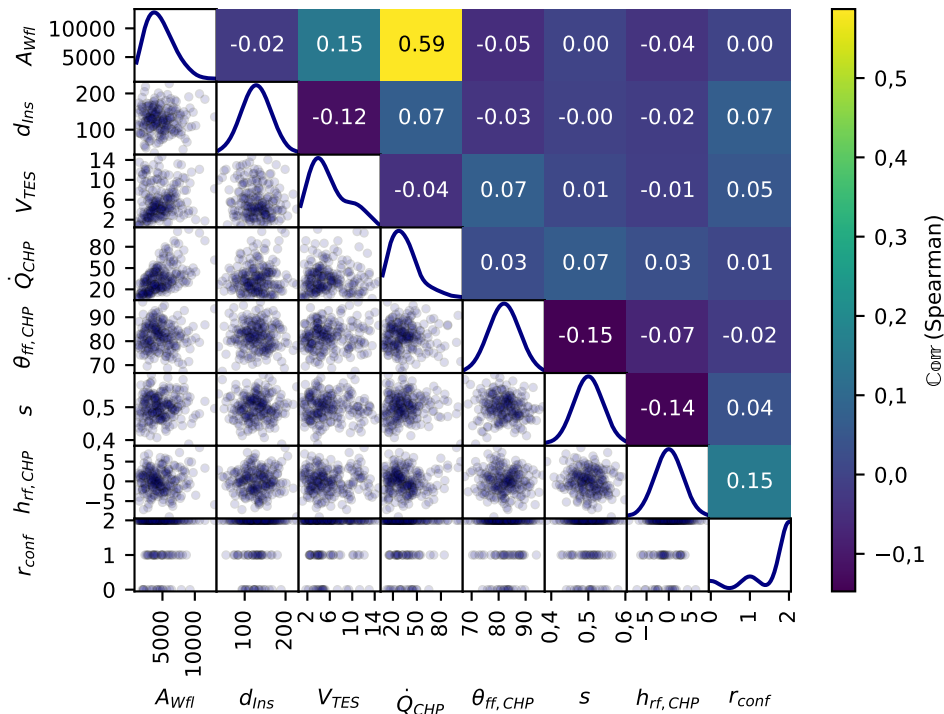
Tabelle 5.3 fasst das resultierende Parametergitter zusammen. RB sind gekennzeichnet. Als beschreibende Größen der Werteverteilungen sind Minimal-, Maximal- und Mittelwerte sowie die Quartile angegeben. Mittelwert und Median liegen nah beisammen. Minimal- und Maximalwerte liegen weit außerhalb der Quartile. Die Werte sind zentrisch verteilt.

**Tabelle 5.3:** Unabhängige Variablen der Parametervariation – Minimal-, Maximalwerte sowie Mittelwerte  $\bar{x}$ , Median  $x_{50}$ , 25. Perzentil  $x_{25}$  und 75. Perzentil  $x_{75}$  (rf: Rücklauf, ff: Vorlauf)

Bezeichnung	RB	Größe/Einheit	Min.	$x_{25}$	$\bar{x}$	$x_{50}$	$x_{75}$	Max.
Wohnfläche	✓	$A_{WHI}/m^2$	987,2	3020,2	4671,3	4351,7	5982,0	13 053,1
Dämmstärke	✓	$d_{Ins}/\%$	35,9	104,9	128,4	128,2	151,7	227,2
TES-Volumen	X	$V_{TES}/m^3$	0,8	3,4	5,8	4,9	7,9	14,7
BHKW-Leistung	X	$\dot{Q}_{CHP}/kW$	7,1	21,8	35,5	31,5	44,0	104,8
BHKW-ff-Temp.	X	$\theta_{ff,CHP}/^\circ C$	67,4	78,3	82,0	82,0	85,7	96,4
Stromkennzahl	X	$s/-$	0,39	0,47	0,50	0,50	0,53	0,60
Anschlusshöhe	X	$h_{rf,CHP}/\%$	-9,0	-2,0	0,0	0,0	2,0	8,6
rf-Konfiguration	X	$r_{conf}/-$	0	2	-	2	2	2
Anlagentyp	X	$Sys/-$	0	-	-	-	-	3

Das Parametergitter der unabhängigen Variablen mit den zuvor festgelegten Häufigkeitsverteilungen ist in Abb. 5.18 dargestellt. Ausgenommen ist der Anlagenidentifikator  $Sys$ . Auf der Hauptdiagonalen des Plots sind die über eine Kerndichteschätzung berechneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jeweiligen Variablen abgebildet. Die untere Dreiecksmatrix zeigt die Scatter-Plots der Parameter. Eine hohe Ähnlichkeit der meisten Verteilungen zu einer Normalverteilung ist in beiden Plots zu erkennen. Bei  $V_{TES}$  und  $\dot{Q}_{CHP}$  ist die Ähnlichkeit zur Weibull-Verteilung von  $A_{WHI}$  auffällig. Dies spiegelt sich auch im hohen paarweisen partiellen Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten  $C(A_{WHI}, \dot{Q}_{CHP})$  wider. Dieser ist in der oberen Dreiecksmatrix als Heatmap abgebildet. Die optische Ähnlichkeit zwischen  $V_{TES}$

und  $A_{WH}$  kann quantitativ vorerst nicht bestätigt werden. Alle weiteren Korrelationskoeffizienten sind vernachlässigbar klein.



**Abbildung 5.18:** Parametergitter der unabhängigen Variablen – Scatter-Plot der Verteilungen auf der unteren Dreiecksmatrix, Werteerteilungen auf der Hauptdiagonalen, paarweise partielle Korrelationskoeffizienten auf der oberen Dreiecksmatrix

**Untersuchung der Multikollinearität** Die Auswertung der Korrelationsmatrix in Abb. 5.18 hat gezeigt, dass nur der Spearman Rangkorrelationskoeffizient zwischen  $A_{WH}$  und  $\dot{Q}_{CHP}$  von 0,59 auffällig ist. Für diese Wertekombination wird der höchste  $VIF$  von 1,55 gefunden, der Median aller  $VIF$  liegt mit 1,05 nahe am Minimalwert 1. Der maximale Konditionsindex beträgt  $KI = 4,06$ , der Median ist 2,5. Beide Werte liegen weit unter den in Abschnitt 3.3.1 festgelegten Grenzwerten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Multikollinearität vernachlässigbar ist.

## 5.5 Analyse der Simulationsergebnisse

Die Simulation eines Parametersatzes eines Anlagentyps über das Zeitfenster von 15 Tagen benötigt auf einem Prozessorkern 6 h bis 80 h, im Durchschnitt ca. 20 h. Hohe Leistungsdichten, Temperaturinversionen und Lastschwankungen führen zu kleinen Schrittweiten und der Wiederholung von Schritten. Je nach Anlagentyp und Parametersatz werden auf einem handelsüblichen Prozessorkern pro Sekunde 15 bis 40 erfolgreiche Schritte mit einer Schrittweite von 0,25 s bis 2 s berechnet. Auf acht Prozessorkernen hat die Berechnung aller Simulationen ungefähr zwei Monate benötigt.

Aus den Simulationsergebnissen werden die zu untersuchenden Zielgrößen berechnet. Der Fokus liegt weiterhin, wie in Abschnitt 5.4.1 erläutert, auf der erzwungenen und verzögerten zeitlichen Flexibilität  $\tau_f$  und  $\tau_d$  der Anlagen. Als ergänzende Betrachtung werden die verbrauchsgebundenen Kosten in Form des täglichen Bruttoertrags  $B$  sowie die Effizienz anhand der PE-Einsparung  $Q_{P,red}$  und der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen  $m_{CO_2,red}$  berechnet.

Eine klare Aussage bezüglich der Unterschiede zwischen den Systemen und Sensitivitäten bezüglich Parametern ist anhand einer grafischen Darstellung der Ergebnisse nicht möglich. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge und der Vielzahl an Einflussfaktoren werden Differenzen verdeckt. Daher soll in diesem Abschnitt ein kurzer Überblick über die wichtigsten Kenngrößen gegeben werden, während im nachfolgenden Kapitel eine statistische Untersuchung mittels einer Regressionsanalyse mit Sensitivitätsanalyse im Detail erfolgt.

**Betriebscharakteristik** Die Betriebscharakteristik des Referenzsystems sowie des LowEx Basis und Strom Systems wird anhand einer ausgewählten Stichprobe aus dem Parameterraster analysiert. Die Parameter der Stichprobe sind in Tabelle 5.4 aufgelistet. Die Systeme LowEx Basis und Strom haben die gleichen Parameter und verfügen über die gleiche Anlagentechnik. Sie unterscheiden sich ausschließlich in der Regelung des BHKW-Betriebs. Entsprechend Abb. 5.14 steht das gesamte Speichervolumen dem BHKW zur Verfügung. Das Referenzsystem hingegen benötigt einen zusätzlichen PWH-Speicher, siehe Abb. 5.12. Das verfügbare Speichervolumen wird auf beide Speicher aufgeteilt. Weiterhin verfügt das BHKW dadurch nur über einen Rücklauf. Eine Variation der Anschlusshöhe ist nicht möglich.

**Tabelle 5.4:** Parameter der Stichprobe zur Analyse der Betriebscharakteristik

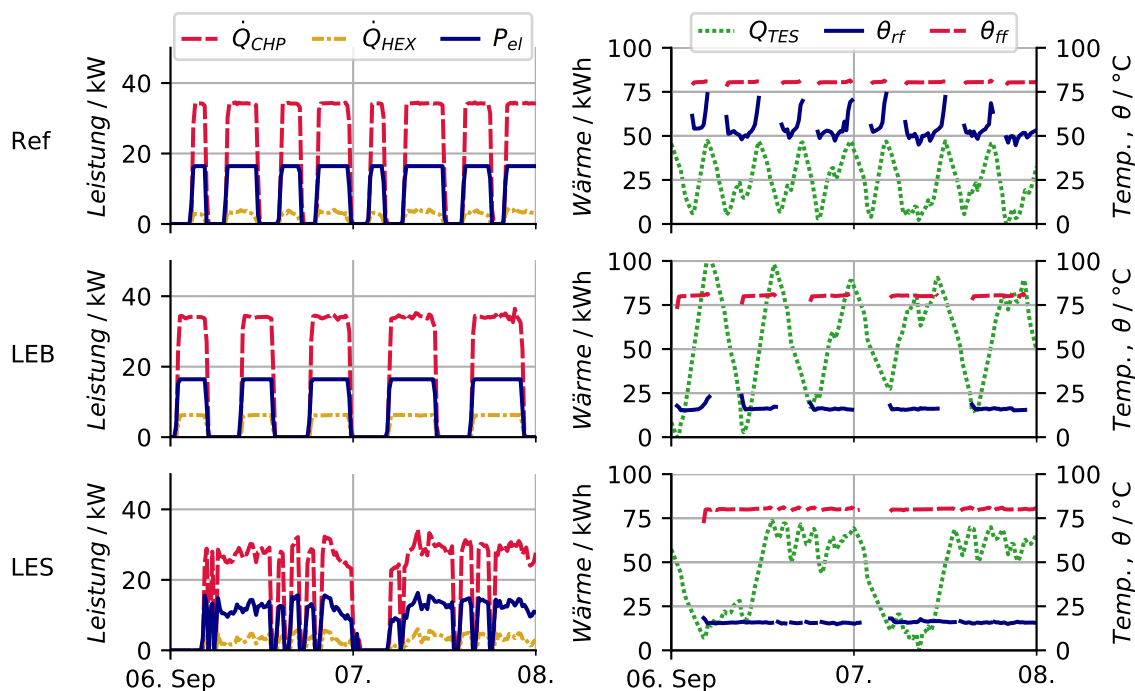
Parameter	$A_{Wfl}$ m <sup>2</sup>	$d_{Ins}$ %	$V_{TES}$ m <sup>3</sup>		$\dot{Q}_{CHP}$ kW	$\theta_{ff,CHP}$ °C	$s$ –	$h_{rf,CHP}$ %	$r_{conf}$ –
			$V_{CHP}$	$V_{PWH}$					
Referenz			1,5	1,3					
LowEx Basis/Strom	4596	80	2,8	–	35	80	0,48	–1	2

Nach einer Einschwingzeit der Simulationen von fünf Tagen werden in Abb. 5.19 zwei typische Tage betrachtet. Die PID-Regelung der BHKW-Vorlauftemperatur ist bei allen Systemen stabil. Der Sollwert wird schnell und exakt erreicht. Die Konstanz der Leistungen, ausgenommen hiervon ist das LowEx Strom System mit einer gezielten Leistungsmodulation, zeigt im Zusammenspiel mit den Temperaturen, dass auch die Regelung der Massenströme stabil und schnell reagiert.

In der ersten Reihe der Abbildung ist zu erkennen, dass der TES beim Referenzsystem in zwei Tagen acht mal geladen werden muss, um ausreichend Wärme zur Verfügung stellen zu können. Beim System LowEx Basis sind es fünf Ladevorgänge. Dies spiegelt sich auch in der TES-Kapazität wider. Diese beträgt beim Referenzsystem ca. 47 kW h, während es beim LowEx Basis System bis zu 102 kW h sind. Die tatsächlich verfügbare Kapazität ist von der aktuellen Wärmeabnahme und den damit vorliegenden Temperaturniveaus abhängig. Sie schwankt im Tagesverlauf. Die niedrigere Kapazität des Referenzsystems ist einerseits auf den kleineren TES, andererseits auf die hohen Rücklauftemperaturen von im Mittel 54 °C zurückzuführen. Das LowEx-System zeigt eine Rücklauftemperatur von 16 °C am unteren Anschluss. Die Temperaturen haben eine Auswirkung auf die Wärmeauskopplung aus dem Abgas-Wärmeübertrager. Während die Leistung des Kern-BHKWs unabhängig von den Systemen ist, kann mittels des LowEx-Systems 2,75 kW mehr Wärme aus dem Abgas gewonnen werden. Dies

entspricht einer Steigerung des Wirkungsgrades um 5 %.

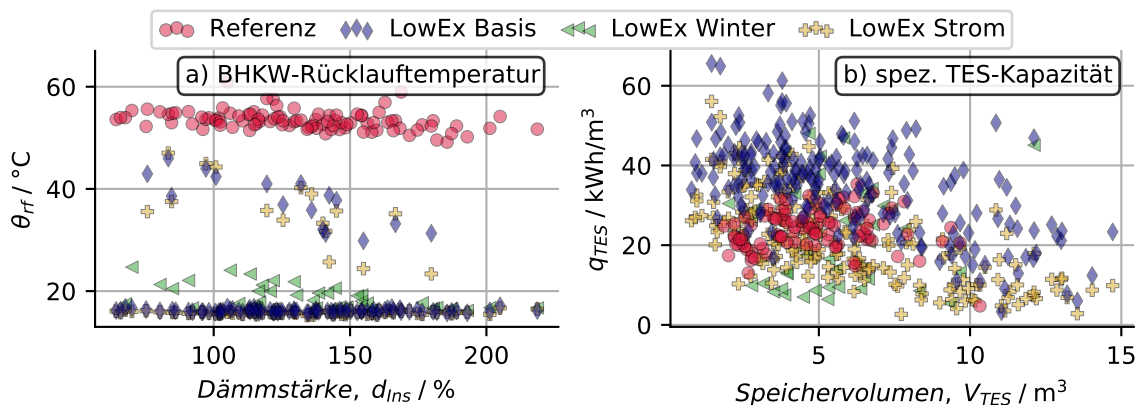
Das System LowEx Strom wird stromgeführt betrieben. Es nutzt die verfügbare Flexibilität der LowEx-Systeme, um zu den Zeiten betrieben zu werden, zu denen der Ertrag am höchsten ist. Prognosefehler des Wärmebedarfs sowie die rein wirtschaftliche Kostenfunktion der modellprädiktiven Regelung können zu häufigen Abschaltungen führen. Dies reduziert den Gesamtwirkungsgrad. Eine Adaption des Reglers an gebäudespezifische Verbrauchsmuster und eine weniger strikte Kostenfunktion des Reglers könnten hier Abhilfe schaffen. Dennoch liegt der Wirkungsgrad aufgrund der niedrigen Rücklauftemperaturen in etwa auf der Höhe des Referenzsystems, wie die anschließende Auswertung in Abschnitt 5.5 zeigt.



**Abbildung 5.19:** Betriebscharakteristik des Referenzsystems, des LowEx Basis Systems und des LowEx Strom Systems – linke Spalte: Leistungen; rechte Spalte: Speicherinhalt und Temperaturen des BHKWs

**Rücklauftemperatur und Speicherkapazität** Die Rücklauftemperaturen zum BHKW der simulierten Anlagentypen sind in Abb. 5.20 a) in Abhängigkeit vom Dämmstandard abgebildet. Die Temperaturen sind anhand des Kapazitätsstroms gemittelt. Das heißt, dass die mittlere Temperatur im Simulationszeitfenster bei der Berechnung anhand des Massenstroms und der Wärmekapazität gewichtet wird, um eine Bewertung proportional zum Einfluss zu erlauben. Der Median der Temperaturen der simulierten Anlagen beträgt beim Referenzsystem 53 °C, bei LowEx Basis 16 °C, bei LowEx Strom 16 °C und bei LowEx Winter 18 °C. Eine invers proportionale Abhängigkeit von der Dämmstärke ist beim Referenzsystem erkennbar. Bei den LowEx-Systemen zeigen nur die höheren Werte, diese gehören zu den  $r_{conf} = 1$ -Konfigurationen mit einem Rücklaufanschluss, eine abnehmende Tendenz. Bei mehreren Anschlüssen werden höhere Temperaturen separat aus dem Speicher entnommen. Messwerte aus dem Feldtest und vorangegangenen Untersuchungen werden damit durch die Simulation bestätigt.

Die spezifische Wärmekapazität des TES in Abb. 5.20 b) wird anhand der Differenz zwischen maximalem und minimalem Beladezustand ermittelt. Das LowEx Basis System erreicht mit bis zu  $65 \text{ kWh/m}^3$  die höchsten Werte, der Median beträgt  $37 \text{ kWh/m}^3$ . Das Referenzsystem erreicht einen Median von  $24 \text{ kWh/m}^3$ . Die Systeme LowEx Strom und Winter nutzen die durch das LowEx-System verfügbare Kapazität aktiv zur Lastverschiebung. Der TES wird folglich nie vollständig entladen oder beladen. Die abgebildete Kapazität fällt mit ca.  $22 \text{ kWh/m}^3$  gering aus. Weiterhin sinkt die spezifische Kapazität mit dem Volumen des TES. Dies ist nur zu einem sehr geringen Anteil auf Effekte wie höhere Wärmeverluste zurückzuführen. Viel mehr spielt die in Abschnitt 5.4.3 festgelegte Abhängigkeit der TES-Größe von der Wohnfläche und dem damit einhergehenden höheren Wärmebedarf eine Rolle.

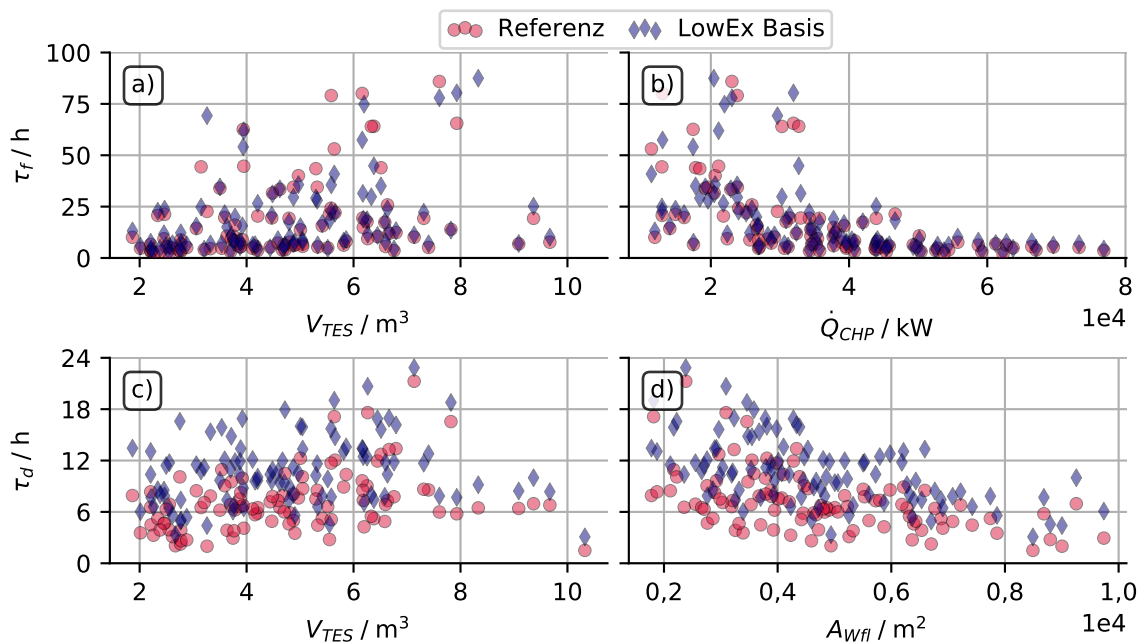


**Abbildung 5.20:** Simulationsergebnisse der a) BHKW-Rücklauftemperatur in Abhängigkeit von der Dämmstärke; b) spezifische TES-Kapazität in Abhängigkeit vom Speichervolumen

**Flexibilität** Die aus den Simulationen berechneten Flexibilitäten für das Referenzsystem und das LowEx Basis System sind in Abb. 5.21 dargestellt. Als Haupteinflussfaktoren konnten bei der erzwungenen Flexibilität die TES-Größe und die BHKW-Leistung ausgemacht werden. Dieser Zusammenhang ist in der oberen Reihe der Abbildung aufgeführt. Eine Tendenz zu höheren Flexibilitäten ist bei abnehmender thermischer BHKW-Leistung zu erkennen. Je näher die Leistung des BHKWs am durchschnittlichen Wärmebedarf des Gebäudes liegt, desto höhere verzögerte Flexibilitäten werden erreicht. Der Einfluss des TES-Volumens wird von der Interaktion mit der BHKW-Leistung, der Wohnfläche und des Dämmstandards überlagert. Eine Analyse der Werte lässt die Abschätzung zu, dass die erzwungene Flexibilität mit dem Volumen zunimmt. Unterschiede zwischen den Systemen sind nicht zu erkennen. Um diese Details hervorzuheben, ist eine statistische Analyse notwendig.

Die verzögerte Flexibilität in der unteren Reihe der Abbildung zeigt ebenfalls eine Abhängigkeit von der TES-Größe bei einem enger begrenzten Wertebereich. Als zweite interagierende Variable wird die Wohnfläche gewählt, da diese eine hohe Korrelation mit der Flexibilität aufweist. Mit steigender Wohnfläche nimmt der Wärmebedarf des Gebäudes zu. Die im TES gespeicherte Wärme wird in kürzerer Zeit entnommen. Folglich sinkt die verzögerte Flexibilität. Zudem zeigt  $\tau_d$  Unterschiede bezüglich des Anlagensystems. Mit dem Referenzsystem kann die Last im Median um 6,7 h verschoben werden. Das LowEx Basis System erreicht diesbezüglich eine zusätzliche Verschiebung um weitere 3,5 h.

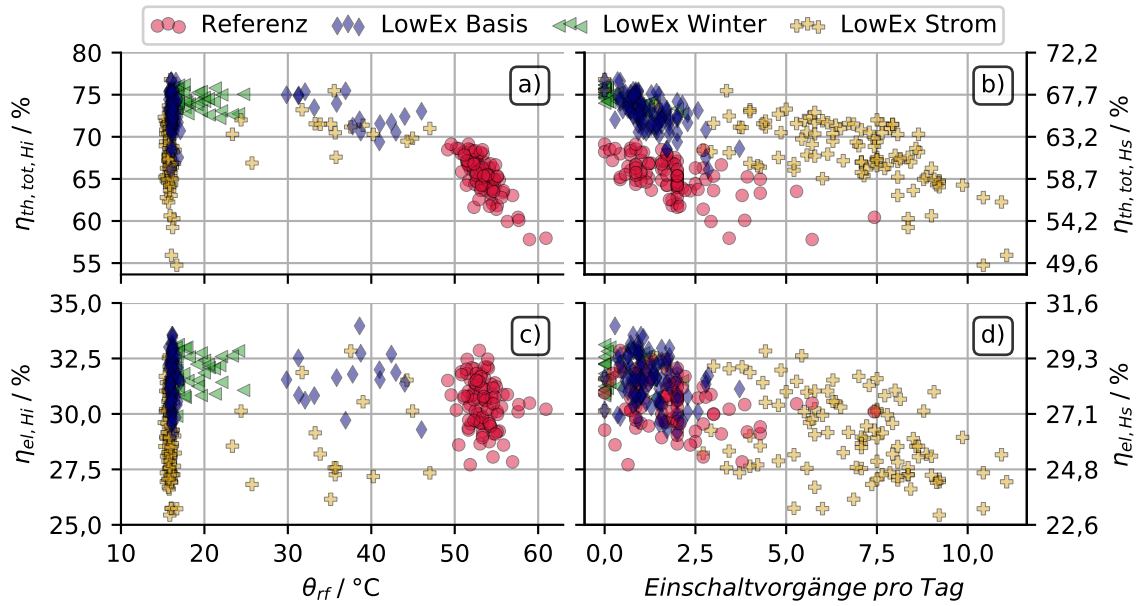




**Abbildung 5.21:** Flexibilität des Referenzsystems und des LowEx Basis Systems in Abhängigkeit – a) und c) vom Speichervolumen; b) von der BHKW-Leistung; d) von der Wohnfläche

**Wirkungsgrad des Blockheizkraftwerks** Der Wirkungsgrad der simulierten BHKWs wird anhand von Abb. 5.22 für alle vier Anlagentypen ausgewertet. In der oberen Reihe ist die thermische Gesamteffizienz des BHKWs, das heißt mit Abgas-Wärmeübertrager, aufgetragen. Diese zeigt tendenziell eine starke Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur, übereinstimmend mit der Analyse der Messdaten in Abschnitt 4.2.3. Das Referenzsystem hat eine den hohen Rücklauftemperaturen von über  $50^\circ C$  entsprechende geringe thermische Effizienz von ca. 65 % bezüglich des Heizwerts, während das LowEx Basis System 73 % erreicht. Die Effizienz des Systems LowEx Strom kann hingegen nicht in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben werden. Hier überwiegt, wie in Abb. 5.22 b) verdeutlicht, der Einfluss der vielen Schaltvorgänge. Bei jedem Schaltvorgang geht während des An- und Abschaltens des BHKWs Energie in Aufheizvorgänge verloren. Dieser Effekt wird umso stärker, je kürzer die Betriebszeit des BHKWs in Relation zur Anzahl der Schaltvorgänge ist. Es muss abgewogen werden, bis zu welchem Maß eine erhöhte Eigennutzung des produzierten Stroms den Effizienzverlust durch viele Schaltvorgänge ausgleicht. In der aktuellen Konfiguration des Reglers mit Fokus auf eine hohe Eigennutzung liegt der thermische Wirkungsgrad bei ca. 68 %. Eine Reduktion der Schaltvorgänge scheint sinnvoll. Im Gegensatz dazu zeigt der Winterbetrieb der LowEx Anlage aufgrund des konstanten Betriebs mit durchschnittlich 0,6 Schaltvorgängen pro Tag sowie niedrigen Rücklauftemperaturen Wirkungsgrade, die mit dem Basis System vergleichbar sind.

In der unteren Reihe von Abb. 5.22 ist die elektrische Effizienz dargestellt. Der Einfluss der Schaltvorgänge kann bestätigt werden. Ein eindeutiger Einfluss der Rücklauftemperatur ist nicht auszumachen. Im Gegensatz zur thermischen Effizienz erlaubt der direkte Anlagenvergleich keine Gruppierung der Werte. Tendenziell hat jedoch das LowEx Strom System aufgrund der hohen Schaltzahlen den niedrigsten elektrischen Wirkungsgrad mit durchschnittlich 29 %. Das Referenzsystem liegt mit 30 % etwas höher, während LowEx Basis und LowEx Winter im Mittel ca. 32 % erreichen.



**Abbildung 5.22:** Thermische und elektrische Wirkungsgrade der simulierten Anlagen in Abhängigkeit von – a) und c) der Rücklauftemperatur; b) und d) den Einschaltvorgängen

Werden die elektrischen Effizienzen der Simulationen mit den in Abschnitt 4.2.3 gemessenen Werten verglichen, so kann festgestellt werden, dass die in der Simulation verwendeten Polynome zur Abbildung der An- und Abschaltvorgänge in guter Übereinstimmung mit den Messdaten sind.

## 6 Statistisches Modell

Unter Verwendung der Simulationsergebnisse werden in diesem Kapitel statistische Modelle gebildet. Diese erlauben eine detaillierte Betrachtung des Einflusses aller Parameter. Es soll hervorgehoben werden, welche Parameter die höchste Wichtigkeit für die einzelnen Zielgrößen haben. Weiterhin soll der Einfluss des Anlagentyps weitgehend unabhängig von den restlichen Parametern beurteilt werden. Optima der Anlagenkonfiguration sollen gefunden und verglichen werden.

Die Methodik der Erstellung der statistischen Modelle wird in Abschnitt 6.1 vorgestellt. Die Modelle werden anhand gängiger Kennzahlen evaluiert. Eine globale und lokale Sensitivitätsanalyse der Modelle bezüglich der unabhängigen Variablen wird in Abschnitt 6.2 durchgeführt. Im Anschluss werden in Abschnitt 6.3 die wichtigsten Parameter verwendet, um für eine Vielzahl an unterschiedlichen Randbedingungen diejenigen Anlagenkonfigurationen zu identifizieren, welche die Zielgrößen optimieren. Die optimalen Konfigurationen werden diskutiert und Vergleiche zwischen den Anlagentypen gezogen.

### 6.1 Regressionsmodelle

Es werden fünf getrennte Regressionsmodelle bezüglich der folgenden abhängigen Variablen erstellt:

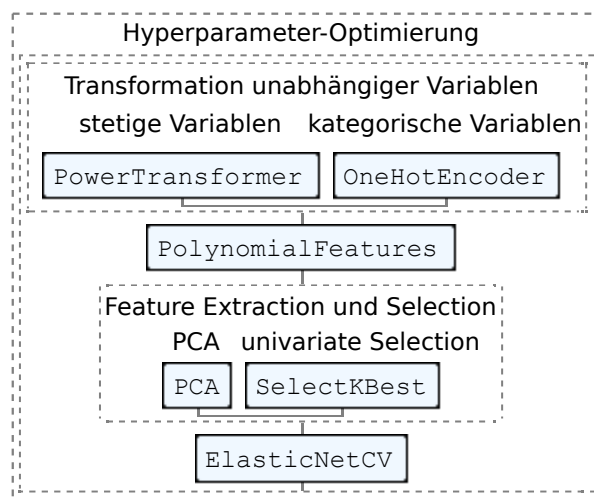
- Flexibilität erzwungen,  $\tau_f$  in h
- Flexibilität verzögert,  $\tau_d$  in h
- Bruttoertrag,  $B$  in €/d
- PE-Einsparung,  $Q_{P,red}$  in %, multivariat, 28 EU-Staaten, Strommix mit und ohne Nuklearenergie
- Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen,  $m_{CO_2,red}$  in %, multivariat, 28 EU-Staaten, Strommix mit und ohne Nuklearenergie

Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf der mittels Anlagentechnik erreichbaren Flexibilität. Eine detaillierte Erläuterung der Ziele der Auswertung und der getroffenen Einschränkungen wird in Abschnitt 5.4.1 diskutiert. Für die Flexibilitäten und die Bruttoerträge werden multiple Regressionen berechnet. Die PE-Einsparung und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen werden für jeweils 28 Länder und die EU mit und ohne Nuklearstrom im Strommix nach dem Displacement Mix berechnet. Zudem werden der aktuelle CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Bundesdeutschen Strommix sowie die PE-Faktoren nach EnEV betrachtet. Es ergeben sich somit je 59 Zielgrößen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Berechnungsverfahren werden diese Zielgrößen zusammengefasst in multivariaten multiplen Regressionsmodellen betrachtet.

### 6.1.1 Methodik

Für jede der abhängigen Variablen wird eine multiple lineare Regression berechnet. Dafür wird das Paket „scikit-learn“ verwendet [115].

Der Ablaufplan zur Berechnung der statistischen Modelle ist in Abb. 6.1 dargestellt. Eine Hyperparameteroptimierung mit Kreuzvalidierung umschließt alle folgenden Schritte. Zuerst werden die stetigen unabhängigen Variablen mittels Box-Cox-Transformation transformiert, um die Normalität der Daten zu steigern und die Varianz zu stabilisieren. Anschließend werden die Daten durch Subtraktion des Mittelwerts und Division mit der Varianz standardisiert. Die kategorischen Variablen, der Anlagentypidentifikator und die Rücklaufkonfiguration mit insgesamt sieben Kategorien, werden über One-Hot-Encoding ohne Definition einer Referenzkategorie transformiert. Es resultieren sieben kodierte kategorische und sieben stetige Parameter. Anschließend werden alle 14 Parameter mittels Polynomtransformation in ein Polynom zweiten Grades mit Interaktionstermen überführt. Die Design-Matrix hat zu diesem Zeitpunkt  $P = 120$  Terme.



**Abbildung 6.1:** Ablaufplan der Regression in scikit-learn – Hyperparameteroptimierung, Variablentransformation, Polynomtransformation, Feature Extraction und Selection zur Reduktion der Dimensionalität und anschließende lineare Regression mit Kreuzvalidierung

Die anschließende Feature Extraction und Selection sowie das lineare Modell sind Teil einer Hyperparameteroptimierung und können daher nicht einheitlich für alle berechneten statistischen Modelle angegeben werden. Am Beispiel der verzögerten Flexibilität soll daher der weitere Ablauf aufgezeigt werden. Eine Hauptkomponentenanalyse extrahiert  $P = 69$  Linearkombinationen der Polynomterme. Parallel dazu werden über eine univariate Selektion drei zusätzliche Terme selektiert. Damit gehen in das lineare Modell, hier ein ElasticNet mit Kreuzvalidierung, 72 Parameter ein. Die Mischung aus  $\ell_1$ - und  $\ell_2$ -Regularisierung selektiert hiervon  $P = 65$  endgültige Parameter. Die Entwicklung der Parameteranzahl innerhalb des Ablaufplans des Modells ist in Tabelle 6.1 am Beispiel der verzögerten Flexibilität zusammengefasst.

Die Verwendung von linearen Modellen zur Regression bietet sich bei den hier vorliegenden Zielgrößen an. Kontinuierliche Werteverläufe ohne Wertesprünge sowie die vermuteten, näherungsweise linearen, funktionalen Zusammenhänge der Grundwahrheiten stellen eine gute Basis für die Anwendung linearer Modelle dar.

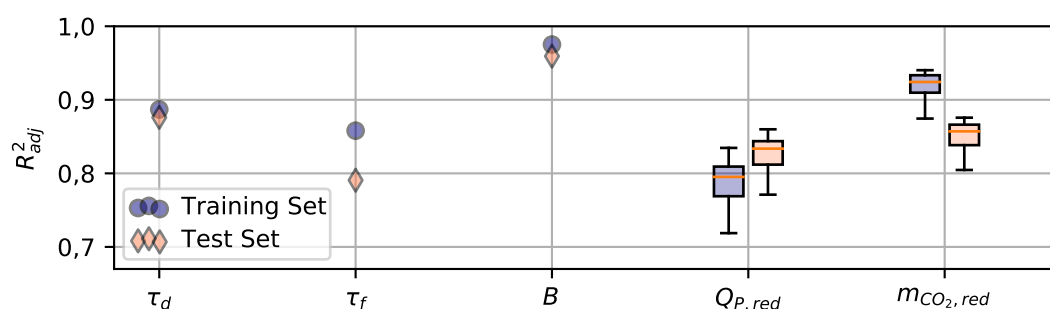
**Tabelle 6.1:** Ablaufplan der Regression – Entwicklung der Parameterzahl im statistischen Modell am Beispiel der verzögerten Flexibilität (PCA: Hauptkomponentenanalyse)

Schritt Sub-Schritt	Variablentransf. stetige	Polynomtransf. kateg.	Polynomtransf. -	Feat. Extraction/Selection PCA	Lin. Modell univariate Selektion	Lin. Modell -
$P_{in}$	7	2	14	120	120	72
$P_{out}$	7	5	120	69	3	65

### 6.1.2 Evaluation der statistischen Modelle

Die statistischen Modelle werden anhand des adjustierten Determinationskoeffizienten  $R_{adj}^2$  evaluiert. Dieser bewertet die erklärbare Varianz eines Modells in Abhängigkeit von der Parameteranzahl und der Größe des Trainings- beziehungsweise Test-Datensätze. Die Größe der Test-Datensätze liegt im Bereich von 23 % bis 29 % der Grundgesamtheit.

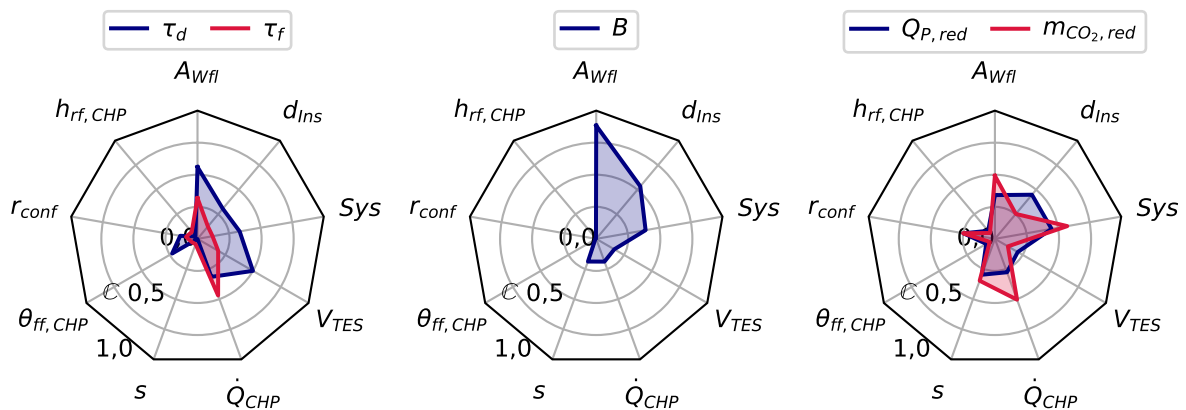
Abb. 6.2 zeigt  $R_{adj}^2$  für die Trainings- und Test-Datensätze aller fünf Modelle. Die Werteverteilungen der multivariaten Modelle sind als Boxplot dargestellt. Die Differenz des adjustierten Determinationskoeffizienten der Trainings- und Test-Daten ist so gering, dass eine Überanpassung der Modelle unwahrscheinlich ist. Weiterhin sind die Werte der Test-Datensätze groß genug, um von einer hohen Qualität der Regressionsmodelle ausgehen zu können. Darüber hinaus betreffen die Minimalwerte der Test-Datensätze der PE-Einsparung ausschließlich Länder mit sehr hohen PE-Faktoren wie Rumänien oder Bulgarien, die in der weiteren Auswertung nur von untergeordnetem Interesse sind.

**Abbildung 6.2:** Adjustierte Determinationskoeffizienten der Regressionsmodelle; für multivariate Regressionsmodelle werden die Verteilungen der Werte als Boxplot gezeigt

Einen ersten Überblick über die Haupteinflussfaktoren der jeweiligen Zielgrößen bieten die partiellen paarweisen Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten. Hierbei wird bei der Berechnung der Korrelation zwischen zwei Variablen, zum Beispiel zwischen  $\tau_f$  und  $V_{TES}$ , der Einfluss der restlichen Einflussfaktoren soweit wie möglich herausgerechnet. Im Vergleich zu einfachen Korrelationen können Störfaktoren somit großteils ausgeblendet werden. Die Berechnung erfolgt anhand tabellarischer Daten. Transformationen und mittels Regressionsanalyse gefundene Zusammenhänge fließen nicht ein. Höhergradige Effekte und Interaktionen werden nicht abgebildet.

Die Absolutwerte der Korrelationskoeffizienten nach dieser Methode sind in Abb. 6.3 zwischen allen fünf abhängigen und den unabhängigen Variablen dargestellt. Die Werte der PE-Einsparung und Reduktion der  $CO_2$ -Emissionen sind eine Zusammenfassung der jeweils 59 Zielgrößen. Die Höhe der Rücklaufanschlüsse, die Konfiguration derer und die Vorlauftemperatur des BHKWs scheinen einen

vernachlässigbaren Einfluss auf alle unabhängige Variablen zu haben. Die Randbedingungen hingegen, die Wohnfläche und die Dämmstärke, zeigen durchweg eine mittelgradige bis starke Korrelation. Von den Parametern, die keine Randbedingungen sind, haben das Anlagensystems, die Speichergröße und die BHKW-Leistung den größten Effekt. Das Anlagensystem zeigt insbesondere auf den PE-Verbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen einen hohen Einfluss mit einem maximalen Korrelationskoeffizient von 0,57. Die Maxima der Speichergröße und BHKW-Leistung liegen bei 0,5. Während die Stromkennzahl keinerlei Einfluss auf die Flexibilität zeigt, ist die Korrelation mit den Bruttoerträgen gering sowie mittelgradig mit der Reduktion des PE-Verbrauchs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine genauere Auswertung der Einflussfaktoren auf die jeweiligen Zielgrößen soll in Abschnitt 6.2 erfolgen.



**Abbildung 6.3:** Absolutwerte der partiellen paarweisen Spearman-Rangkorrelation zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen

## 6.2 Sensitivitätsanalyse

Mittels einer Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss von Eingangsparametern auf die von statistischen Modellen vorhergesagten Werte ermittelt werden. Je nach verwendeter Methode kann nicht nur der Betrag des Einflusses, das heißt die globale Wichtigkeit eines Parameters, ermittelt werden, sondern auch die Richtung des Einflusses sowie Interaktionen zwischen den Parametern [120], [121]. Eine lokale Analyse der Sensitivitäten erlaubt eine differenzierte Untersuchung des Einflusses eines Parameters innerhalb des Wertebereiches. Heterogenitäten können untersucht werden [122], [124].

Die statistischen Modelle sollen in Abschnitt 6.2.1 zuerst bezüglich globaler Sensitivitäten untersucht werden. Die lokalen Sensitivitäten innerhalb der Wertebereiche der wichtigsten Parameter werden in Abschnitt 6.2.2 analysiert.

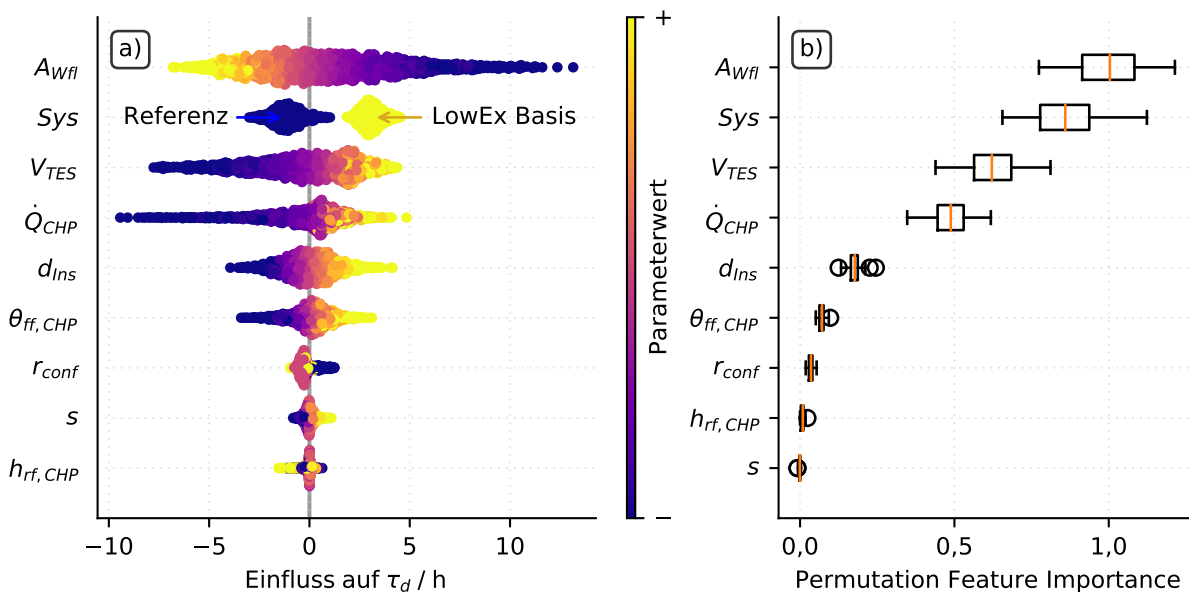
Die Sensitivität der Regressionsmodelle wird für die verzögerte und erzwungene Flexibilität sowie die Bruttoerträge einzeln im Detail ausgewertet. Bezüglich der PE-Einsparung und der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen, beides multivariate multiple Regressionsmodelle mit jeweils 59 Zielgrößen, wird die Auswertung zusammengefasst und repräsentativ anhand der mittleren Sensitivität der PE-Einsparung analysiert. Dies ist insofern vertretbar, als dass die Berechnungsmethodik für alle PE-Verbräuche sowie alle CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Abschnitt 2.6 dieselbe ist und die Regressionsmodelle daher nur quantitative Unterschiede aufweisen.

### 6.2.1 Globale Sensitivitätsanalyse

Bei der globalen Sensitivitätsanalyse kommen die Methodiken der SHAP-Werte nach Abschnitt 3.3.3.1 und der Permutation Feature Importance, erläutert in Abschnitt 3.3.3.2, zum Einsatz. Beide Methoden erlauben es, die Wichtigkeit der Eingangsparameter nach Betrag und Verteilung zu bewerten. Mittels der SHAP-Werte kann weiterhin das Vorzeichen des Einflusses sowie der Einfluss einzelner Stichproben dargestellt werden. Zur Bewertung der Stärke der Interaktionen in Relation zum totalen Einfluss der Parameter wird zusätzlich eine Sobol-Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

#### 6.2.1.1 Verzögerte Flexibilität

Die berechneten SHAP-Werte sind in Abb. 6.4 a) für alle unabhängigen Variablen aufgeführt. Die Sortierung erfolgt von oben absteigend anhand des mittleren Einflusses der Variablen auf die verzögerte Flexibilität. Auf der Abszisse ist der Einfluss der Parameter auf die Zielgröße aufgezeigt. Die Farbskalierung beschreibt den Eingangswert der jeweiligen Parameter. Der Boxplot der Permutation Feature Importance in Abb. 6.4 b) zeigt den dimensionslosen Einfluss der einzelnen Parameter auf die abhängige Variable.



**Abbildung 6.4:** Globale Sensitivitätsanalyse verzögerte Flexibilität – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet

Die RB Wohnfläche zeigt die höchste Sensitivität. Werden die restlichen Parameter konstant gehalten, sinkt die verzögerte Flexibilität mit zunehmender Wohnfläche. Da der Wärmebedarf eines Gebäudes, nach Gleichung (2.12) einer der wichtigsten Faktoren, nahezu linear mit der Wohnfläche skaliert, ist dies folgerichtig. Die RB Dämmstärke  $d_{Ins}$  beeinflusst ebenfalls den Wärmebedarf. Sie hat die fünfthöchste Sensitivität und zeigt einen linearen Zusammenhang mit der Flexibilität.

Der Anlagentyp *Sys* folgt an zweiter Stelle. Von den Einflussgrößen, die keine Randbedingung sind,

hat der Anlagentyp den größten Einfluss auf die verzögerte Flexibilität. Das LowEx Basis System zeigt, unabhängig von anderen Parametern, in jeder Konfiguration einen höheren und positiven Einfluss als das Referenzsystem. Im Mittel bewirkt das LowEx Basis System eine Steigerung von  $\tau_d + 3,1$  h, während für Referenzsystem  $\tau_d - 1,1$  h folgt. Das heißt, dass der Einsatz eines LowEx-TWE-Systems die Flexibilität gegenüber einem Referenzsystem um  $\Delta t = 4,2$  h steigert.

Der positive Zusammenhang zwischen Zielgröße und  $V_{TES}$  ist nachvollziehbar und bedarf keiner weiteren Erläuterung. Auch eine höhere Vorlauftemperatur des BHKWs steigert die Speicherkapazität und hat eine höhere Flexibilität zur Folge. Die BHKW-Leistung hingegen sollte nach dem Gleichungsmodell für die verzögerte Flexibilität keinen Einfluss haben. Dennoch liegt  $\dot{Q}_{CHP}$  an vierter Stelle der Sensitivität. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die BHKW-Leistung groß genug sein muss, um den TES auch während Spitzenlastphasen ausreichend beladen und im Anschluss Wärme aus dem Speicher bereitstellen zu können.

Die Stromkennzahl  $s$  bestimmt die elektrische Leistung des BHKWs in Abhängigkeit von  $\dot{Q}_{CHP}$ . Sie ist daher weder in der thermodynamischen Beschreibung der Flexibilität noch in der Erfassung aus den Simulationsdaten eingebunden. Der Einfluss auf die abhängige Variable ist nach SHAP-Werten sehr gering und nach Permutation Feature Importance vernachlässigbar. Die Größenordnung des Einflusses lässt einen Rückschluss auf eine Kreuzkorrelation mit anderen unabhängigen Variablen zu, nach Abb. 5.18 und dem inversen Zusammenhang der SHAP-Werten vorrangig mit  $h_{ff,CHP}$ . Weiterhin zeigen auch die Parameter  $r_{conf}$  und  $h_{ff,CHP}$  eine vernachlässigbare Sensitivität.

Wird die Sensitivität mittels Sobol-Methode analysiert, sind geringe Abweichungen gegenüber der vorigen Methoden zu finden. Die Werte in Tabelle 6.2 zeigen, dass die Sensitivität erster Ordnung  $S_1$ , das heißt der Einfluss jeder einzelnen unabhängigen Variable auf die Varianz der Zielgröße, nahezu der Rangordnung der SHAP-Werte folgt. Der Einfluss des Systems wird hier jedoch im Vergleich zu den vorigen Methoden unterbewertet. Auch der Einfluss der Dämmstärke wird geringer bewertet. Die niedrigen maximalen Interaktionseffekte  $S_2$  zwischen den unabhängigen Variablen von höchstens 0,029 lassen den Schluss zu, dass die einzelnen Variablen unabhängig voneinander optimiert werden können, um eine maximale Flexibilität zu erreichen.  $S_1$  unter Einbezug aller  $S_2$  ergibt den Gesamteffekt  $S_{tot}$  aller Einflussgrößen. Das angegebene 95 %-Konfidenzintervall ist bei allen Parametern in Relation zu den Werten schmal. Es gibt dementsprechend nur geringe Abweichungen der Sensitivitäten in den Wertebereichen.

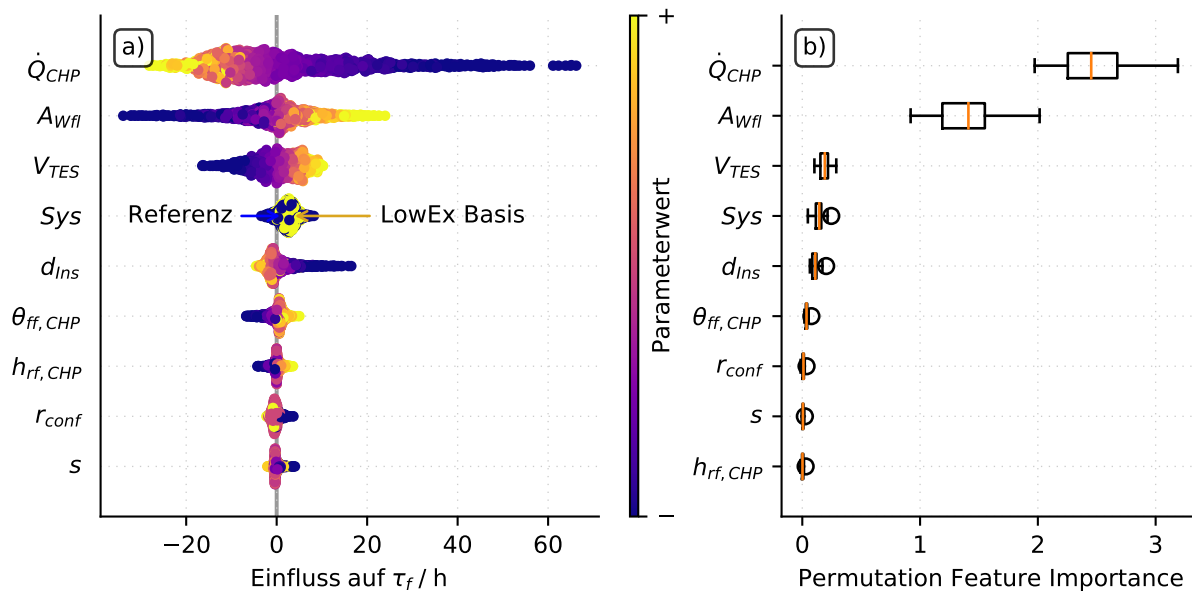
**Tabelle 6.2:** Globale Sensitivitätsanalyse verzögerte Flexibilität – Sensitivitäten nach Sobol-Methode mit 95 %-Konfidenzintervall  $CI$  des Totaleffekts

	$A_{Wfl}$	$V_{TES}$	$\dot{Q}_{CHP}$	$S_{sys}$	$\theta_{ff,CHP}$	$d_{Ins}$	$h_{ff,CHP}$	$r_{conf}$	$s$
$S_1$	0,362	0,239	0,092	0,084	0,048	0,057	0,001	0,002	0,002
$S_{2,max}$	0,020	0,029	0,029	0,009	0,011	0,009	0,003	0,004	0,002
$S_{tot}$	0,399	0,290	0,155	0,110	0,073	0,068	0,008	0,008	0,003
$CI S_{tot}$	0,014	0,012	0,008	0,004	0,003	0,002	0,000	0,000	0,000

### 6.2.1.2 Erzwungene Flexibilität

Abb. 6.5 a) zeigt die SHAP-Werte der erzwungenen Flexibilität nach Wichtigkeit der Parameter sortiert, Teilabbildung b) die zugehörige dimensionslose Permutation Feature Importance.





**Abbildung 6.5:** Globale Sensitivitätsanalyse erzwungene Flexibilität – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet

Die Wohnfläche und die Dämmstärke, die RB des Systems, sind die zweit- und fünftwichtigsten Parameter. Je höher der Wärmebedarf des Gebäudes ist, desto größer wird die verfügbare Flexibilität. Im Gegensatz zur verzögerten Flexibilität hat die BHKW-Leistung den größten mittleren sowie absoluten Einfluss. Mit sinkender Leistung steigt die Flexibilität überproportional an. Dies entspricht dem Zusammenhang, welcher der die Flexibilität beschreibenden Gleichung (2.13) zu entnehmen ist. Durch Verwendung eines großen TES, in Relation zu den in Tabelle 5.3 festgelegten Randbedingungen des Parametergitters wie der Wohnfläche und dem Dämmstandard, kann die Flexibilität um bis zu 11 h gesteigert werden. Der globale Einfluss der Anlagensysteme geht nicht ersichtlich aus Abb. 6.5 a) hervor. Eine detaillierte Analyse erfolgt im nächsten Abschnitt. Weiterhin ist die Flexibilität proportional zur Vorlauftemperatur. Bis zu  $\pm 5$  h Flexibilität können über die Einstellung der Temperatur erreicht werden. Die restlichen Einflussgrößen zeigen vernachlässigbare Effekte.

Dies wird auch durch die Permutation Feature Importance bestätigt. Anhand der dimensionslosen Kennzahlen ist zu erkennen, dass die Sensitivität gegenüber der wichtigsten beeinflussbaren unabhängigen Variablen ungefähr das dreifache dessen beträgt, was bezüglich der verzögerten Flexibilität gefunden werden kann. Vergleichbares folgt auch aus den SHAP-Werten. Die erzwungene Flexibilität ist folglich deutlich sensibler gegenüber der Dimensionierung der Anlagentechnik.

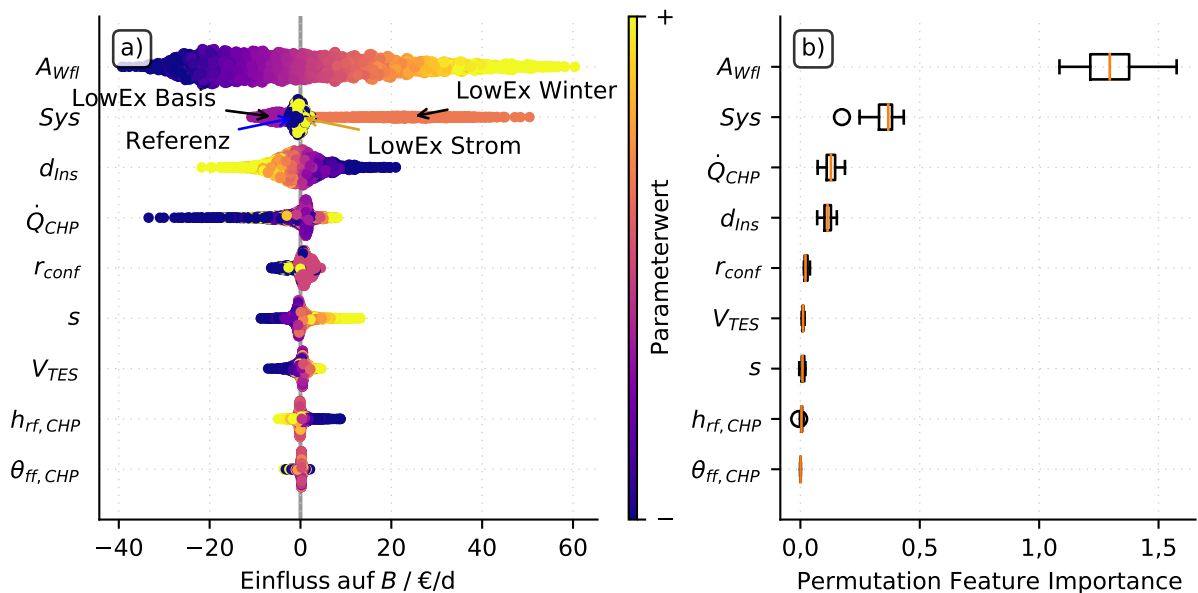
Aus der Analyse nach Sobol-Methode in Tabelle 6.3 folgt eine ähnliche Verteilung der wichtigsten unabhängigen Variablen. Der Einfluss der BHKW-Leistung wird in Relation zu den restlichen Parametern nochmals höher bewertet. Darüber hinaus deuten die  $S_2$ -Werte auf eine mittelgradige Interaktion zwischen Leistung und Wohnfläche hin. Auch bei den restlichen Parametern, ausgenommen der TES-Größe, überwiegt der Interaktionseffekt mit der Wohnfläche. Das heißt, dass eine Optimierung der erzwungenen Flexibilität immer unter Einbezug von Wohnfläche und Dämmstärke erfolgen muss. Nur die TES-Größe bietet eine weitgehend unabhängige Möglichkeit, die Flexibilität zu beeinflussen.

**Tabelle 6.3:** Globale Sensitivitätsanalyse erzwungene Flexibilität – Sensitivitäten Sobol-Methode mit 95%-Konfidenzintervall  $CI$  des Totaleffekts

	$\dot{Q}_{CHP}$	$A_{Wff}$	$V_{TES}$	$d_{Ins}$	$Sys$	$h_{rf,CHP}$	$\theta_{ff,CHP}$	$s$	$r_{conf}$
$S_1$	0,608	0,023	0,061	0,014	0,003	-0,001	0,002	0,000	0,000
$S_{2,max}$	0,219	0,219	0,004	0,016	0,006	0,011	0,006	0,006	0,006
$S_{tot}$	0,859	0,265	0,073	0,042	0,016	0,015	0,012	0,006	0,004
$CI S_{tot}$	0,030	0,013	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000

### 6.2.1.3 Bruttoertrag

Die globale Sensitivität der täglichen Bruttoerträge wird in Abb. 6.6 ausgewertet. Die SHAP-Werte in Teil a) und die Permutation Feature Importance in Teil b) verdeutlichen, dass die Wohnfläche und Dämmstärke einen hohen Einfluss haben. Mit steigendem Energieverbrauch des Gebäudes kann mehr Wärme und Strom produziert und verkauft werden.



**Abbildung 6.6:** Globale Sensitivitätsanalyse Bruttoertrag – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet

Das Anlagensystem ist bezüglich der Bruttoerträge nach SHAP-Werten die wichtigste unabhängige Variable, die keine RB ist. Im Winter erreicht das BHKW aufgrund des hohen Wärmebedarfs viele Betriebsstunden. Der Verkauf von Strom und Wärme hat hohe Erlöse zur Folge. Würde der Betriebsfall im Winter nicht betrachtet werden, hätte das Anlagensystem die dritthöchste Sensitivität. Das Referenzsystem und das System LowEx Strom haben in etwa den gleichen Einfluss auf die Bruttoerträge. Das LowEx Basis System resultiert nach SHAP-Werten tendenziell in geringeren Bruttoerträgen. Dass dieser Trend im statistischen Modell selbst nicht beobachtet werden kann und nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht, soll in Abschnitt 6.3.2 erläutert werden.

Die SHAP-Werte der BHKW-Leistung zeigen keinen eindeutigen Trend. Dennoch hat diese einen nicht

vernachlässigbaren Einfluss. Dies spricht für eine starke Interaktion mit mindestens einem weiteren Parameter. Weiterhin scheinen ein großes Speichervolumen und eine hohe Stromkennzahl, das heißt je Einheit Wärme wird mehr Strom produziert und verkauft, die Bruttoerträge positiv zu beeinflussen. Im Gegensatz zur Flexibilität ist die Konfiguration der Rücklauf-Anschlüsse nach beiden Rankings relevant. Die restlichen Parameter zeigen einen geringen Einfluss.

Die Sobol-Methode zur Sensitivitätsanalyse in Tabelle 6.4 beschreibt vergleichbare Sensitivitäten. Der im Vergleich zum Totaleffekt geringe Haupteffekt von  $\dot{Q}_{CHP}$  bestätigt, dass der Einfluss der BHKW-Leistung primär durch Interaktionen bestimmt wird. Hauptinteraktionsfaktoren sind der Anlagentyp und die Wohnfläche. Das heißt, dass der Einfluss der BHKW-Leistung auf den Bruttoertrag maßgeblich vom Anlagentyp und der Wohnfläche bestimmt wird.

**Tabelle 6.4:** Globale Sensitivitätsanalyse Bruttoertrag – Sensitivitäten nach Sobol-Methode mit 95 %-Konfidenzintervall  $CI$  des Totaleffekts

	$A_{Wfl}$	$S_{ys}$	$d_{Ins}$	$\dot{Q}_{CHP}$	$s$	$r_{conf}$	$h_{ff,CHP}$	$V_{TES}$	$\theta_{ff,CHP}$
$S_1$	0,609	0,163	0,073	0,023	0,009	0,004	0,001	0,002	0,001
$S_{2,max}$	0,016	0,043	0,012	0,043	0,008	0,005	0,006	0,003	0,003
$S_{tot}$	0,639	0,250	0,096	0,083	0,020	0,012	0,011	0,008	0,002
$CI S_{tot}$	0,019	0,010	0,004	0,005	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000

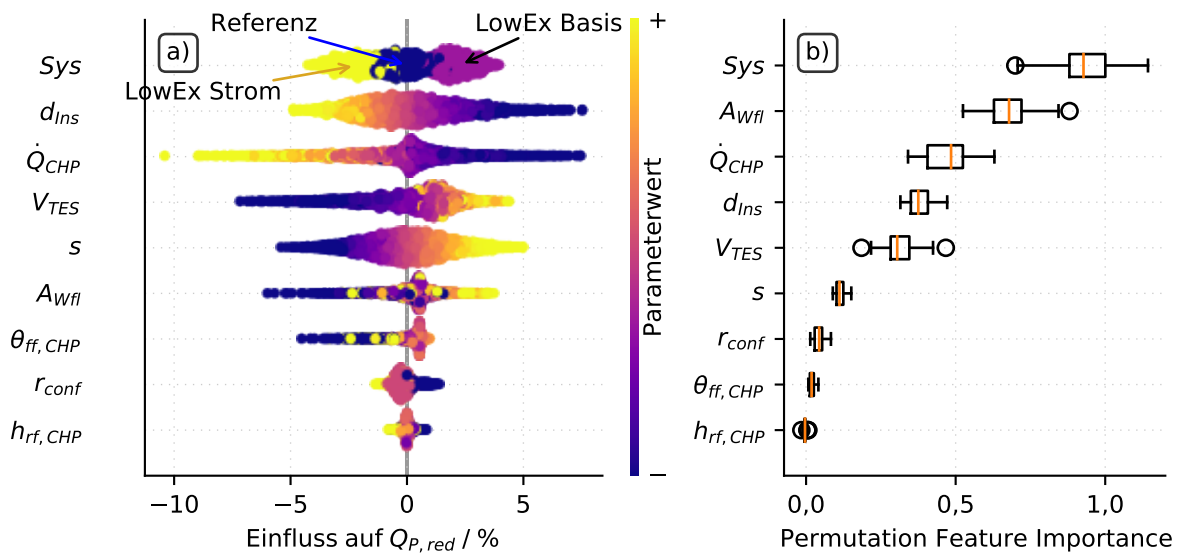
#### 6.2.1.4 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emission

Die globale Sensitivität der PE-Einsparung und der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigt für alle jeweils 59 Zielgrößen aufgrund des gleichen Berechnungsverfahrens keine relevanten qualitativen Unterschiede. Das heißt, dass Wichtigkeit, Vorzeichen und Art des Einflusses der einzelnen Einflussgrößen für alle Zielgrößen ähnlich sind. Die Beträge der Sensitivitäten zeigen hingegen Unterschiede. Die globale Sensitivität wird daher repräsentativ anhand der mittleren SHAP-Werte der Reduktion der länderspezifischen PE-Verbräuche in Abb. 6.7 a) sowie der Permutation Feature Importance des PE-Verbrauchs in Teilabbildung b) analysiert. Die Reduktion  $Q_{P,red}$  wird in Relation zu einer Anlage berechnet, die den gesamten benötigten Strom aus dem Netz bezieht. Höhere Werte bedeuten eine Verbesserung.

Die SHAP-Werte und die Permutation Feature Importance in Abb. 6.7 zeigen auf, dass das Anlagensystem im Mittel den größten Einfluss auf den PE-Bedarf hat. Aus den SHAP-Werten geht hervor, dass die Auswirkung durch Einsatz des Referenzsystems tendenziell neutral ist, während das wärmegeführte LowEx Basis System eine Reduktion bewirkt. Das System LowEx Strom hingegen bewirkt einen um bis zu 4 % höheren PE-Bedarf. Dies ist, wie in Abschnitt 5.5 analysiert, auf die hohe Anzahl an Schaltvorgängen zurückzuführen. Diese könnten durch eine weiterführende Optimierung der Regelung bei einem vernachlässigbaren Rückgang der Erträge reduziert werden.

Weiterhin ist der Umfang der möglichen Reduktion des PE-Verbrauchs durch Einsatz einer neuen Anlagentechnik nach den SHAP-Werten umso größer, je größer die Wohnfläche und je geringer die Dämmung eines Gebäudes ist. Das heißt, dass die Reduktion in Relation zur Gebäudegröße bei höherem Wärmebedarf höher ausfällt, da mehr Strom produziert und über den Verdrängungsstrommix gutgeschrieben werden kann.

Die BHKW-Leistung  $\dot{Q}_{CHP}$  zeigt die größte Bandbreite an SHAP-Werten. Je kleiner das BHKW ist,



**Abbildung 6.7:** Globale Sensitivitätsanalyse der Reduktion des PE-Verbrauchs – a) SHAP-Werte; b) Permutation Feature Importance; jeweils nach Sensitivität geordnet

desto mehr PE kann eingespart werden. Dieser Zusammenhang hängt unter anderem von der Wohnfläche und Dämmstärke ab. Im Gegensatz dazu steigt die PE-Einsparung mit dem Speichervolumen und der Stromkennzahl. Diese sind bei der SHAP-Analyse auf dem vierten und fünften Rang, bei der Permutation Feature Importance jeweils einen Rang weiter hinten.

Die Wohnfläche ist bei der Permutation Feature Importance der zweitwichtigste Parameter, bei den SHAP-Werten auf Rang sechs. Bis auf wenige Ausreißer kann mit zunehmender Wohnfläche mehr PE eingespart werden. Die verbliebenen Parameter sind in beiden Analysen vernachlässigbar.

Die Sobol-Analyse des multivariaten Regressionsmodells wird anhand PE-Einsparung einer in Deutschland stehenden Anlage bei Betrachtung eines Strommix ohne Nuklearenergie durchgeführt. Die resultierenden Sensitivitäten sind in Tabelle 6.5 aufgeführt. Die Wohnfläche und die Dämmstärke zeigen den größten Haupteffekt, während das System den größten Totaleffekt und hohe Interaktionseffekte hat. Eine Optimierung der Anlagentechnik erfordert folglich immer eine Anpassung der BHKW-Leistung und Speichergröße an das Anlagensystem und die Randbedingungen. Sonstige Interaktionen sind vernachlässigbar. Die vorangegangene Analyse der SHAP-Werte und Permutation Feature Importance wird mit leichten Abweichungen in der Rangfolge bestätigt.

**Tabelle 6.5:** Globale Sensitivitätsanalyse der Reduktion des PE-Verbrauchs – Sensitivitäten nach Sobol-Methode mit 95 %-Konfidenzintervall  $CI$  des Totaleffekts

	$S_{ys}$	$A_{Wfl}$	$\dot{Q}_{CHP}$	$V_{TES}$	$d_{Ins}$	$s$	$\theta_{ff,CHP}$	$r_{conf}$	$h_{rf,CHP}$
$S_1$	0,119	0,150	0,081	0,121	0,145	0,047	0,013	0,008	0,013
$S_{2,max}$	0,054	0,054	0,051	0,031	0,015	0,014	0,009	0,015	0,021
$S_{tot}$	0,363	0,353	0,314	0,285	0,276	0,175	0,154	0,149	0,131
$CI S_{tot}$	0,015	0,013	0,013	0,013	0,014	0,009	0,011	0,010	0,009

### 6.2.2 Lokale Sensitivitätsanalyse

Die lokale Sensitivitätsanalyse wird erneut anhand der SHAP-Werte durchgeführt. Wird ein Parameter auf der Abszisse und der zugehörige SHAP-Wert auf der Ordinate aufgetragen, so kann der Einfluss des Parameters auf den Ausgabewert des statistischen Modells dargestellt werden. Ist die vertikale Streuung von SHAP-Werten für einen Wert auf der Abszisse schmal, so ist dieser Parameter in diesem Wertebereich zum größten Teil für den Einfluss auf die Zielvariable verantwortlich. Je größer die Streuung ist, desto stärker wirken Interaktionseffekte. Die Interaktionsvariable mit dem aussagekräftigsten Effekt ist je Parameter anhand einer Farbkarte aufgetragen.

Die Wertebereiche der dargestellten Sensitivitäten sind auf die Mittelwerte des verwendeten Parametergitters bezogen. Diese sind in Tabelle 5.3 aufgeführt. Eine Transposition in einen anderen Wertebereich hat eine Änderung der Beträge, jedoch nicht der Gesetzmäßigkeiten, zur Folge.

Am Beispiel von Abb. 6.8 e) erläutert bedeutet dies, dass bei thermischen BHKW-Leistungen von 50 kW bis 100 kW keine relevante Änderung des mittleren Einflusses auf die verzögerte Flexibilität zu verzeichnen ist. Die Interaktion der Speichergroße überlagert hier den Einfluss der BHKW-Leistung. Nur bei ausreichend großem Speicher können BHKWs über 50 kW die Flexibilität positiv beeinflussen. Im Gegenzug nimmt die Flexibilität unter 40 kW stark ab, die Interaktion hingegen zu. Diese Aussage ist auf den Wertebereich der anderen Parameter zu beziehen. Würden Wohnflächen über 10 000 m<sup>2</sup> betrachtet werden, wäre der Einfluss der Leistung in einem größeren Bereich positiv.

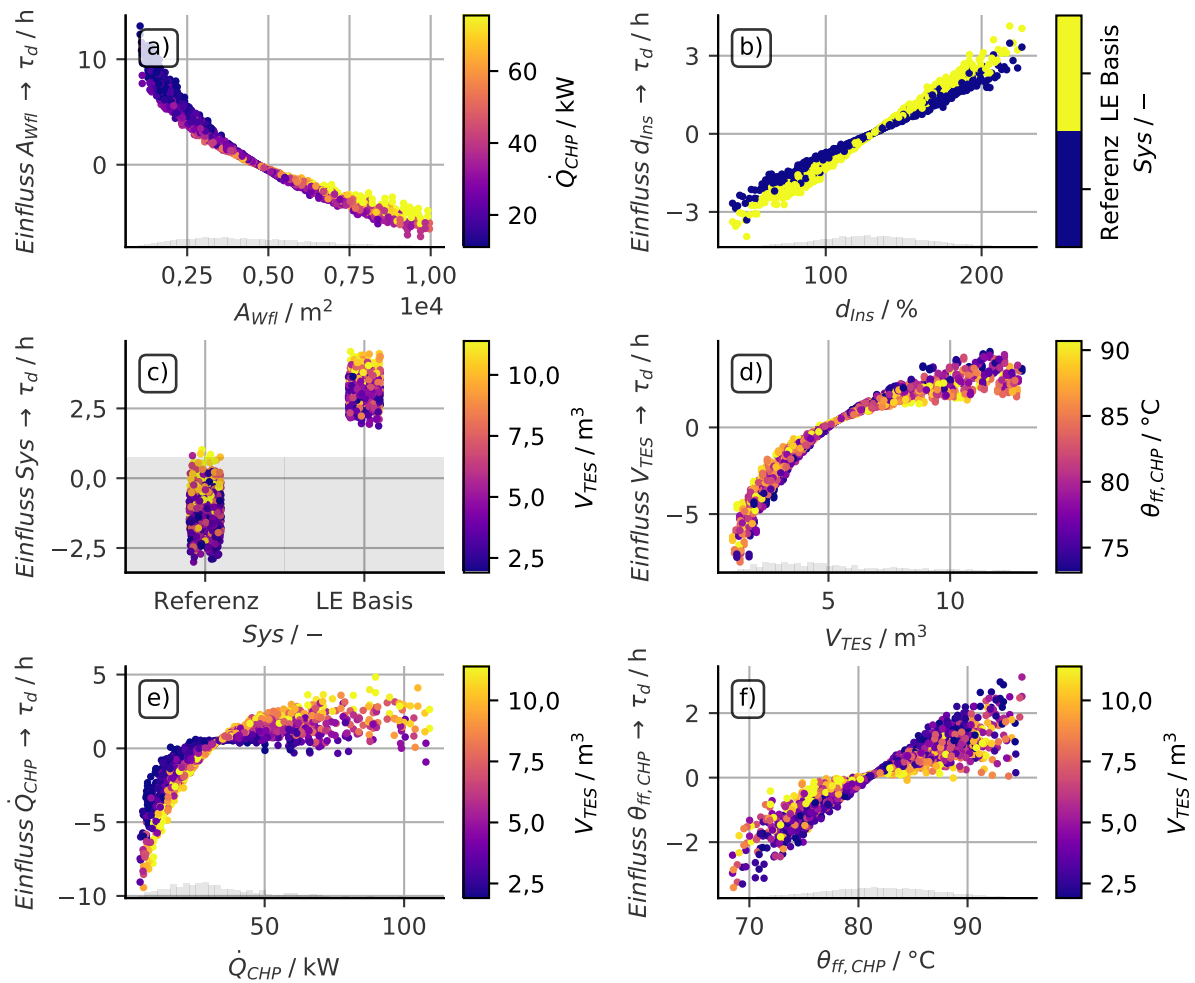
#### 6.2.2.1 Verzögerte Flexibilität

Eine Detailauswertung der lokalen Sensitivitäten der verzögerten Flexibilität ist in Abb. 6.8 aufgeführt. In jeder Teilabbildung wird der Einfluss einer unabhängigen Variable auf die verzögerte Flexibilität aufgezeigt, während die anderen Variablen konstant gehalten werden. Die Farbskalierung gibt Auskunft über die Werteverteilung einer interagierenden Variable. Es werden die sechs wichtigsten Parameter betrachtet.

Teil a) zeigt, dass der Einfluss der RB Wohnfläche invers unterproportional ist. Mit zunehmender Wohnfläche bei gleicher Anlagenkonfiguration nimmt die Flexibilität ab. Gleichzeitigkeitseffekte in großen Gebäuden sind für eine Abflachung der Kurve verantwortlich. Die BHKW-Leistung hat mit zunehmender Wohnfläche einen positiven Einfluss auf die Flexibilität. Bei zu geringer Leistung ist keine Flexibilität möglich. Die zweite RB, die Dämmstärke, in Teilabbildung b), hat einen linearen Einfluss. Die Interaktion mit dem System ist vernachlässigbar.

Der Einfluss des Systems ist in Abbildung c) aufgetragen. Die Flexibilität des LowEx Basis Systems ist in allen Bereichen größer als die des Referenzsystems. Weiterhin ist die Streuung der Werte geringer. Daraus folgt, dass der Einfluss einer nicht optimalen Anlagenkonfiguration eine geringere Auswirkung hat. Beide Systeme profitieren von größeren Speichern. Die TES-Größe  $V_{TES}$  in Teil d) hat eine positive Korrelation mit der Flexibilität, mit abnehmender Tendenz bei höheren Werten. Zudem hat eine hohe Vorlauftemperatur bei kleinen TES einen positiven und bei großen TES einen negativen Effekt. Beides ist auf zunehmende Wärmeverluste bei größeren TES und höheren Temperaturen zurückzuführen.

Anhand von Abb. 6.8 d) ist zu erkennen, dass die verzögerte Flexibilität bis zu einem Schwellwert von ca. 34 kW mit der BHKW-Leistung  $\dot{Q}_{CHP}$  ansteigt. Danach wird eine Sättigung erreicht. Eine weitere Steigerung ist nur mit größeren TES möglich. Der Schwellwert ist abhängig vom Wärmebedarf des Gebäudes und somit spezifisch für die Verteilungen von  $A_{WH}$  und  $d_{Ins}$  im hier verwendeten



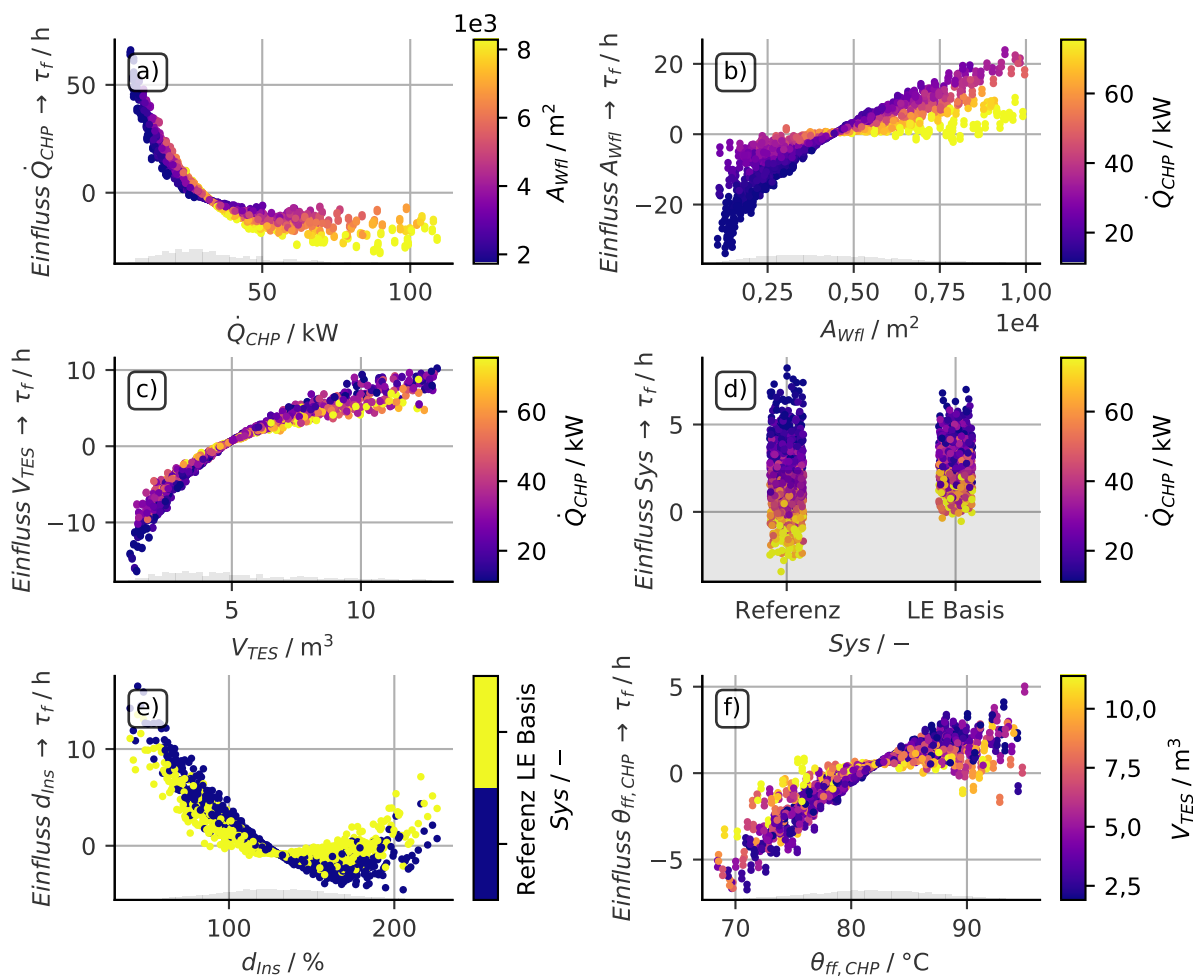
**Abbildung 6.8:** Lokale Sensitivitätsanalyse verzögerte Flexibilität – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter

Parametergitter. Er definiert die Leistung, ab der das BHKW in der Lage ist, den Wärmebedarf zu decken und den TES zu beladen. Teilabbildung f) zeigt den Einfluss der Vorlauftemperatur. Dieser ist näherungsweise linear, mit abnehmender Steigung bei größeren TES.

### 6.2.2.2 Erzwungene Flexibilität

Bezüglich der erzwungenen Flexibilität  $\tau_f$  sind die Sensitivitäten der sechs wichtigsten unabhängigen Variablen im Detail in Abb. 6.9 abgebildet. Die Interaktion mit je einer weiteren Variable ist über eine Farbkodierung angegeben.

Der Einfluss der RB Wohnfläche und Dämmstärke in Teilabbildungen b) und e) ist im Vergleich zur verzögerten Flexibilität invers. Die Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs bei großen Gebäuden ist auch hier zu erkennen. Zudem zeigt sich, dass die BHKW-Leistung bei großen Gebäuden mit der Wohnfläche interagiert und einen negativen Einfluss hat. Die Dämmstärke weist eine geringe Interaktion mit dem Anlagensystem auf. Bei hohen Werten ab  $d_{Ins} > 125 \%$ , entsprechend EnEV 2014 und neuer, zeigt



**Abbildung 6.9:** Lokale Sensitivitätsanalyse erzwungene Flexibilität – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter

das LowEx Basis System eine höhere Flexibilität.

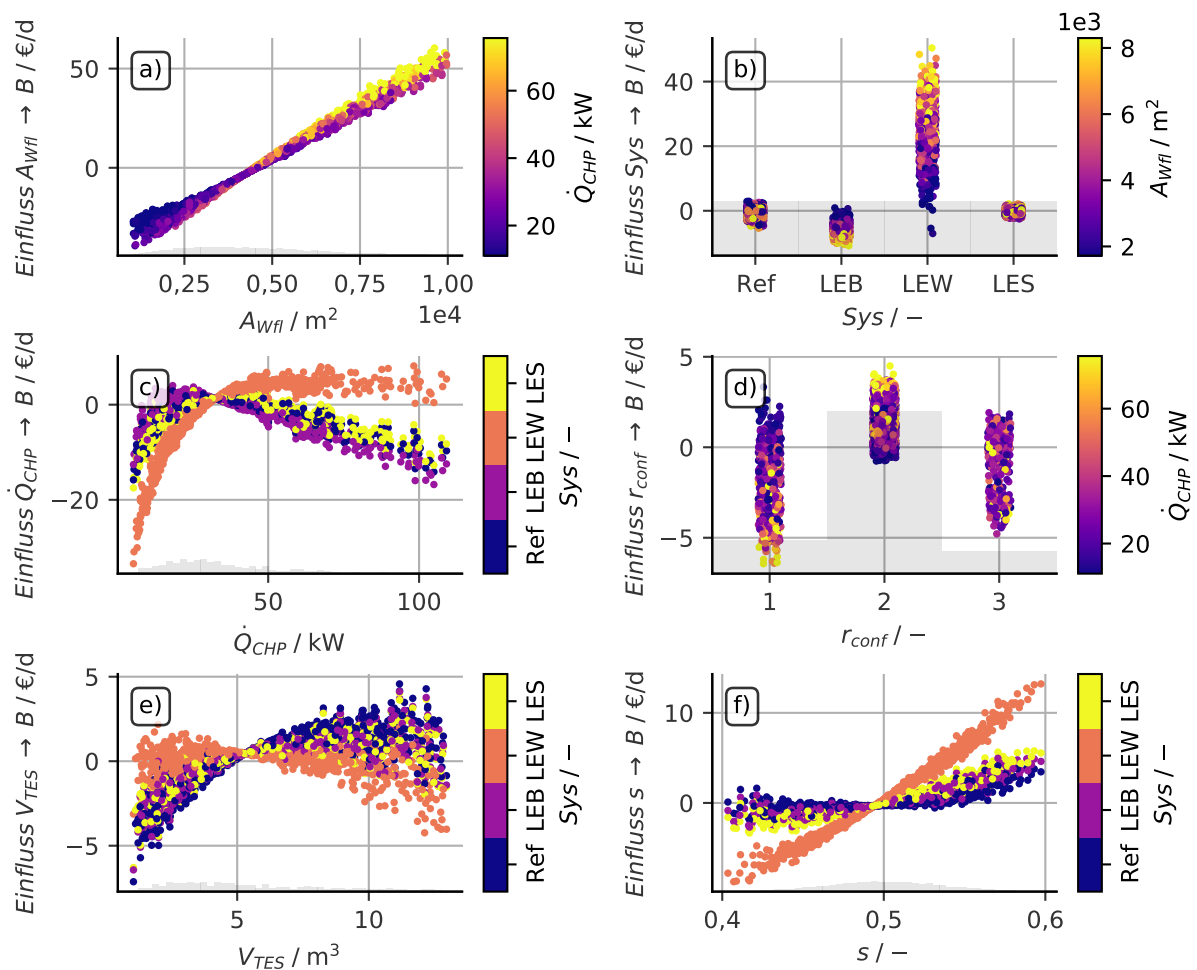
Der einflussreichste Parameter ist die thermische BHKW-Leistung  $\dot{Q}_{CHP}$  in Abb. 6.9 a). Für niedrige Leistungen in Relation zum Wärmebedarf des Gebäudes gilt  $\lim_{\dot{Q}_{CHP} \rightarrow \dot{Q}_{dmd}} \tau_f(\dot{Q}_{CHP}) = \infty$ . Folglich ist die Wohnfläche als Interaktionsvariable aufgetragen. Dies ist nach den in Tabelle 6.3 mittels Sobol-Methode gefundenen Interaktionseffekten folgerichtig. Bis zu ca. 5000 m<sup>2</sup>, bezogen auf die Mittelwerte des verwendeten Parametergitters in Tabelle 5.3, kann das BHKW bei geeigneter Dimensionierung einen Beitrag zur Flexibilität leisten. Bei größeren Gebäuden müsste das BHKW für Wohngebäude unüblich klein dimensioniert werden, um die Flexibilität positiv zu beeinflussen.

In diesem Fall bietet es sich nach Abbildung c) an, den TES größer zu bauen. Eine Steigerung des Volumens von 2,5 m<sup>3</sup> auf 7,5 m<sup>3</sup> kann im Durchschnitt ungefähr 11 h mehr Flexibilität liefern. Das Anlagensystem zeigt nach d) keinen direkt ersichtlichen Unterschied bezüglich der Auswirkung auf  $\tau_f$ . Aufgrund der starken Interaktion ist es jedoch wichtig, dass Werte mit zu niedrigen BHKW-Leistungen ausgeblendet werden. Diese haben, wie zuvor erläutert, eine sehr hohe Flexibilität zur Folge. Werden Werte im mittleren Leistungsbereich betrachtet, kann eine signifikante Steigerung durch Einsatz des LowEx Basis Systems beobachtet werden. Dies wird in Abschnitt 6.3.1 detaillierter aufgezeigt.

Die Sensitivität der erzwungenen Flexibilität für die Vorlauftemperatur in Teilabbildung f) ist vergleichbar mit der Analyse der verzögerten Flexibilität, mit einem tendenziell unterproportionalen Einfluss der Größe des TES.

### 6.2.2.3 Bruttoertrag

Die lokalen Sensitivitäten der wichtigsten Eingangsparameter der Bruttoerträge sind in Abb. 6.10 dargestellt. Die Parameterauswahl folgt der in der globalen Analyse ermittelten Rangordnung.



**Abbildung 6.10:** Lokale Sensitivitätsanalyse Bruttoertrag – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter

Die Menge der zu verkaufenden Einheiten an Wärme und Strom steigt proportional zum Wärmebedarf des Gebäudes. Die Wohnfläche, dargestellt in Teilabbildung a), und Dämmstärke hängen linear mit dem Bruttoertrag zusammen. Wohnfläche und Bruttoertrag korrelieren stark positiv proportional, die Dämmstärke schwach negativ. Die Dämmstärke wird daher nicht dargestellt.

Die SHAP-Werte des Anlagensystems in b) liefern keine weiteren Erkenntnisse über die globale Sensitivitätsanalyse hinaus. Eine Detailuntersuchung des Einflusses des Systems erfolgt im anschließenden



Anlagenvergleich.

Die BHKW-Leistung in Teilabbildung c) zeigt für den Betriebsfall im Winter ein Sättigungsverhalten bei Erreichen einer Leistung, die ausreicht um das Gebäude vollständig aus dem BHKW zu versorgen. Im Sommerbetrieb liegt die optimale Leistung für alle Anlagen niedriger als im Winter. Wird das BHKW zu groß dimensioniert, erfolgen häufige Schaltungen mit negativen Auswirkungen auf Effizienz und Bruttoerträge. Die tatsächliche optimale Leistung des BHKWs ist abhängig vom Wärmebedarf des Gebäudes und soll in Abschnitt 6.3.2 genauer untersucht werden.

Die Anschlusskonfiguration, in Abb. d) gezeigt, kann die Bruttoerträge beeinflussen. Zwei Anschlüsse sind für die LowEx-Systeme optimal. Bei höheren BHKW-Leistungen wird der Effekt weiter verstärkt. Drei Anschlüsse zeigen keinen Vorteil, sind jedoch mit höheren Investitionskosten sowie höherem Aufwand für Regelung und Installation verbunden. Das Referenzsystem unterstützt nur einen Anschluss. Sofern das TES-Volumen ausreichend groß ist, um eine Lastverschiebung zu ermöglichen und hohe Schaltzahlen zu vermeiden, ist der Einfluss gering, siehe Teil e). Im Winter, bei nahezu konstantem BHKW-Betrieb, ist die Dimensionierung des TES vernachlässigbar. Abb. f) lässt auf einen leichten überproportionalen Zusammenhang zwischen Bruttoerträgen und der Stromkennzahl  $s$  schließen.

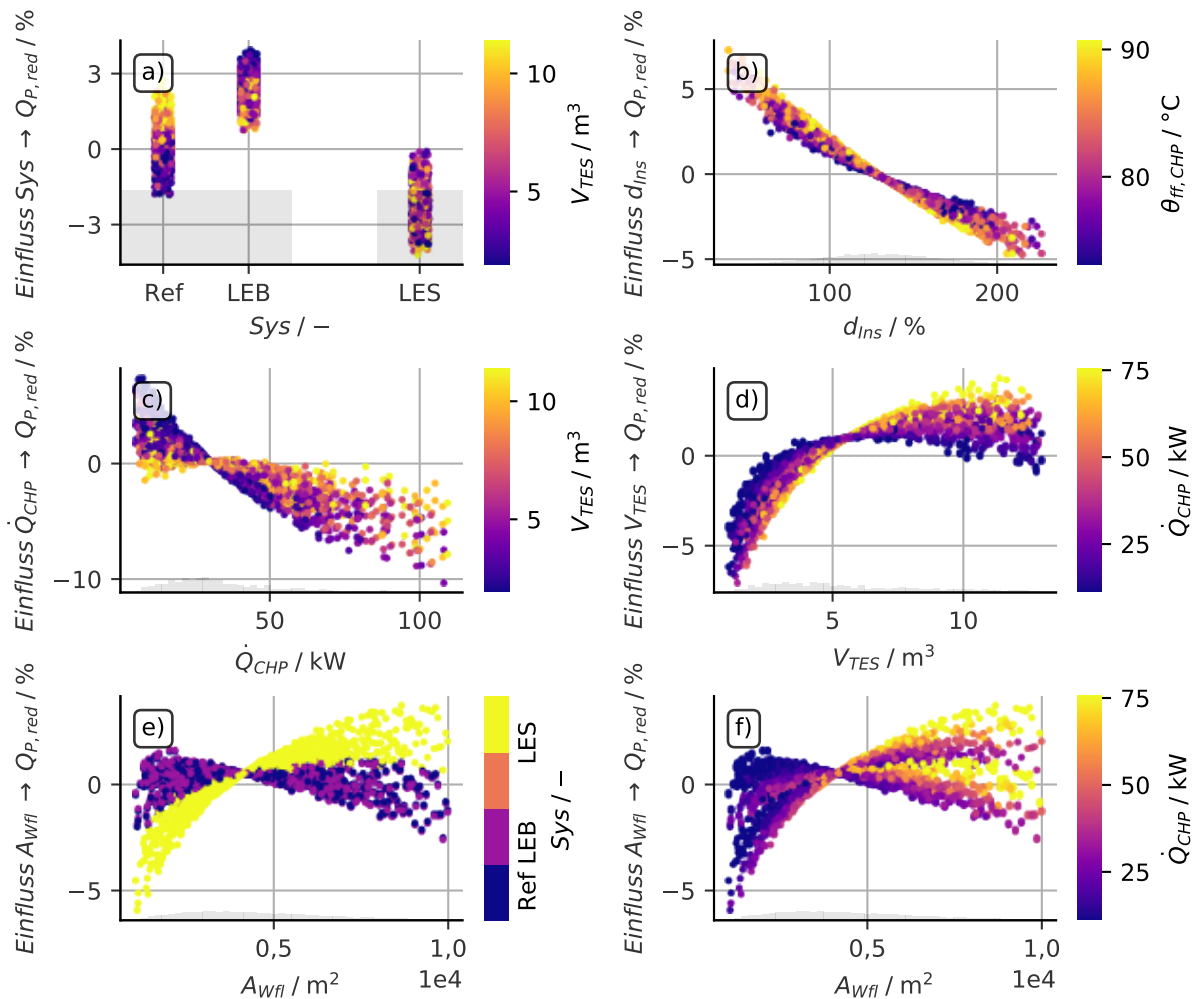
#### 6.2.2.4 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emission

Die lokale Sensitivitätsanalyse der PE-Einsparung und der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird repräsentativ anhand der PE-Einsparungen nach Displacement Mix für das Deutsche Stromnetz ohne Nuklearenergie durchgeführt. Die SHAP-Werte der wichtigsten Parameter sind in Abb. 6.11 abgebildet.

Den größten Einfluss hat nach der globalen Sensitivitätsanalyse das Anlagensystem. Dieses ist in Teilabbildung a) mit der Speichergröße als Interaktionsvariable aufgetragen. Das Referenzsystem profitiert von einem größeren TES, da das BHKW hierdurch konstanter betrieben werden kann. Bei den LowEx-Systemen ist ein konstanter Betrieb schon bei kleineren TES möglich, bei größeren Speichern überwiegen die Wärmeverluste. Die Möglichkeit zur Einsparung von PE nimmt daher mit größeren TES leicht ab.

Die Dämmstärke in Abb. 6.11 b) hat einen fast linearen negativen Zusammenhang mit der PE-Einsparung. Bei höheren Dämmstärken kann das BHKW weniger Wärme und Strom produzieren, der Strombedarf des Gebäudes bleibt aber nahezu unverändert. Es muss mehr Strom mit hohem PE-Faktor aus konventionellen zentralen Kraftwerken dem Netz bezogen werden.

Abbildungen c) und d) zeigen den Einfluss der TES-Größe und der BHKW-Leistung mit dem jeweils anderen Parameter als Interaktionseffekt. Es kann gezeigt werden, dass eine zu hohe Speicherkapazität bei niedrigen Leistungen aufgrund zusätzlicher Wärmeverluste für die Einsparung von PE hinderlich ist, bei großen Leistungen jedoch ein großes Volumen benötigt wird. Im Allgemeinen ist eine niedrige BHKW-Leistung einer PE-Einsparung zuträglich, solange der Wärmebedarf des Gebäudeenergiesystems zu einem großen Teil aus dem BHKW gedeckt werden kann. Das TES-Volumen zeigt wie auch schon bei den Analysen der Flexibilität und des Bruttoertrags ein Sättigungsverhalten. Dieses wird bei kleinen Leistungen mit 5 m<sup>3</sup> früher erreicht. Die für die PE-Einsparung optimale TES-Größe wird daher niedriger liegen, als die zum Erreichen einer optimalen Flexibilität oder eines optimalen Bruttoertrags. Die Sensitivität bezüglich der Wohnfläche wird in Teil e) und f) mit Blick auf die Interaktion mit dem System und der BHKW-Leistung dargestellt. Der Einfluss der Wohnfläche kann anhand des Systems auf zwei Äste aufgeteilt werden. Beim LowEx Basis- und Referenzsystem hat die Wohnfläche einen



**Abbildung 6.11:** Lokale Sensitivitätsanalyse der PE-Einsparung – SHAP-Werten der wichtigsten Parameter

tendenziell negativ proportionalen Einfluss, beim LowEx Strom System ist der Einfluss unterproportional. Ab Wohnflächen von ca. 4000 m<sup>2</sup> können mit dem LowEx Strom System höhere PE-Einsparungen erzielt werden. Beide Äste zeigen weiterhin, dass eine hohe BHKW-Leistung bei großen Wohnflächen förderlich ist, während kleine BHKWs in kleinen Gebäuden vorgezogen werden sollten.

### 6.3 Anlagenvergleich

Eine detaillierte Bewertung des Einflusses der Systeme auf die abhängigen Variablen soll in diesem Abschnitt erfolgen. Dazu werden die statistischen Modelle als Zielfunktion eines Optimierungsproblems definiert. Dieses Optimierungsproblem wird anschließend für eine Vielzahl an unterschiedlichen Randbedingungen gelöst. Das heißt, dass die Wohnfläche und die Dämmstärke vorgegeben werden, während die Zielfunktionen bezüglich der zwei einflussreichsten Parameter optimiert werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Optimierungen der einzelnen Anlagentypen verglichen.

Aufbauend auf der Sensitivitätsanalyse wird die Komplexität der Modelle für den Vergleich der Systeme reduziert. Die im Zuge der Analyse ermittelte Rangordnung der wichtigsten Eingangsparameter jedes Regressionsmodells ist in Tabelle 6.6 aufgelistet. Die Optimierung wird für jeden Anlagentyp durchgeführt. Daher wird auch dieser als RB behandelt. Unter den verbliebenen Einflussgrößen ist die BHKW-Leistung in allen Fällen unter den zwei wichtigsten Parametern, die Speichergröße in drei von vier Fällen. Darüber hinaus können beide Parameter bei der Auslegung einer Anlage einfach und direkt beeinflusst werden. Folglich werden diese beiden unabhängigen Variablen als primäre Zielgrößen der Optimierung ausgewählt.

**Tabelle 6.6:** Rangordnung der Parameter nach SHAP-Werten der globalen Sensitivitätsanalyse

Parameter		Rangordnung bezüglich Zielgröße			
Bezeichnung	Symbol	$\tau_d$	$\tau_f$	$B$	$Q_{P,red}$ $mCO_{2,red}$
Wohnfläche (RB)	$A_{Wfl}$	1	2	1	2
Dämmstärke (RB)	$d_{Ins}$	5	5	3	3
TES-Volumen	$V_{TES}$	3	3	7	5
BHKW-Leistung	$\dot{Q}_{CHP}$	4	1	4	1
BHKW-Vorlauf-Temperatur	$\theta_{ff,CHP}$	6	6	9	7
Stromkennzahl	$s$	8	9	6	4
Anschlusshöhe	$h_{rf,CHP}$	9	7	8	9
Rücklauf-Konfiguration	$r_{conf}$	7	8	5	8
Anlagentyp (RB)	$Sys$	2	4	2	6

Eine zusätzliche Reduktion der Modellkomplexität wird erreicht, indem die weiteren, weniger wichtigen Parameter während des Optimierungsverfahrens konstant gehalten werden. Dazu werden Werte gewählt, die sich in Voruntersuchungen als vorteilhaft für die jeweiligen Systeme gezeigt haben und nicht wesentlich vom Erwartungswert der Verteilungen abweichen. Das resultierende reduzierte Parametergitter ist in Tabelle 6.7 aufgeführt. Die RB dienen als Vergleichsbasis für den Transfer der Ergebnisse. Diese werden daher unverändert mit den zuvor festgelegten Verteilungen betrachtet. Die Zielvariablen der Optimierung sind als „variabel“ gekennzeichnet.

**Tabelle 6.7:** Optimierte Anlagenkonfiguration – Reduziertes Parametergitter

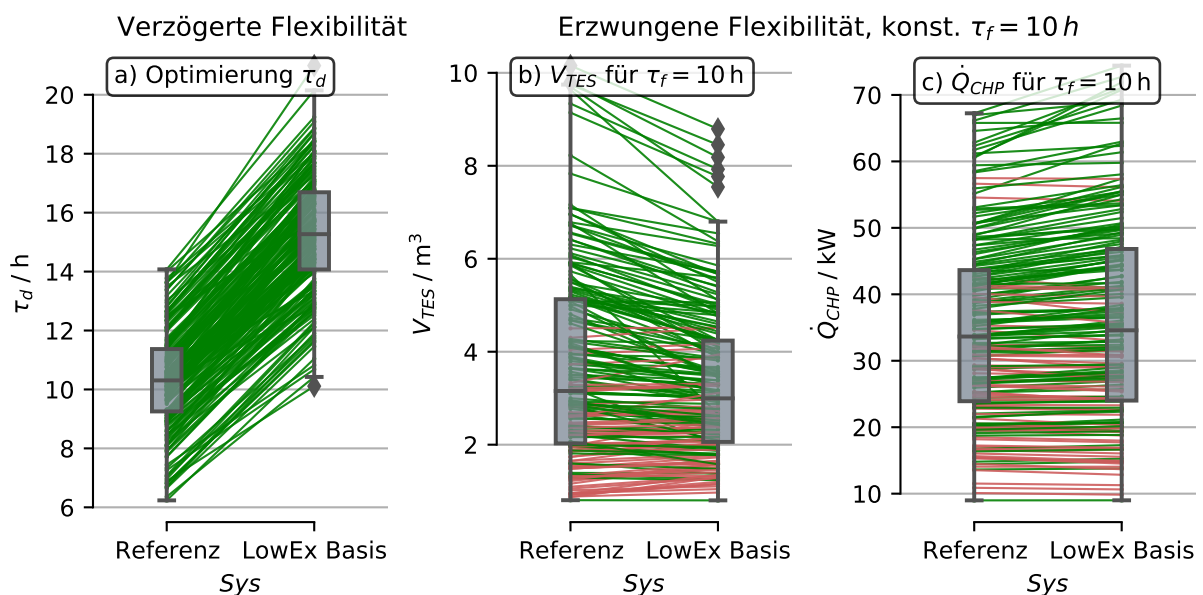
Zielgröße	RB		Parameterwerte						
	$Sys$	$A_{Wfl}$ $d_{Ins}$	$V_{TES}$	$\dot{Q}_{CHP}$	$\theta_{ff,CHP}$	$s$	$h_{rf,CHP}$	$r_{conf}$	
$\tau_d$	0, 1	Verteilung	variabel	variabel	85 °C	0,5	0 %	1	
$\tau_f$	0, 1	Verteilung	variabel	variabel	85 °C	0,5	0 %	1	
$B$	0	Verteilung	variabel	variabel	83 °C	0,55	0 %	1	
	1, 2, 3	Verteilung	variabel	variabel	83 °C	0,55	-5 %	2	
$Q_{P,red}$	0	Verteilung	variabel	variabel	81 °C	0,5	0 %	1	
	1, 3	Verteilung	variabel	variabel	81 °C	0,5	-5 %	2	
$mCO_{2,red}$	0	Verteilung	variabel	variabel	81 °C	0,5	0 %	1	
	1, 3	Verteilung	variabel	variabel	81 °C	0,5	-5 %	2	

### 6.3.1 Flexibilität

Für den Vergleich der Flexibilität zwischen dem Referenzsystem und LowEx Basis werden das TES-Volumen und die BHKW-Leistung für jede Kombination aus Wohnfläche, Dämmstärke und System optimiert. Die verzögerte Flexibilität wird mittels eines Sequential Least Squares Programming Algorithmus maximiert [152]. Da die Steigung der verzögerten Flexibilität bezüglich der TES-Größe nach Abb. 6.8 im Wertebereich des Parametergitters immer größer Null ist, wird eine Erhöhung der TES-Größe mit einem Wurzelterm sanktioniert. Dies bildet die realen Zusammenhänge zwischen Platzbedarf, Kosten und Größe eines TES näherungsweise ab.

Die erzwungene Flexibilität steigt stark überproportional mit abnehmender BHKW-Leistung. Um dennoch eine stabile Optimierung zu erlauben, wird ein Zielwert von  $\tau_f = 10$  h festgelegt. Anschließend wird die Speichergröße mittels Trust Region Reflective Algorithm [153] minimiert und die BHKW-Leistung maximiert. Eine höhere verfügbare BHKW-Leistung wird positiv bewertet, ein größerer Speicherbedarf negativ.

Die Ergebnisse der Optimierung sind in Abb. 6.12 für die verzögerte und erzwungene Flexibilität für jeweils 200 zusammenhängende Stichproben dargestellt. Der Boxplot zeigt den Median und den Interquartilsabstand. Verbesserungen einer Stichprobe von Referenz zu LowEx Basis sind in grün dargestellt, Verschlechterungen in rot.



**Abbildung 6.12:** Systemoptimierung bezüglich Flexibilität – a) Maximierung der verzögerten Flexibilität; b) Minimierung TES-Volumen bei konstanter erzwungener Flexibilität; c) Maximierung BHKW-Leistung bei konstanter erzwungener Flexibilität

Abb. 6.12 a) verdeutlicht, dass das LowEx Basis System eine deutlich höhere verzögerte Flexibilität bereitstellt. Die Steigerung gegenüber dem Referenzsystem liegt im Mittel und Median bei 48 %, im oberen Quartil bei 47 % und im unteren Quartil bei 52 %. Die verfügbare BHKW-Leistung steigt im Mittel um 26 %, die benötigte TES-Größe um 3,7 %. Bei keiner Stichprobe hat der Einsatz des LowEx-Systems zur einer Abnahme der Flexibilität geführt.

Eine Optimierung der Anlagenkonfiguration bei einer konstanten erzwungenen Flexibilität von  $\tau_f = 10$  h ist in Abb. 6.12 b) und c) dargestellt. Die meisten Stichproben zeigen eine Reduktion der benötigten TES-Größe in b) und eine Steigerung der verfügbaren BHKW-Leistung in c) auf. Der Mittelwert der benötigten TES-Größe sinkt um 10 %, die verfügbare BHKW-Leistung steigt um 3,8 %. Im oberen Quartil fallen die Verbesserungen höher aus, im unteren Quartil sind die Unterschiede vernachlässigbar. Eine Detailanalyse der Daten zeigt, dass im unteren Quartil Stichproben mit niedrigem Dämmstandard älter als EnEV 2009 vorliegen. Das heißt, dass der Einsatz eines LowEx-Systems bei Gebäuden nach EnEV 2009 oder neuer immer zu einer Verbesserung der erzwungenen Flexibilität führt. Bei älteren Gebäuden kann eine Verbesserung nur dann erreicht werden, wenn der TES ausreichend groß dimensioniert wird. Die Nutzenschwelle, ab der das LowEx-System auch bei alten Gebäuden zu einer Verbesserung führt, liegt bei einer Wohnfläche von 3000 m<sup>2</sup> bei ungefähr 2 m<sup>3</sup> und skaliert proportional zur Wohnfläche. Bezüglich der verzögerten Flexibilität gilt diese Einschränkung nicht. Hier führt das LowEx-System immer zu einer Verbesserung.

Tabelle 6.8 fasst die Abweichungen zwischen dem LowEx Basis System und dem Referenzsystem bei einer Optimierung bezüglich der Flexibilität im Median zusammen. Zudem sind das benötigte Speichervolumen und die verfügbare BHKW-Leistung für das Erzielen der verzögerten Flexibilität aufgeführt. Während das Speichervolumen nahezu unverändert bleibt, kann die BHKW-Leistung um 19 % größer ausgelegt werden. Damit verbundene höhere Investitionskosten werden durch höhere Bruttoerträge kompensiert, siehe auch Abschnitt 6.3.2.

**Tabelle 6.8:** Systemoptimierung bezüglich Flexibilität – Median der prozentualen Veränderungen gegenüber dem Referenzsystem

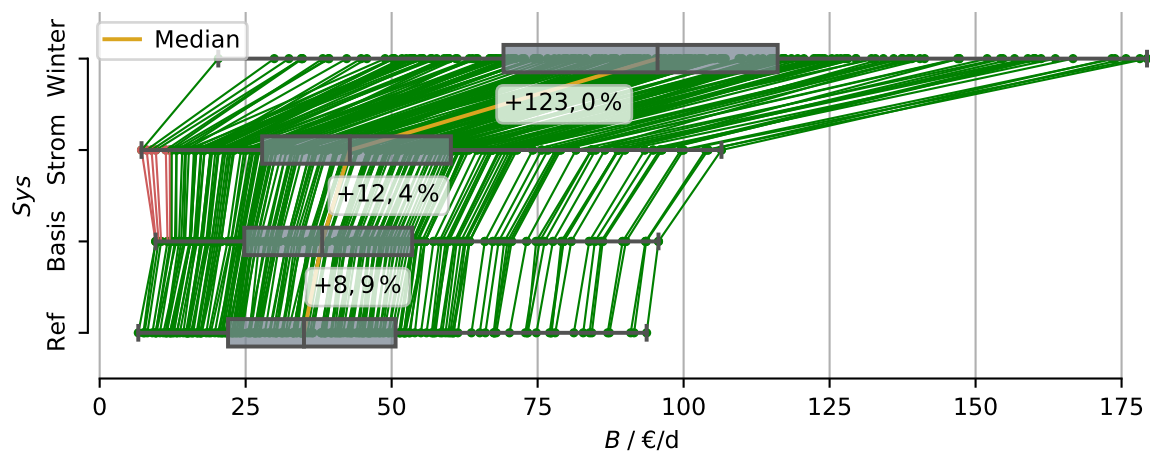
	Prozentuale Änderung ggü. Referenz, %					
	verzögerte Flexibilität			erzwungene Flexibilität		
	$\tau_d$	$\dot{Q}_{CHP}$	$V_{TES}$	$\tau_f$	$\dot{Q}_{CHP}$	$V_{TES}$
LowEx Basis	48,2 %	19,1 %	1,0 %	-	2,8 %	-5,0 %

### 6.3.2 Bruttoertrag

Erneut wird für jede Kombination aus Randbedingungen eine optimale Anlagenkonfiguration mittels Sequential Least Squares Programming Algorithmus berechnet. Den Ergebnissen werden je Anlagentyp 200 zusammenhängende Stichproben entnommen. Die RB der Stichproben sind zwischen den Anlagentypen äquivalent.

Die Entwicklung der Bruttoerträge zwischen den Anlagentypen ist in Abb. 6.13 dargestellt. Verbesserungen sind in grün dargestellt, Verschlechterungen in rot. Der in der globalen Sensitivitätsanalyse gefundene Trend, dass der Einsatz des LowEx Basis Systems geringere Bruttoerträge als das Referenzsystem zur Folge hat, kann hier widerlegt werden. Tatsächlich erreicht das LowEx Basis System eine Verbesserung von ca. 9 % im Median. Keine Stichprobe weist eine negative Entwicklung auf. Die Verbesserung ist über alle Randbedingungen hinweg gleichmäßig. Die gegensätzliche Aussage aus den SHAP-Werten in Abschnitt 6.2.2.3 kann darauf zurückgeführt werden, dass die Berechnung der SHAP-Werte anhand des Ansatzes aus der Spieltheorie in der verwendeten Programmversion

auch Parameterkombinationen wie  $r_{conf} \neq 1 \vee h_{rf,CHP} \neq 0$  zulässt. Diese werden nur von den LowEx-Systemen unterstützt, der teilweise positive Einfluss wird aber auf das Referenzsystem übertragen. Der Einsatz des stromgeführten Systems LowEx Strom hat eine weitere Steigerung der Bruttoerträge um ca. 12 % im Median, bezogen auf LowEx Basis, zur Folge. Bei ca. 4 % der Stichproben sind verringerte Bruttoerträge zu erkennen. Bei diesen Stichproben sind kleine Gebäude von 1500 m<sup>2</sup> mit Dämmstärken entsprechend KfW 55 bis hin zum Passivhausstandard vertreten. Gegenüber dem Referenzsystem liegt weiterhin eine Verbesserung vor. Höhere Wartungskosten und energetische Verluste im modulierenden Betrieb wiegen hier schwerer als größere Mengen eigenverbraucher Strom. Werden Gebäude und BHKW größer, treten der Einfluss von Dämmstärke, Wartungskosten und Verlusten in den Hintergrund. Bei Gebäuden ab 2000 m<sup>2</sup> ist der Einsatz eines stromgeführten BHKWs immer vorteilhaft. Die Bruttoerträge liegen hier 5 % höher als bei einem wärmegeführten BHKW. Im Winter kann eine weitere Steigerung von 123 % aufgrund des deutlich höheren Wärmebedarfs erzielt werden. Je besser das Gebäude gedämmt ist, desto geringer fällt die Steigerung aus.



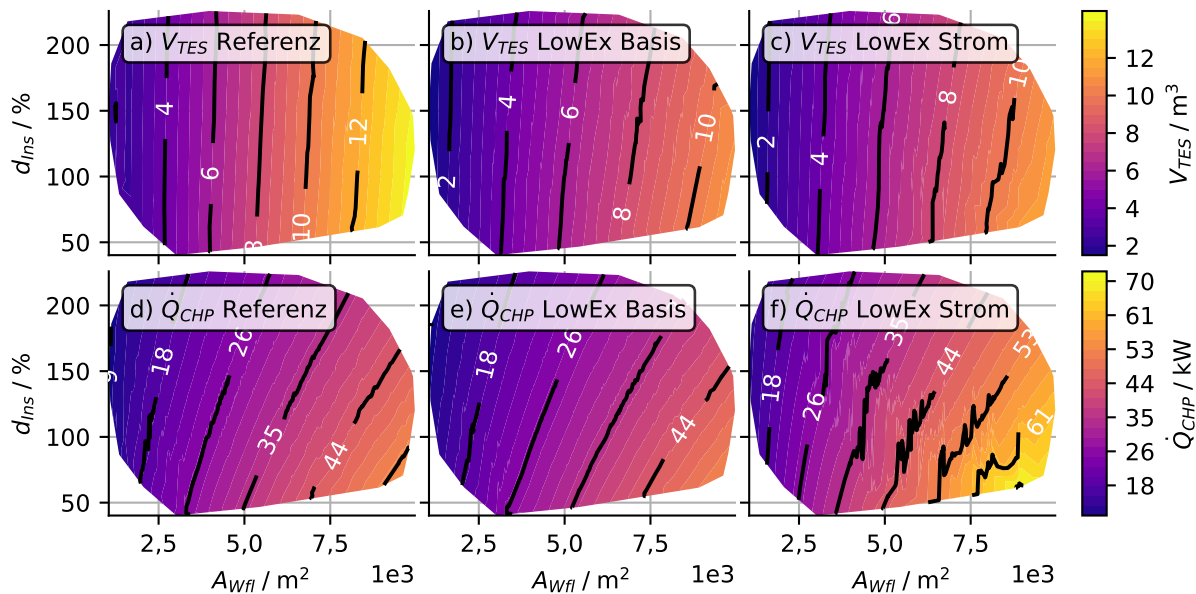
**Abbildung 6.13:** Systemoptimierung bezüglich Bruttoertrag – Optimale Bruttoerträge im Anlagenvergleich

Weiterhin werden die zum Erzielen der Optima benötigten TES-Volumina und BHKW-Leistungen analysiert. Diese sind in Abb. 6.14 für alle Systeme außer LowEx Winter abgebildet. In der oberen Reihe a) bis c) ist das benötigte TES-Volumen über eine Heatmap in Relation zur Gebäudegröße auf der Abszisse und der Dämmstärke auf der Ordinate dargestellt. In der unteren Reihe d) bis f) ist die erforderliche BHKW-Leistung aufgeführt. Der Median der prozentualen Abweichungen der Systeme gegenüber dem Referenzsystem ist in Tabelle 6.9 zusammengefasst.

Der Vergleich von Abb. 6.14 b) und c) mit a) zeigt, dass das LowEx Basis System trotz 9 % höherer Bruttoerträge ca. 20 % weniger Speichervolumen benötigt. Das stromgeführte LowEx Strom System erzielt 22 % höhere Bruttoerträge bei 15 % geringerem Speicherbedarf.

Aufgrund des hohen Wärmebedarfs bei sehr hohen Bruttoerträgen im Winter ist eine hohe BHKW-Leistung für das Gesamtergebnis förderlich. Weiterhin sinkt die Anzahl der Betriebsstunden mit steigender BHKW-Leistung. Mit Blick auf die anstehende Novellierung des KWKG zum Jahr 2021 mit einer Begrenzung der förderfähigen Vollbetriebsstunden auf 3500 h wird eine Reduktion der Betriebsstunden umso wichtiger. Nach Abb. 6.10 c) nehmen die Bruttoerträge bei den Betriebsfällen im Sommer mit zu großer Leistung jedoch wieder ab. Das um 26 % größere Optimum des Leistungsbedarfs des LowEx Strom Systems, siehe auch Teilabbildung f), ist daher mit Blick auf das gesamte Jahr

sowie anstehende Neuregulierungen trotz der höheren Investitionskosten positiv zu bewerten.



**Abbildung 6.14:** Systemoptimierung bezüglich Bruttoertrag – Benötigtes TES-Volumen und benötigte BHKW-Leistung für optimale Bruttoerträge

**Tabelle 6.9:** Systemoptimierung bezüglich Bruttoertrag – Median der prozentualen Veränderungen gegenüber dem Referenzsystem

	Prozentuale Änderung ggü. Referenz, %		
	Bruttoertrag	Speichervolumen	BHKW-Leistung
LowEx Basis	8,9 %	−20,0 %	−3,2 %
LowEx Strom	22,5 %	−15,6 %	26,1 %
LowEx Winter	173,1 %	−86,2 %	104,5 %

### 6.3.3 Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emission

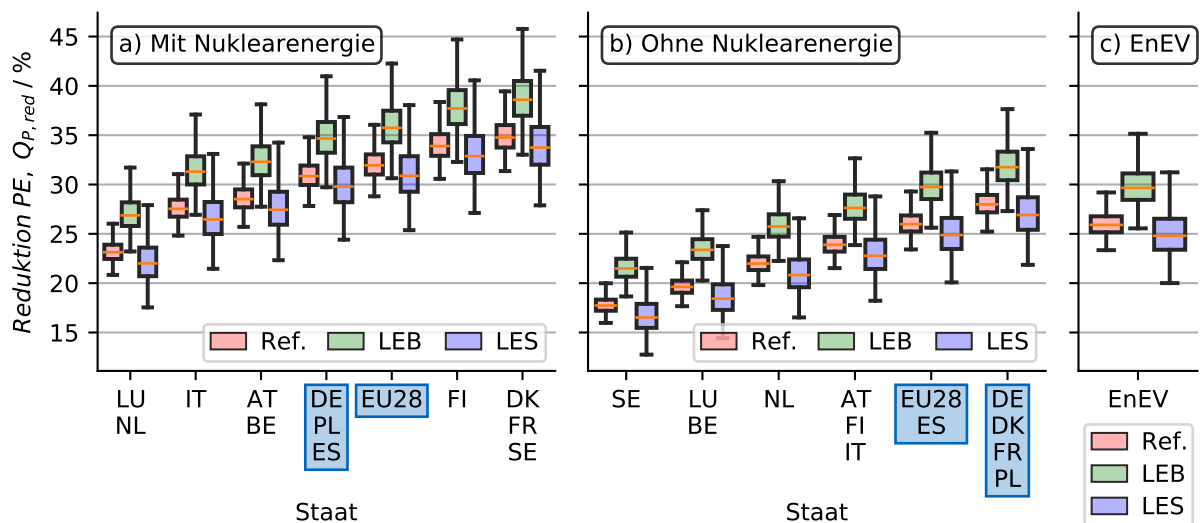
Die multivariaten Regressionsmodelle der PE-Einsparung und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen werden mittels Sequential Least Squares Programming Algorithmus in 896 Fällen je Anlage bezüglich einer maximalen Reduktion optimiert. Sehr große oder kleine Speicher und BHKWs werden von der Optimierung sanktioniert, um realistische und stabile Ergebnisse zu erzielen. Der Betriebsfall im Winter wird nicht betrachtet, da selektiv nur der Einfluss der TWE-Anlagentechnik auf die PE- und CEE-Einsparung ermittelt werden soll.

Zur Evaluierung der erreichten Einsparungen werden die PE-Einsparung  $Q_{P,red}$  und die CEE-Einsparung  $m_{CO_2,red}$  für zwölf EU-Staaten sowie für die Summe der 28 EU-Staaten (EU28) berechnet. Die Auswahl der Länder wurde danach getroffen, in welchen Ländern der Einsatz einer LowEx-Anlage zumindest aus technologischer und betriebswirtschaftlicher Sicht denkbar wäre. Dies sind: Belgien

(BE), Dänemark (DK), Deutschland (DE), Finnland (FI), Frankreich (FR), Italien (IT), Luxemburg (LU), Niederlande (NL), Österreich (AT), Polen (PL), Schweden (SE), Spanien (ES). Ein unmittelbarer Einsatz ist in Deutschland, Österreich, Italien sowie der Schweiz möglich. In den restlichen Staaten ist der Baustandard zum aktuellen Stand zu gering. Eine grundlegende energetische Sanierung des Gebäudebestands sollte hier Vorrang vor dem Einsatz eines LowEx-Systems haben.

Die Ergebnisse werden bei hoher Ähnlichkeit gruppiert. Die Gruppen, in denen Deutschland oder die EU28-Staaten enthalten sind, werden blau hervorgehoben. Der Fokus der Auswertungen liegt für Deutschland auf einer Netzbetrachtung ohne Nuklearenergie, da die Novellierung des Atomgesetzes von 2011 eine Abschaltung aller verbliebenen Kernenergieanlagen bis Ende 2022 vorsieht. In den EU28-Staaten wird Nuklearenergie aufgrund der aktuellen energiepolitischen Lage weiterhin einbezogen. Die Berechnung der PE- und CEE-Einsparung erfolgt wie in Abschnitt 2.6 erläutert mittels des Displacement Mix sowie anhand der aktuellen PE-Faktoren nach EnEV 2016 und der Zusammensetzung des Strommix zum Stand 2019.

Die PE-Einsparung bei Verdrängung von Strom aus nicht-erneuerbaren Quellen ist für die zwölf oben genannten Länder sowie für die EU in Abb. 6.15 als Boxplot abgebildet. In Teil a) wird der im Netz vorhandene Strom aus Nuklearenergie als ersetzbar betrachtet, in Teil b) wird eine Verdrängung von Strom aus ausschließlich fossilen Quellen untersucht.



**Abbildung 6.15:** Systemoptimierung bezüglich PE-Einsparung nach Displacement Mix – a) unter Einbezug von Nuklearenergie im Netz; b) ohne Nuklearenergie im Netz; c) nach EnEV und GEG 2020

Es zeigt sich, dass durch den Einsatz eines BHKWs, unabhängig von der verwendeten Anlage, in jedem Land eine PE-Einsparung erreicht werden kann. In Ländern mit niedrigem PE-Faktor für Verdrängung, wie Luxemburg und den Niederlanden mit oder Schweden ohne Nuklearenergie, werden mit dem Referenzsystem Einsparungen von mindestens 21 % beziehungsweise 16 % erreicht. In Deutschland sind es über 28 % mit und 25 % ohne Nuklearenergie. Generell steigt das PE-Einsparpotential mit dem Anteil an Nuklearenergie aufgrund deren niedriger Effizienz von ca. 33 %.

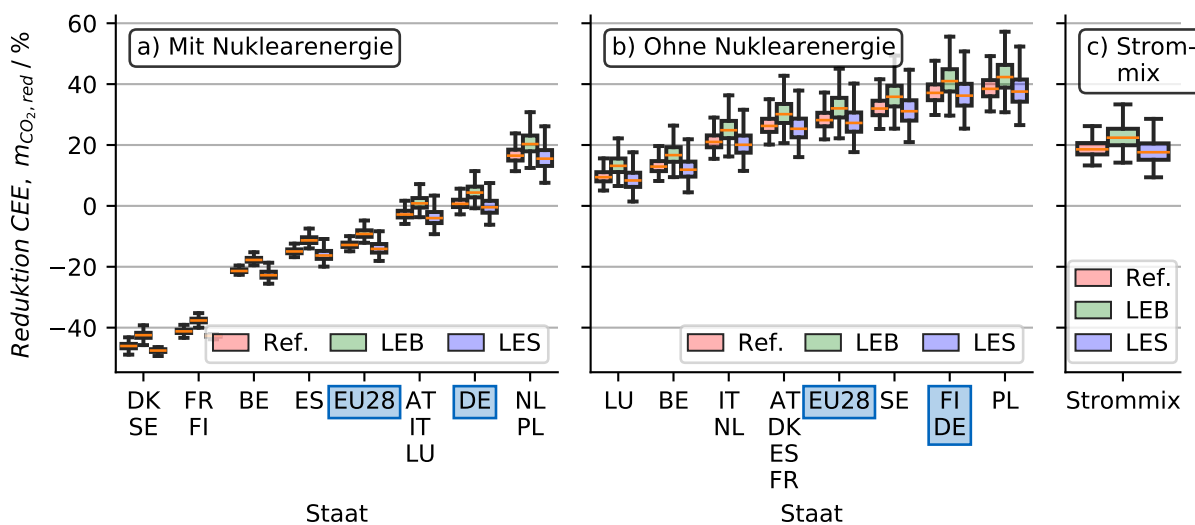
Wird der Median der PE-Einsparungen betrachtet, so kann in den EU28-Staaten, mit und ohne Nuklearenergie, durch Einsatz des LowEx Basis Systems im Vergleich zum Referenzsystem 3,8 % mehr PE eingespart werden, entsprechend einer Verbesserung um einen Faktor von 1,12 bis 1,14. Wird



das BHKW stromgeführt betrieben, liegen die Einsparungen um 1,1 % niedriger. Diese Werte gelten näherungsweise auch für die Betrachtung des Deutschen Stromnetzes ohne Nuklearenergie sowie für die Berechnung der Einsparungen nach EnEV beziehungsweise DIN V 18599.

Eine Reduktion des PE-Bedarfs von deutlich über 40 % durch Einsatz der LowEx-Systeme wäre in Bulgarien und Rumänien möglich. Ein Einsatz ist hier aber nicht denk- und absehbar.

Werden die Reduktionen der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Displacement Mix in Relation zu einem Referenzgebäude ohne BHKW betrachtet, so zeigt sich eine größere Bandbreite an Ergebnissen, siehe Abb. 6.16. Insbesondere Länder mit einem relevanten Anteil an Strom aus fossilen Brennstoffen und wenig oder ohne Nuklearenergie bieten ein großes CO<sub>2</sub>-Einsparpotential durch den Einsatz von BHKWs. Hierunter fallen zum Beispiel Deutschland, Finnland, Niederlande und Polen. Einsparungen von mehr als 40 % können mit dem LowEx Basis System erreicht werden.



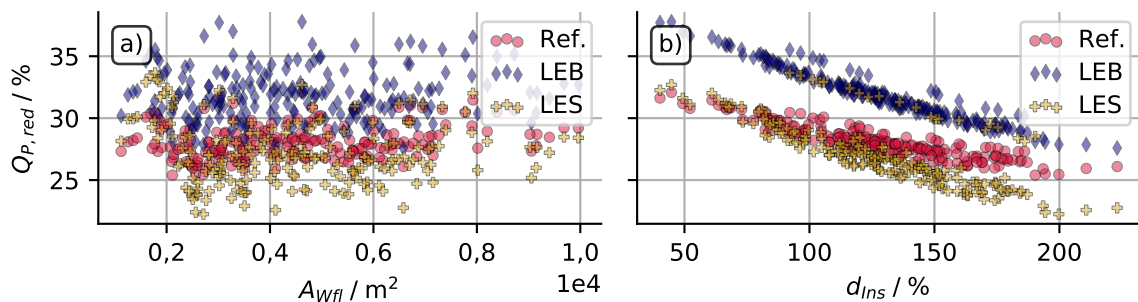
**Abbildung 6.16:** Systemoptimierung bezüglich CEE-Einsparung nach Displacement Mix – a) unter Einbezug von Nuklearenergie im Netz; b) ohne Nuklearenergie im Netz; c) nach dem aktuellen Deutschen Strommix

In Ländern mit einem hohem Anteil an Nuklearenergie in Abb. 6.16 a), wie Dänemark oder Schweden, treten mit einem BHKW hingegen negative CO<sub>2</sub>-Einsparungen auf. Nach dem Verdrängungsmix ist der aus dem Netz verdrängte Strom sauberer, als der durch das BHKW produzierte. Der zusätzliche Energieaufwand für die Stromproduktion gegenüber dem Referenzgebäude ohne BHKW wirkt sich negativ auf die CEE aus. Dies trifft auch im Mittel auf die EU28-Staaten zu. Erst in Ländern mit einem geringer werdenden Nuklearanteil wie Österreich, Italien oder Luxemburg kann mit dem LowEx Basis System eine CEE-Einsparung von 1 % erreicht werden, während das Referenz- und das LowEx Strom System den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 3 % beziehungsweise 4 % steigern.

Wird Nuklearenergie nicht als zu verdrängender Anteil des Strommix betrachtet, können durch den Einsatz eines BHKWs deutlich größere CO<sub>2</sub>-Einsparungen erreicht werden, siehe Abb. 6.16 b). Jedoch sinkt der relative Einfluss der Anlagentechnik. So können in Deutschland mit dem Referenzsystem 37 % eingespart werden, während es mit dem System LowEx Basis 41 % und mit LowEx Strom 36 % sind. Nur in Polen oder Ländern wie Rumänien, Lettland oder Bulgarien könnte eine höhere Einsparung erreicht werden. In Ländern wie Luxemburg, hier liegt der Anteil der fossilen Energieträger an der

Stromerzeugung bei nur 25 %, während erneuerbare Energien inklusive Wasserkraft die restlichen 75 % ausmachen, fallen die CEE-Einsparungen am geringsten aus. Mit dem LowEx Basis System sind es 13 %, mit dem Referenzsystem 9 % und mit dem System LowEx Strom 8 %. Auch hier wäre ein gezielter Einsatz dezentraler KWK nützlich.

Werden die den Box-Plots zugrundeliegenden Daten im Detail betrachtet, so zeigt sich in Übereinstimmung mit Abschnitt 6.2.2.4, dass die Einsparungen insbesondere bei schlechtem Dämmstandard höher ausfallen. Dies zeigt Abb. 6.17 am Beispiel der Stromversorgung in Deutschland ohne Nuklearenergie. Das BHKW kann bei höherem Wärmebedarf in Relation zum Strombedarf des Gebäudes, dieser ist in guter Näherung nicht von der Dämmstärke abhängig, mehr Strom produzieren. Dies führt nach der Stromgutschriftmethode zu einer höheren Reduktion des PE-Bedarfs beziehungsweise der CEE. Bei zu geringer Differenz des PE-Faktors für den Verdrängungsmix KWK und den Strombezug aus dem Netz gilt dies nicht mehr. Hier kann die Einsparung für alle Kombinationen aus Wohnfläche, Dämmstandard oder Anlagentechnik negativ werden. Die Wohnfläche hat keinen zu erkennenden Einfluss, da Strom- und Wärmebedarf gleichermaßen damit skalieren. Der in der Sensitivitätsanalyse gefundene Einfluss der Wohnfläche ist auf nicht optimale Anlagenkonfigurationen zurückzuführen.



**Abbildung 6.17:** Systemoptimierung bezüglich PE-Einsparung für Deutschland ohne Nuklearenergie – Abhängigkeit der PE-Einsparung a) von der Wohnfläche; b) vom Dämmstandard

Insbesondere die LowEx Systeme zeigen eine hohe Sensitivität für den Dämmstandard, erkennbar an der Steigung der in Abb. 6.17 b) aufgetragenen Punktwolke. Dies ist auf den höheren thermischen Wirkungsgrad des BHKWs, wie in Abschnitt 5.5 analysiert, bei ähnlichem elektrischen Wirkungsgrad zurückzuführen. Bei gleicher bereitgestellter Wärmemenge kann weniger Strom „gutgeschrieben“ werden. Dies führt zu der paradoxen Situation, dass ein höherer thermischer Wirkungsgrad eine negative Auswirkung auf die PE- und CEE-Reduktion hat. Aus der Perspektive der Systemdienlichkeit einer Anlage ist diese Schlussfolgerung jedoch nachvollziehbar, insbesondere für große KWK-Anlagen ab  $100 \text{ kW}_{el}$  mit Aufkommen des Redispatch 2.0 ab Oktober 2021.

Das LowEx Strom System hat darüber hinaus aufgrund der hohen Schaltzahlen den niedrigsten elektrischen Wirkungsgrad bei höherem thermischen Wirkungsgrad als das Referenzsystem. In der Folge sinkt die produzierte Strommenge je Einheit Wärme überproportional. Die in der obigen Auswertung gefundenen niedrigsten PE- und CEE-Einsparungen der Systeme sind hierauf zurückzuführen. Dies hebt hervor, dass eine intelligente Regelung nicht ausschließlich nach wirtschaftlichen Kriterien geführt werden, sondern auch die Anzahl der Schaltzahlen zugunsten zusammenhängender Laufzeiten möglichst gering halten sollte.

Die in den vorangegangenen Auswertungen ermittelten prozentualen Änderungen durch Einsatz der LowEx-Technologie im Vergleich zum Referenzsystem sind in Tabelle 6.10 zusammengefasst.

Generell kann PE und CO<sub>2</sub> eingespart werden, wenn LowEx-Technologie eingesetzt wird. Wird das BHKW stromgeführt betrieben, sind die Anlagenkonfiguration und die Anzahl der durch den Regler verursachten Schaltzahlen entscheidend, ob PE oder CO<sub>2</sub> eingespart werden kann.

**Tabelle 6.10:** Systemoptimierung bezüglich PE- und CEE-Einsparung – Median der prozentualen Veränderungen gegenüber dem Referenzsystem

	Prozentuale Änderungen ggü. Referenzsystem, %							
	$Q_{P,red}$				$m_{CO_2,red}$			
	Mit Nuk.		Ohne Nuk.		Mit Nuk.		Ohne Nuk.	
	EU28	DE	EU28	DE	EU28	DE	EU28	DE
LowEx Basis	3,8	3,8	3,8	3,8	3,6	3,9	3,9	3,8
LowEx Strom	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1	-1,3	-0,9	-0,9	-1,0

## 6.4 Zusammenfassung der statistischen Analyse

Die statistische Analyse der Simulationsergebnisse hat gezeigt, dass durch Einsatz eines LowEx-Systems deutliche Verbesserungen der Flexibilität und der Bruttoerträge gegenüber einem Gebäudeenergiesystem mit einer Standardanlage erreicht werden können. Weiterhin können der PE-Bedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden. Dies soll im Folgenden anhand von sechs Kombinationen aus Wohnfläche und Dämmstärke anschaulich zusammengefasst werden. Die folgenden Kombinationen werden betrachtet:

**Wohnfläche**  $A_{Wfl} = 1500 \text{ m}^2$  – Wärmeschutzverordnung 1984 mit  $d_{Ins} = 65\%$  und Passivhaus mit  $d_{Ins} = 200\%$

**Wohnfläche**  $A_{Wfl} = 4000 \text{ m}^2$  – EnEV 2009 mit  $d_{Ins} = 100\%$  und KFW 55 Effizienzhaus mit  $d_{Ins} = 150\%$

**Wohnfläche**  $A_{Wfl} = 8000 \text{ m}^2$  – Wärmeschutzverordnung 1984 mit  $d_{Ins} = 65\%$  und KFW 55 Effizienzhaus mit  $d_{Ins} = 150\%$

Die restlichen Parameter werden auf  $\theta_{ff,CHP} = 83^\circ\text{C}$ ,  $s = 0,5$ ,  $h_{ff,CHP} = 0\%$  und  $r_{conf} = 1$  festgelegt. Für jede dieser Kombinationen wird mittels Trust Region Reflective Algorithmus diejenige Konfiguration von TES-Volumen und BHKW-Leistung ermittelt, welche gleichzeitig die Regressionsmodelle für die verzögerte und die erzwungene Flexibilität auf die Zielwerte:

$$\tau_d = 9 \text{ h} \quad \text{und} \quad \tau_f = 11 \text{ h} \quad (6.1)$$

optimiert und dabei das TES-Volumen minimiert sowie die BHKW-Leistung maximiert. Bei diesen Zielwerten können nahezu unabhängig von der Anlagentechnik optimale Bruttoerträge erzielt sowie der PE-Bedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden. Die Ergebnisse dieser Optimierung sind für die verzögerte und erzwungene Flexibilität  $\tau_d$  und  $\tau_f$  sowie für die Bruttoerträge  $B$  in Tabelle 6.11 zusammengefasst. Tabelle 6.12 führt die Ergebnisse für die PE- und CEE-Reduktion für PE- und CEE-Faktoren nach dem GEG 2020 auf.

**Tabelle 6.11:** Flexibilität und Bruttoertrag bei Einsatz des Referenzsystems und der LowEx-Systeme für sechs Kombinationen aus Wohnfläche und Dämmstärke

Randbedingungen		Parameter		Zielgrößen							
$A_{Wfl}$	$d_{Ins}$	$\dot{Q}_{CHP}$	$V_{TES}$	$\tau_d / h$		$\tau_f / h$		$B / \text{€}/d$			
$/m^2$		$/kW$	$/m^3$	Ref.	LEB	Ref.	LEB	Ref.	LEB	LES	LEW
1500	WärmeschutzV 1984	15,8	1,7	5,8	9,0	17,8	11,0	8,3	13,0	10,7	24,2
1500	Passivhaus	9,4	0,6	4,3	9,0	9,4	11,0	5,4	8,4	9,7	14,1
4000	EnEV 2009	31,4	3,1	5,1	9,0	11,9	11,0	31,7	33,2	36,8	61,4
4000	KFW 55	26,2	2,1	4,6	9,0	8,7	11,0	25,7	28,8	31,4	44,3
8000	WärmeschutzV 1984	69,8	7,4	5,2	9,0	10,7	11,0	80,0	76,2	86,3	137,4
8000	KFW 55	49,1	4,1	4,5	9,0	5,5	11,0	62,1	61,6	69,6	99,2

**Tabelle 6.12:** PE-Einsparung und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Einsatz des Referenzsystems und der LowEx-Systeme für sechs Kombinationen aus Wohnfläche und Dämmstärke

Randbedingungen		Parameter		Zielgrößen					
$A_{Wfl}$	$d_{Ins}$	$\dot{Q}_{CHP}$	$V_{TES}$	$Q_{P,red} / \%$			$m_{CO_2,red} / \%$		
$/m^2$		$/kW$	$/m^3$	Ref.	LEB	LES	Ref.	LEB	LES
1500	WärmeschutzV 1984	15,8	1,7	33,3	39,8	32,7	23,6	30,7	22,3
1500	Passivhaus	9,4	0,6	23,9	28,4	23,9	7,9	12,4	7,6
4000	EnEV 2009	31,4	3,1	31,3	36,4	31,7	19,3	24,6	19,1
4000	KFW 55	26,2	2,1	27,4	31,8	28,1	13,0	17,4	13,4
8000	WärmeschutzV 1984	69,8	7,4	35,1	39,9	35,2	25,4	30,4	24,8
8000	KFW 55	49,1	4,1	27,5	31,1	29,0	13,1	16,7	14,3

Aus den Werten in Tabelle 6.11 geht hervor, dass der TES bei Einsatz der LowEx-TWE-Anlage selbst bei einem Gebäude mit 8000 m<sup>2</sup> und einem alten Baustandard nach Wärmeschutzverordnung 1984 nur 7,4 m<sup>3</sup> groß sein muss, um eine optimale Flexibilität von  $\tau_d = 9$  h und  $\tau_f = 11$  h bereitstellen zu können. Die zugehörige optimale Leistung des BHKWs liegt bei etwa  $\dot{Q}_{CHP} = 70$  kW. Das Referenzsystem erreicht bei dieser Konfiguration nur eine Flexibilität von 5,2 h und 10,7 h. Aufgrund des geringeren thermischen Wirkungsgrades des Referenzsystems, dies geht auch aus den geringeren PE- und CEE-Einsparungen hervor, kann bei der gleichen Menge an bereitgestellter Wärme jedoch mehr Strom produziert werden. Dadurch liegt der Bruttoertrag höher als beim LowEx Basis System. Hier kann eine Nutzung der Flexibilität mit stromgeführter Betriebsweise eine weitere Steigerung der Einnahmen herbeiführen.

Bei einem kleineren Mehrfamilienhaus mit 1500 m<sup>2</sup>, entsprechend ca. 15 bis 20 Wohneinheiten, ist der Aufwand zum Erreichen einer hohen Flexibilität in Relation zur Gebäudegröße höher. Mit dem Referenzsystem kann die angestrebte optimale verzögerte Flexibilität kaum erreicht werden. Das LowEx Basis System zeigt hingegen bei allen Zielgrößen, ausgenommen der erzwungenen Flexibilität, deutliche Verbesserungen. Die höhere erzwungene Flexibilität  $\tau_f$  des Referenzsystems ist jedoch nicht auf eine vorteilhafte Anlagentechnik zurückzuführen, sondern auf den geringeren thermischen Wirkungsgrad bei gleichem Wärmebedarf des Gebäudeenergiesystems. Aufgrund der zu geringen verzögerten Flexibilität  $\tau_d$  können die hohen Werte von  $\tau_f$  nicht für eine bezüglich Erträgen oder PE- und CEE-Einsparung optimierte Betriebsweise genutzt werden. Es zeigt sich, dass hierfür beide Flexibilitäten in ausreichendem Maße vorliegen müssen.

Der Blick auf die verschiedenen Dämmstandards des Gebäudes mit 4000 m<sup>2</sup> zeigt, dass der Vorteil der LowEx-TWE gegenüber dem Referenzsystem mit neuerem Dämmstandard steigt. Weiterhin steigen auch die Bruttoerträge der stromgeführten Betriebsweise mit dem Dämmstandard. Die Differenz zur PE-Einsparung und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen des LowEx Basis Systems nimmt ab. Auch die Bruttoerträge des Winterbetriebs nähern sich mit besserer Isolierung zunehmend den Werten des Sommerbetriebs an.

Es kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass der Vorteil eines LowEx-Systems bezüglich aller Zielgrößen mit steigendem Dämmstandard zunimmt. Weiterhin zeigt das LowEx-System insbesondere bei Mehrfamilienhäusern oder Quartieren mit weniger als 8000 m<sup>2</sup> Wohnfläche Vorteile gegenüber dem Referenzsystem. Bei noch größeren Gebäudeenergiesystemen muss der Dämmstandard auf dem Niveau eines KfW 55 Effizienzhauses liegen, um mit dem BHKW einer LowEx-Anlage höhere Bruttoerträge zu erzielen. Eine stromgeführte Betriebsweise des BHKWs lohnt sich insbesondere in gut gedämmten Gebäuden mit einer Größe ab 1500 m<sup>2</sup>.

Werden die Stromkennzahl  $s$  und die Vorlauftemperatur  $\dot{Q}_{CHP}$  in die Betrachtung mit einbezogen, kann der Einfluss der Parameter auf die Zielgrößen wie in Tabelle 6.13 zusammengefasst werden. Weitere Details sind der lokalen Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 6.2.2 zu entnehmen.

**Tabelle 6.13:** Einfluss der wichtigsten Parameter auf die Zielgrößen (→: gering, ↗: proportional, ↘: invers proportional, ↙: unterproportional, ↕: überproportional, ↖: invers unterproportional)

Zielgröße	Randbedingungen		Parameter				
	$A_{Wfl}$	$d_{Ins}$	$Sys$	$\dot{Q}_{CHP}$	$V_{TES}$	$s$	$\theta_{ff,CHP}$
$\tau_d$	↖	↗	↗	↖	↖	→	↗
$\tau_f$	↖	↘	↗	↘	↖	→	↖
$B$	↗	↘	↗	↖	↖	↕	→
$Q_{P,red}$ und $m_{CO_2,red}$	↖	↘	↗	↘	↖	↗	↘



## 7 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Optimierung der TWE-Anlagentechnik entscheidende Verbesserungen der Betriebscharakteristik eines Gebäudeenergiesystems bewirken kann. Insbesondere der Einsatz der LowEx-TWE-Technologie hat Vorteile gegenüber dem Referenzsystem, einem Speicherladesystem, bezüglich der Flexibilität, des Bruttoertrags sowie der PE-Einsparung und Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen gezeigt.

In Abgrenzung zu bisherigen Forschungsarbeiten bezüglich flexibler KWK-Anlagen wird in dieser Arbeit erstmals die TWE-Anlagentechnik als zu optimierender Faktor betrachtet und deren direkter Einfluss ermittelt. Weiterhin wurde Flexibilität in bisherigen Arbeiten zum Thema flexibler KWK in Gebäudeenergiesystemen üblicherweise als eine vorrangig regelungstechnische Komponente betrachtet. Verbesserungen der Flexibilität und deren Nutzung waren meist mit einer Optimierung der Anlage mittels modellprädiktiver Regler verbunden. Diese Arbeit zeigt auf, dass die nutzbare Flexibilität zu einem großen Teil von technisch-thermodynamischen Randbedingungen wie der Anlagentechnik bestimmt wird. Die Randbedingungen werden erläutert und das Optimierungspotential anhand dieser wird erklärt. Bei der Betrachtung des Nutzens, welcher aus der vorhandenen Flexibilität gezogen werden kann, werden bisherige modellprädiktive Ansätze mit der neuartigen Anlagentechnik verbunden.

Um die Ergebnisse herauszuarbeiten, wurde die LowEx-TWE-Anlagentechnik in einem Feldtest in einem Münchner Mehrfamilienhaus unter realen Einsatzbedingungen über zwei Jahre eingesetzt, optimiert und untersucht. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 zusammengefasst. Anschließend wurden die Messdaten in Kapitel 5 zur Validierung eines eigens für diesen Zweck programmierten Simulationsprogramms weiterverwendet. Ein Ergebnistransfer auf eine Vielzahl an Gebäudegrößen, Baustandards und weiteren Einflussgrößen wurde erreicht, indem Parametervariationen simuliert wurden. Die Ergebnisse einer detaillierten statistischen Analyse der wichtigsten Einflussgrößen auf die Flexibilität, die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit der simulierten Anlagen sowie deren Sensitivitäten werden in Kapitel 6 anhand einer Regressionsanalyse aufgezeigt.

### Feldtest

Anhand des Feldtests in einem Mehrfamilienhaus konnte gezeigt werden, dass die TWE nicht – wie häufig angenommen – hinderlich für den flexiblen und effizienten Betrieb eines BHKWs sein muss. Durch den Einsatz einer LowEx-TWE konnten eine hohe Flexibilität und Effizienz erzielt werden. Im Sommer liegt die verzögerte Flexibilität, das heißt die Zeit, in der das BHKW ausgeschaltet bleiben kann, bei 11 h bis 12,3 h und die erzwungene Flexibilität, die maximale Betriebszeit des BHKWs, bei 7,5 h bis 9,7 h. Dies wird durch eine effiziente Nutzung des Speichervolumens erreicht. Ohne zusätzliche Einbauten zur Stabilisierung der Schichtung werden an den Grenzschichten Temperaturgradienten von 150 K/m erreicht. Im unteren Speichersegment beträgt die Wassertemperatur im Mittel ungefähr 19 °C. Vergleichbare Werte üblicher Speicher liegen bei 20 K/m bis maximal 50 K/m bei Minimaltemperaturen von durchschnittlich 55 °C.

Das BHKW stellt im Jahresmittel 76,5 % des Wärmebedarfs inklusive der Raumheizung zur Verfügung.

Ein dem BHKW nachgeschalteter Abgas-Wärmeübertrager nutzt das kalte Wasser aus dem Speicher, um die Wärmeauskopplung um 16 % zu steigern. Bezüglich des Heizwerts steigt der Gesamtwirkungsgrad des BHKWs um 11 %. Eine weitere Steigerung der Effizienz wäre durch eine Erhöhung des Wassermassenstroms möglich. Darauf wird zugunsten einer hohen Flexibilität verzichtet.

Im Winter wird derzeit aus wirtschaftlichen Gründen keine Flexibilität zur Verfügung gestellt. Dies kann jedoch durch eine Umschaltung der Regelung erfolgen, um zum Beispiel neuen Anforderungen des KWKG, wie einer Begrenzung der jährlichen förderfähigen Vollbenutzungsstunden auf 3500 VBh, gerecht zu werden.

## Simulation

Für den Transfer der Ergebnisse des Feldtests und den Vergleich zu einer Standardanlage wurde eine Simulation mit Parametervariation durchgeführt. Um den speziellen Anforderungen der Simulation von TWE-Anlagen gerecht zu werden, wurde ein eigens hierauf abgestimmtes Simulationsprogramm programmiert. Dieses steht auf GitHub frei zur Verfügung [129].

Das Programm und die darin aufgebaute Anlagentechnik wurde in zwei Schritten nach den Richtlinien ANSI/BPI-2400-S-2015 validiert. Anhand von hochaufgelösten Labormessdaten konnte die Validierung des Speichers und der TWE-Anlage erfolgreich abgeschlossen werden. Die Validierung der Wärmeversorgung über ein BHKW wurde mittels Messdaten aus dem Feldtest realisiert.

Die anschließende Parametervariation wurde mit Latin Hypercube Sampling, einer Methode der statistischen Versuchsplanung, ausgelegt, um eine hohe Erklärbarkeit der Varianz bei einer möglichst geringen Anzahl an Simulationen zu erreichen. Es resultierten 541 Simulationen über ein Zeitfenster von jeweils 15 Tagen. Zusätzlich zur Anlagentechnik wurden acht Parameter wie die Gebäudegröße, der Dämmstandard, die BHKW-Leistung und das Speichervolumen variiert.

## Statistische Modellierung

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte aufgrund der Komplexität der Einflussgrößen anhand einer statistischen Modellierung der Zusammenhänge. Für jede der Zielgrößen – der verzögerten und erzwungenen Flexibilität, dem Bruttoertrag, der Primärenergie-Einsparung und der Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen – wurde mittels Methoden des maschinellen Lernens ein Regressionsmodell berechnet. Anschließend wurden eine globale und lokale Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die wichtigsten Parameter und deren Einfluss zu ermitteln. Für den Vergleich zwischen den Anlagensystemen wurden die Wohnfläche und der Dämmstandard der Gebäudeenergiesysteme als Randbedingungen definiert und optimale Anlagenkonfigurationen für die jeweiligen Randbedingungen ermittelt.

Dabei konnte gezeigt werden, dass die Anlagentechnik, die BHKW-Leistung und das Speichervolumen die wichtigsten Parameter sind. Die Einflüsse der Vorlauftemperatur und der Anschlusspositionen am Speicher waren vernachlässigbar, die Aufteilung des Rücklaufs auf mehrere Anschlüsse bei gut gedämmten Gebäuden sogar kontraproduktiv. Eine höhere Stromkennzahl führt zu höheren Erträgen sowie Reduktionen des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

**Flexibilität** Der Einsatz der LowEx-TWE führt in allen Fällen zu einer signifikanten Steigerung der verzögerten Flexibilität. Gegenüber einem Speicherladesystem beträgt die Verbesserung im Median 48 %. Die erzwungene Flexibilität kann bei Gebäuden mit Dämmstandard neuer als EnEV 2009 mittels LowEx-TWE gesteigert werden. Bei älteren Gebäuden muss der Speicher ausreichend groß sein, zum Beispiel



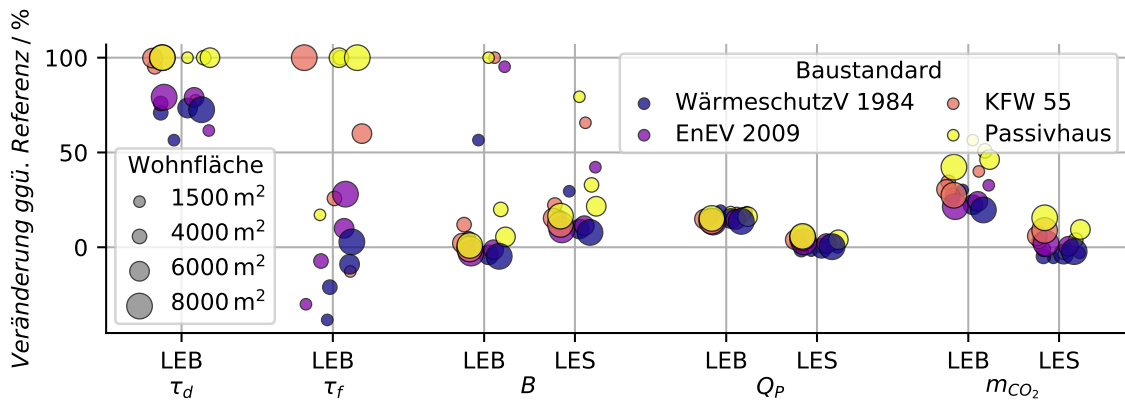
mindestens  $2 \text{ m}^3$  bis  $3 \text{ m}^3$  bei  $3000 \text{ m}^2$  Wohnfläche. Bei kleineren Speichern überwiegt der Einfluss des geringeren thermischen BHKW-Wirkungsgrades bei Standardsystemen, wodurch die Beladung des Speichers bei gleicher Nennleistung länger dauert. Ist keine Steigerung der Flexibilität gewünscht, kann mit dem LowEx-System der Speicher kleiner und/oder das BHKW größer dimensioniert werden.

**Bruttoertrag** Der Bruttoertrag steigt bei Einsatz eines LowEx-Systems in jedem Fall. Der Median der Verbesserungen über alle Fälle liegt bei 9 %. Zudem wird zum Erreichen der höheren Erträge ein geringeres Speichervolumen benötigt. Das BHKW kann, falls gewünscht, größer ausgelegt werden. Der Einsatz eines mittels modellprädiktivem Regler stromgeführten BHKWs führt zu einer weiteren Steigerung von 12 % beziehungsweise 23 % gegenüber einem Standardsystem. Der Einsatz eines stromgeführten BHKWs ist jedoch erst ab einer Wohnfläche von mehr als  $1500 \text{ m}^2$  wirtschaftlicher, darunter überwiegen höhere Instandhaltungskosten.

**Primärenergiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen** Durch Einsatz der LowEx-TWE sinken der Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei allen Gebäudegrößen und Dämmstandards. Eine Berechnung mit Primärenergiefaktoren nach EnEV ergibt eine Einsparung von 15 % im Median gegenüber einem Standardsystem. Die Auswertung für andere EU28-Staaten mit und ohne Nuklearenergie zeigt, dass die Einsparung umso höher ist, je höher der Anteil an Nuklearenergie ist. Dies gilt nicht für die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Hier sinkt die Einsparung mit einem hohen Anteil an Nuklearenergie. Bei sehr hohen Anteilen, etwa in Frankreich, wird durch Einsatz eines BHKWs zusätzliches CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Ein Standardsystem stößt dennoch mehr CO<sub>2</sub> aus als ein LowEx-System. Für den deutschen Strommix können mit dem LowEx-System im Median 24 % CO<sub>2</sub> eingespart werden. Die stromgeführte Betriebsweise hat hingegen einen neutralen bis negativen Einfluss auf den Primärenergiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen, da in das Netz eingespeister Strom nach der KWK-Stromgutschriftmethode besser bewertet wird als eigenverbraucher oder aus dem Versorgungsnetz bezogener Strom.

**Zusammenfassung** Die prozentualen Verbesserungen durch Einsatz des LowEx-TWE-Systems gegenüber dem Referenzsystem werden in Abb. 7.1 für 16 Kombinationen aus vier Wohnflächen und Dämmstandards zusammengefasst. Für jede Kombination wurde die Anlagentechnik für eine verzögerte Flexibilität von 9 h und eine erzwungene Flexibilität von 11 h optimiert. Diese Werte haben sich als optimal für den Bruttoertrag herausgestellt. Werte über 100 % werden abgeschnitten. Signifikante Steigerungen der verzögerten Flexibilität sind zu erkennen. Die erzwungene Flexibilität kann bei älteren Gebäuden geringer ausfallen, da eine hohe BHKW-Leistung ein Optimierungsziel ist und das LowEx-System höhere Leistungen zulässt. Im Mittel kann mit dem LowEx-System eine Steigerung des Bruttoertrags erreicht werden. Bei Einsatz eines stromgeführten Systems liegt die Verbesserung bei mindestens 8 %. Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen werden mit einer wärmegeführten LowEx-TWE um mindestens 14 % beziehungsweise 19 % reduziert. Eine Stromführung des BHKWs resultiert nur dann in Reduktionen, wenn das Gebäude nach EnEV oder neuer gedämmt ist.

Einschränkungen gelten diesbezüglich bei sehr alten Gebäuden. Hier muss der Speicher ein Mindestvolumen haben, um eine Verbesserung gegenüber dem Standardsystem zu bewirken. Bei einer Wohnfläche von  $3000 \text{ m}^2$  sollte dieses mindestens  $2 \text{ m}^3$  bis  $3 \text{ m}^3$  betragen. Weiterhin hat die Installation zusätzlicher Anschlüsse nur bei Gebäuden mit einem Dämmstandard vor Einführung der EnEV einen positiven Einfluss, bei neueren Gebäuden kann eine Verschlechterung insbesondere der Effizienz resultieren. Aufgrund der hohen Kosten und Komplexität, des zusätzlichen Regelungsaufwands und der höheren Wärmeverluste sollte eine Aufteilung der Rückläufe daher nur in besonderen Fällen erfolgen.



**Abbildung 7.1:** Zusammenfassung der prozentualen Veränderung durch Einsatz des LowEx-Systems gegenüber einem Referenzsystem für die Flexibilität  $\tau$ , den Bruttoertrag  $B$ , die PE-Einsparung  $Q_{P,red}$  und die  $CO_2$ -Einsparung  $m_{CO_2,red}$  (LEB: LowEx Basis, LES: LowEx stromgeführt)

Es konnte gezeigt werden, dass der Einsatz einer LowEx-TWE-Anlage nicht nur bei modernen Gebäuden mit einem hohen Anteil der TWE am gesamten Wärmebedarf vorteilhaft ist, sondern in nahezu allen Fällen zu einer gesteigerten Flexibilität, höheren Bruttoerträgen und größeren Reduktionen des Primärenergiebedarfs und der  $CO_2$ -Emissionen führt. Zudem können mit dem LowEx-System kleinere Speicher oder größere BHKWs verbaut werden, ohne den Anlagenbetrieb negativ zu beeinflussen. Dadurch sinken die Kosten für das LowEx-System insbesondere bei größeren Gebäuden. Weiterhin ist das System weniger anfällig für fehlerhafte Dimensionierungen der Komponenten.

## 7.1 Ausblick

Das LowEx-TWE-System resultiert in den meisten Fällen in einer Verbesserung aller wichtigen Betriebsparameter eines Gebäudeenergiesystems, insbesondere der Flexibilität der Anlage. Aktuelle Gesetzesentwürfe sehen vor, dass in Zukunft auch die Flexibilität kleiner Anlagen belohnt wird, um den weiter ansteigenden Anteil der erneuerbaren Energien ausgleichen zu können.

Zur Sanktionierung ungeregelter und auf konstanten Dauerbetrieb ausgelegter Anlagen sieht das KWKG 2020 vor, dass die Anzahl der förderfähigen Vollbetriebsstunden schrittweise bis 2025 auf 3500 VBh/a reduziert wird. Anlagen ohne ausreichende Flexibilität werden folglich eine verringerte Vergütung erhalten. Auch die Integration innovativer KWK-Anlagen, der iKWK, erfordert eine hohe Flexibilität, um die Einbindung erneuerbarer Energien und elektrischer Wärmeerzeuger in das Gebäudeenergiesystem zu ermöglichen.

Mit Einführung des Redispatch 2.0 ab Oktober 2021 wird es notwendig, dass KWK-Anlagen ab 100 kW<sub>el</sub> auf die Anforderungen des Netzes reagieren können, um erneuerbaren Energien Vorrang zu gewähren. Auch dies setzt eine hohe Flexibilität voraus, um die Produktionszeiten ausreichend planen zu können. In Anbetracht der anstehenden Novellierungen und der prognostizierten Wandlung des Energiesystems kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf an flexiblen KWK-Anlagen in den nächsten Jahren weiter steigen wird. LowEx-Systeme, welche in der Lage sind die Flexibilität zu steigern, werden zunehmend an Bedeutung gewinnen, sofern zusätzliche wirtschaftliche Anreize für flexible Anlagen gestellt werden.

## Literatur

- [1] „Energy and climate change, world energy outlook special report“, International Energy Agency IEA, Techn. Ber., 2015.
- [2] BMWi, *Die Energiewende in Deutschland - Mit sicherer, bezahlbarer und umweltschonender Energie ins Jahr 2050*, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2012.
- [3] F. Hein, J. Herreiner, P. Graichen et al., „Die Energiewende im Corona-Jahr: Stand der Dinge 2020“, Agora Energiewende, Techn. Ber., 5. Jan. 2021.
- [4] L. Hirth und I. Ziegenhagen, „Balancing power and variable renewables: Three links“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 50, S. 1035–1051, 2015, issn: 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.180>.
- [5] T. Kern. „European day-ahead electricity prices in 2020“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft mbH. (Jan. 2021), Adresse: [https://www.ffegmbh.de/kompetenzen/wissenschaftliche-analysen-system-und-energiemaerkte/strommarkt/1041-european-day-ahead-electricity-prices-in-2020#\\_ftn2](https://www.ffegmbh.de/kompetenzen/wissenschaftliche-analysen-system-und-energiemaerkte/strommarkt/1041-european-day-ahead-electricity-prices-in-2020#_ftn2) (besucht am 31.01.2021).
- [6] L. Carr, J. Habermann und T. Schmid, „Bayernplan - Flexibilisierter Einsatz von Biogas zur Stromerzeugung“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Techn. Ber., 2012.
- [7] Y. V. Makarov, P. Du, M. C. W. Kintner-Meyer et al., „Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources“, English, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Jg. 3, Nr. 1, S. 34–40, 2012, issn: 1949-3029. doi: 10.1109/TSTE.2011.2164101.
- [8] M. Huber, D. Dimkova und T. Hamacher, „Integration of wind and solar power in Europe: Assessment of flexibility requirements“, *Energy*, Jg. 69, S. 236–246, 2014, issn: 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.109>.
- [9] T. Aigner, S. Jaehnert, G. L. Doorman et al., „The Effect of Large-Scale Wind Power on System Balancing in Northern Europe“, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Jg. 3, Nr. 4, S. 751–759, Okt. 2012, issn: 1949-3029. doi: 10.1109/TSTE.2012.2203157.
- [10] L. Hirth, „The benefits of flexibility: The value of wind energy with hydropower“, *Applied Energy*, Jg. 181, S. 210–223, 2016, issn: 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.039>.
- [11] A. D. Mills und R. H. Wiser, „Changes in the economic value of wind energy and flexible resources at increasing penetration levels in the Rocky Mountain Power Area“, *Wind Energy*, Jg. 17, Nr. 11, S. 1711–1726, 2014. doi: 10.1002/we.1663.
- [12] Fraunhofer ISE, „Effekte regional verteilter sowie Ost-/West-ausgerichteter Solarstromanlagen“, Techn. Ber., 2014.
- [13] M. Houwing, R. R. Negenborn und B. De Schutter, „Demand Response With Micro-CHP Systems“, *Proceedings of the IEEE*, Jg. 99, Nr. 1, S. 200–213, Jan. 2011, issn: 0018-9219. doi: 10.1109/JPR0C.2010.2053831.
- [14] M. Houwing, G. Papaefthymiou, P. W. Heijnen et al., „Balancing wind power with virtual power plants of micro-CHPs“, in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Juni 2009, S. 1–7. doi: 10.1109/PTC.2009.5282056.
- [15] A. D. Hawkes und M. A. Leach, „Cost-effective operating strategy for residential micro-combined heat and power“, *Energy*, Jg. 32, Nr. 5, S. 711–723, 2007, issn: 0360-5442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.001>.
- [16] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola et al., „Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 45, S. 785–807, 2015, Abb.: *Renew. Sust. Energ. Rev. IEEE Abb.: Renew. Sustain. Energy Rev.*, issn: 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>.

- [17] H. I. Onowwiona und V. I. Ugursal, „Residential cogeneration systems: review of the current technology“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 10, Nr. 5, S. 389–431, 2006, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.07.005>.
- [18] GE Power. „World's Most Efficient Combined-Cycle Power Plant | GE Power“. (27. März 2018), Adresse: <https://www.ge.com/power/about/insights/articles/2018/03/nishi-nagoya-efficiency-record> (besucht am 31.01.2021).
- [19] M. Abunku und W. J. C. Melis, „Modelling of a CHP system with electrical and thermal storage“, in *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Sep. 2015, S. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339926.
- [20] S. Ø. Jensen, A. Marszal-Pomianowska, R. Lollini et al., „IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings“, *Energy and Buildings*, Jg. 155, S. 25–34, 2017, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.044>.
- [21] F. J. Ziegler, J. Zeisberger, J. Spanning et al., „Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben LowEx-Fernwärme-Systeme“, Hochschule München, Stadtwerke München, EBERT Ingenieure, Techn. Ber., 2014.
- [22] J. Elfner, J. Zeisberger und F. J. Ziegler, „Entwicklung und Optimierung hocheffizienter Trinkwassererwärmungssysteme für Wohn- und Hotelgebäude (HochEff-TWE)“, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Techn. Ber., 30. Juni 2020.
- [23] G. Schaumann und K. W. Schmitz, *Kraft-Wärme-Kopplung*, 4. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, 456 S., ISBN: 978-3-642-01425-3. DOI: 10.1007/978-3-642-01425-3.
- [24] H. Falkenberg, E.-M. Klotz, M. Koepf et al., „Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung - Analysen zur Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“, Prognos AG, Fraunhofer IFAM, Öko-Institut e.V., BHKW-Consult, Stiftung Umweltenergierecht, Techn. Ber., 25. Apr. 2019.
- [25] S. Briem, R. Beckers, R. Bunkus et al., „Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland“, Umweltbundesamt, Techn. Ber., 1. Nov. 2020, ISBN: 2363-829X.
- [26] D. Bundestag, *Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Wirtschaft und Energie (9. Ausschuss) - Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes*, Drucksache 18/6910, Dez. 2015.
- [27] S. Gores, L. Emele, R. Harthan et al., „Methodenpapier zur Bewertung von KWK-Anlagen in mittelfristiger Perspektive bis 2030“, Öko-Institut e.V., Techn. Ber., 17. Juli 2015.
- [28] BAFA Ref 526, *Zugelassene KWK-Anlagen 2009 bis 2019*, 1. Juli 2020.
- [29] EuroAmerica, Ishiyaku, „The Power of Transformation: Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems“, IEA, 2014.
- [30] A. M. Foley, P. G. Leahy, K. Li et al., „A long-term analysis of pumped hydro storage to firm wind power“, *Applied Energy*, Jg. 137, S. 638–648, 2015, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.020>.
- [31] A. D. Mills und R. H. Wiser, „Strategies to mitigate declines in the economic value of wind and solar at high penetration in California“, *Applied Energy*, Jg. 147, S. 269–278, 2015, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.014>.
- [32] L. Hirth, „The market value of variable renewables: The effect of solar wind power variability on their relative price“, *Energy Economics*, Jg. 38, S. 218–236, 2013, ISSN: 0140-9883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.02.004>.
- [33] L. Saarinen, N. Dahlbäck und U. Lundin, „Power system flexibility need induced by wind and solar power intermittency on time scales of 1-14 days“, *Renewable Energy*, Jg. 83, S. 339–344, 2015, ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.048>.
- [34] A. S. Brouwer, M. van den Broek, W. Zappa et al., „Least-cost options for integrating intermittent renewables in low-carbon power systems“, *Applied Energy*, Jg. 161, S. 48–74, 2016, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.090>.
- [35] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis et al., „Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating“, *Applied Energy*, Jg. 104, S. 583–591, 2013, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.029>.

- [36] M. Pehnt, M. Cames, C. Fischer et al., *Micro Cogeneration - Towards Decentralized Energy Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, 346 S., ISBN: 978-3-540-25582-6. DOI: 10.1007/3-540-30821-0.
- [37] R. Possidente, C. Roselli, M. Sasso et al., „Experimental analysis of micro-cogeneration units based on reciprocating internal combustion engine“, *Energy and Buildings*, Jg. 38, Nr. 12, S. 1417–1422, 2006, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.022>.
- [38] D. Haeseldonckx, L. Peeters, L. Helsen et al., „The impact of thermal storage on the operational behaviour of residential {CHP} facilities and the overall {CO<sub>2</sub>} emissions“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 11, Nr. 6, S. 1227–1243, 2007, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.09.004>.
- [39] G. Streckienė, V. Martinaitis, A. N. Andersen et al., „Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market“, *Applied Energy*, Jg. 86, Nr. 11, S. 2308–2316, 2009, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.023>.
- [40] S. Ø. Jensen, „Energy in Buildings and Communities Programme - Annex 67 Energy Flexible Buildings - Summary report“, International Energy Agency, Techn. Ber., 1. Dez. 2019.
- [41] I. Stadler, „Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response“, *Utilities Policy*, Jg. 16, Nr. 2, S. 90–98, 2008, Sustainable Energy and Transportation Systems, ISSN: 0957-1787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.006>.
- [42] C. Evens und S. Kärkkäinen, „Pricing models and mechanisms for the promotion of demand side integration“, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Forschungsber. VTT-R-06388-09, 2009.
- [43] R. D. Coninck, R. Baetens, D. Saelens et al., „Rule-based demand-side management of domestic hot water production with heat pumps in zero energy neighbourhoods“, *Journal of Building Performance Simulation*, Jg. 7, Nr. 4, S. 271–288, 2014. DOI: 10.1080/19401493.2013.801518.
- [44] R. D’hulst, W. Labeeuw, B. Beusen et al., „Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium“, *Applied Energy*, Jg. 155, S. 79–90, 2015, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.101>.
- [45] K. Rühling, J. Löser, S. Hoppe et al., „Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasserinstallation - Erkenntnisse eines Verbundvorhabens“, *EuroHeat&Power*, Jg. 12, S. 26–31, 2017.
- [46] F. J. Ziegler und J. Zeisberger, „Fernwärme effizient nutzen - Optimierte Kundenanlagen ermöglichen eine effiziente Nutzung regenerativer Wärmequellen“, BINE Informationsdienst, Techn. Ber. 14, 2015.
- [47] J. Elfner, J. Zeisberger und F. J. Ziegler, „Feldtest innovativer LowEx-Trinkwassererwärmung zur Steigerung der Effizienz von Gas-Brennwerttechnik“, in *BauSIM2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz*, Sep. 2018, S. 132–138.
- [48] J. Elfner, J. Zeisberger und F. J. Ziegler, „Performance analysis of efficiency calculation methods for heat production units by use of long-term measurement data“, in *ECOS 2019 - Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, W. Stanek, P. Gladysz, S. Werle et al., Hrsg., Juni 2019, S. 3171–3182, ISBN: 978-83-61506-51-5.
- [49] J. Elfner und F. J. Ziegler, „Improving thermal energy storage capacity and flexibility of residential energy systems by return flow optimization: A field test“, in *ECOS 2020 - Proceedings of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Osaka, Japan, 30. Juni 2020, S. 1423–1434.
- [50] W. Burkhardt und R. Kraus, *Projektierung von Warmwasserheizungen*. Oldenburg Industrieverlag GmbH, 2011.
- [51] J. Zeisberger, „Beitrag zur energieeffizienten Trinkwassererwärmung - Messtechnische Untersuchungen zur Bewertung und Optimierung von Trinkwassererwärmungssystemen“, Dissertation, Technische Universität München, München, 2017.
- [52] S. Henke, T. Kröper, J. Spannig et al., „EnEff:Wärme - LowEx-Systeme: Breitenanwendung von Niedertemperatur-Systemen für eine nachhaltige Wärmeversorgung: Abschlussbericht“, *AGFW Forschung und Entwicklung*, Nr. 3899990544, 2015.
- [53] F. Goia, K. Simo, S. Ø. Jensen et al., „Energy in Buildings and Communities Programme - Annex 67 Energy Flexible Buildings - Experimental facilities and methods for assessing energy flexibility in buildings“, International Energy Agency, Techn. Ber., Juni 2019, ISBN: 978-87-93250-07-9.

- [54] H. I. Onovwiona, V. I. Ugursal und A. S. Fung, „Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications“, *Applied Thermal Engineering*, Jg. 27, Nr. 5, S. 848–861, 2007, issn: 1359-4311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.09.014>.
- [55] M. L. Ferrari, M. Pascenti, A. Sorace et al., „Real-time tool for management of smart polygeneration grids including thermal energy storage“, *Applied Energy*, Jg. 130, S. 670–678, 2014, issn: 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.025>.
- [56] C. Shao, Y. Ding, J. Wang et al., „Modeling and Integration of Flexible Demand in Heat and Electricity Integrated Energy System“, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Jg. 9, Nr. 1, S. 361–370, Jan. 2018, issn: 1949-3029. doi: 10.1109/TSTE.2017.2731786.
- [57] I. Dincer und M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [58] J. Zeisberger, „Contribution to energy efficient drinking water heating“, Dissertation, Technical University of Munich, Munich, 2017.
- [59] Y. V. Makarov, C. Loutan, J. Ma et al., „Operational Impacts of Wind Generation on California Power Systems“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Jg. 24, Nr. 2, S. 1039–1050, Mai 2009, issn: 0885-8950. doi: 10.1109/TPWRS.2009.2016364.
- [60] A. Ulbig und G. Andersson, „On operational flexibility in power systems“, in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Juli 2012, S. 1–8. doi: 10.1109/PESGM.2012.6344676.
- [61] A. Ulbig und G. Andersson, „Analyzing operational flexibility of electric power systems“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Jg. 72, S. 155–164, 2015, The Special Issue for 18th Power Systems Computation Conference., issn: 0142-0615. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.02.028>.
- [62] S. Stinner, K. Huchtemann und D. Müller, „Quantifying the operational flexibility of building energy systems with thermal energy storages“, English, *Applied Energy*, Jg. 181, S. 140–154, 2016, cited By 1, issn: 0306-2619. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.055.
- [63] A. Piacentino und C. Barbaro, „A comprehensive tool for efficient design and operation of polygeneration-based energy mu-grids serving a cluster of buildings. Part II: Analysis of the applicative potential“, *Applied Energy*, Jg. 111, S. 1222–1238, 2013, issn: 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.079>.
- [64] G. Reynders, R. A. Lopes, A. Marszal-Pomianowska et al., „Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage“, *Energy and Buildings*, Jg. 166, S. 372–390, 2018, issn: 0378-7788. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.040>.
- [65] R. De Coninck und L. Helsen, „Quantification of flexibility in buildings by cost curves - Methodology and application“, *Applied Energy*, Jg. 162, S. 653–665, 2016, issn: 0306-2619. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.114>.
- [66] U. Wehmhörner, „Multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen“, Diss., Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2012.
- [67] R. Huhn, „Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten“, Diss., Technische Universität Dresden, Dresden, 28. März 2007.
- [68] J.-B. Lee, C.-H. Jung und S.-H. Lyu, „A daily operation scheduling of cogeneration systems using fuzzy linear programming“, in *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*, Bd. 2, Juli 1999, S. 983–988. doi: 10.1109/PSS.1999.787450.
- [69] B. Rolfsman, „Combined heat-and-power plants and district heating in a deregulated electricity market“, *Applied Energy*, Jg. 78, Nr. 1, S. 37–52, 2004, issn: 0306-2619. doi: [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00098-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00098-9).
- [70] H. Kondziella und T. Bruckner, „Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems – a review of research results and methodologies“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 53, S. 10–22, 2016, issn: 1364-0321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.199>.
- [71] N. Blaauwbroek, P. H. Nguyen, M. J. Konsman et al., „Decentralized Resource Allocation and Load Scheduling for Multicommodity Smart Energy Systems“, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Jg. 6, Nr. 4, S. 1506–1514, Okt. 2015, issn: 1949-3029. doi: 10.1109/TSTE.2015.2441107.

- [72] K. Rühling, J. Loser, S. Hoppe et al., „Findings of a joint project: Energy efficiency and hygiene in the drinking water installation [Erkenntnisse eines Verbundvorhabens: Energieeffizienz und Hygiene in der Trinkwasserinstallation]“, English; German, *Euroheat and Power/Fernwärme International*, Jg. 46, Nr. 12, S. 26–31, 2017, cited By 1, ISSN: 0949166X.
- [73] M. Rady, „Thermal performance of packed bed thermal energy storage units using multiple granular phase change composites“, *Applied Energy*, Jg. 86, Nr. 12, S. 2704–2720, 2009, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.027>.
- [74] *Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*, German, VDI - Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, Sep. 2012.
- [75] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, *BAnz AT 29.12.2014 B5 - Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kWel (Mini-KWK-Richtlinie)*, 15. Dez. 2014.
- [76] *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017)*, Dez. 2016.
- [77] Bundesregierung Deutschland, *Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgeltverordnung - StromNEV)*, Dez. 2016.
- [78] S. Schubert und M. Härdtlein, „Mini-/Mikro-KWK in städtischen Energiesystemen - Eine Analyse von Herausforderungen und Erfolgsfaktoren“, *Techn. Ber.*, 2016.
- [79] ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., *BHKW-Kenndaten 2014/15*, 22. Okt. 2014.
- [80] Bundesregierung Deutschland, *Energiesteuergesetz (EnergieStG)*, 15. Juli 2006.
- [81] *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*, German, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Sep. 2018.
- [82] B. Deutschland, *Energieeinsparverordnung*, 1. Jan. 2016.
- [83] —, *Gebäudeenergiegesetz*, 8. Aug. 2020.
- [84] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., *Arbeitsblatt AGFW FW 309 - Energetische Bewertung von Fernwärme und Fernkälte - Teil 1: Primärenergie- und Emissionsfaktoren nach Stromgutmethode*, Nov. 2020.
- [85] P. Icha und G. Kuhs, „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019“, Umweltbundesamt, Germany, Dessau-Roßlau, *Techn. Ber. Climate Change - 13/2020*, Apr. 2020.
- [86] E.-M. Klotz, M. Koepp und G. Steudle, „Maßnahmen zur nachhaltigen Integration von Systemen zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung in das neue Energieversorgungssystem“, Prognos AG, *Techn. Ber.*, 11. Juli 2013.
- [87] B. Kleinertz, C. Pelling, S. von Roon et al., „EU Displacement Mix - A Simplified Marginal Method to Determine Environmental Factors for Technologies Coupling Heat and Power in the European Union“, Research Center for Energy Economics, Germany, Munich, *Forschungsber. Cogen-01*, Mai 2018, ISBN 978-3-941802-39-1.
- [88] P. Pfeifroth und M. Beer, „Primärenergetische Bewertung von Fernwärme aus KWK“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), *Techn. Ber.*, Juni 2009.
- [89] V. Dorer und A. Weber, „Performance Assessment of Residential Cogeneration Systems in Switzerland, Annex 42 - Subtask C“, International Energy Agency - Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, *Techn. Ber.*, 2008.
- [90] E. Hairer, S. P. Nørsett und G. Wanner, *Solving Ordinary Differential Equations I - Nonstiff Problems*, Ser. Springer Series in Computational Mathematics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993, 528 S., ISBN: 978-3-540-56670-0. DOI: 10.1007/978-3-540-78862-1.
- [91] E. Hairer und G. Wanner, *Solving Ordinary Differential Equations II - Stiff and Differential-Algebraic Problems*, Ser. Springer Series in Computational Mathematics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996, 614 S., ISBN: 978-3-540-56670-0. DOI: 10.1007/978-3-642-05221-7.

- [92] P. Knabner und L. Angerman, *Numerical Methods for Elliptic and Parabolic Partial Differential Equations*, Ser. Texts in Applied Mathematics. Springer-Verlag New York, 2003, 426 S., ISBN: 978-0-387-95449-3. DOI: 10.1007/b97419.
- [93] E. Fermi, P. Pasta, S. Ulam et al., „Studies of the nonlinear problems“, Los Alamos Scientific Lab., New Mexico, USA, Techn. Ber., 1955.
- [94] B. S. Jovanović und E. Süli, *Analysis of Finite Difference Schemes - For Linear Partial Differential Equations with Generalized Solutions*, Ser. Springer Series in Computational Mathematics. Springer-Verlag London, 2014, 408 S., ISBN: 978-1-4471-5459-4. DOI: 10.1007/978-1-4471-5460-0.
- [95] G. B. Folland, *Introduction to partial differential equations*, Ser. Mathematical Notes. Princeton University Press, 1995, Bd. 102, ISBN: 978-0-691-21303-3. DOI: <https://doi.org/10.1515/9780691213033>.
- [96] G. G. Dahlquist, „A special stability problem for linear multistep methods“, *BIT Numerical Mathematics*, Jg. 3, Nr. 1, S. 27–43, März 1963, issn: 1572-9125. DOI: 10.1007/BF01963532.
- [97] C. Runge, „Über die numerische Auflösung von Differentialgleichungen“, *Mathematische Annalen*, 1869.
- [98] P. Deuffhard und A. Hohmann, *Numerische Mathematik 1: Eine algorithmisch orientierte Einführung*. Berlin, Boston: De Gruyter, 17. Dez. 2018, ISBN: 978-3-11-061432-9. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110614329>.
- [99] P. D. Lax und R. D. Richtmyer, „Survey of the stability of linear finite difference equations“, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Jg. 9, Nr. 2, S. 267–293, 1956, issn: 1097-0312. DOI: 10.1002/cpa.3160090206.
- [100] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Ltd, 29. März 2013, ISBN: 9781118671627. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118671627>.
- [101] D. R. Poirier und G. H. Geiger, „Conduction of Heat in Solids“, in *Transport Phenomena in Materials Processing*. Chambridge: Springer International Publishing, 2016, S. 281–327, ISBN: 978-3-319-48090-9. DOI: 10.1007/978-3-319-48090-9\_9.
- [102] G. Upton und I. Cook, *A Dictionary of Statistics*. Oxford University Press, 2014, ISBN: 9780199679188. DOI: 10.1093/acref/9780199679188.001.0001.
- [103] ANSI und BPI, „ANSI/BPI-2400-S-2015 Standard Practice for Standardized Qualification of Whole-House Energy Savings Predictions by Calibration to Energy use History“, Building Performance Institute, Techn. Ber., 2015.
- [104] J. Wooldridge, *Introductory Econometrics - A Modern Approach*. Cengage Learning, 8. Okt. 2015, ISBN: 978-1-305-27010-7.
- [105] D. A. Belsley, *Conditioning Diagnostics: Collinearity and Weak Data in Regression*, eng. New York (N.Y.) : Wiley, 1991.
- [106] D. A. Freedman, *Statistical Models: Theory and Practice*. University of California, Berkeley: Cambridge University Press, 1. Juni 2009, 458 S., ISBN: 9780521743853.
- [107] T. Hastie, R. Tibshirani und J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction*, Ser. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag New York, 2009, ISBN: 978-0-387-84857-0. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.
- [108] G. V. Trunk, „A Problem of Dimensionality: A Simple Example“, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. PAMI-1, Nr. 3, S. 306–307, Juli 1979. DOI: 10.1109/TPAMI.1979.4766926.
- [109] S. Theodoridis und K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*, 4. Aufl. Boston, MA, USA: Academic Press, 2009, S. 984, ISBN: 9781597492720. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-59749-272-0.X0001-2>.
- [110] A. Afifi, S. May, R. Donatello et al., *Practical Multivariate Analysis*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 7. Okt. 2019, ISBN: 9781138702226.
- [111] G. E. P. Box und D. R. Cox, „An Analysis of Transformations“, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, Jg. 26, Nr. 2, S. 211–243, 1964. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x.
- [112] R. Tibshirani, „Regression Shrinkage and Selection via the Lasso“, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Statistical Methodology)*, Jg. 58, Nr. 1, S. 267–288, 1996, issn: 00359246. DOI: 10.2307/2346178.
- [113] A. N. Tikhonov, A. Goncharsky, V. V. Stepanov et al., *Numerical Methods for the Solution of Ill-Posed Problems*. Springer Netherlands, 1995, 253 S., ISBN: 978-0-7923-3583-2. DOI: 10.1007/978-94-015-8480-7.



- [114] H. Zou und T. Hastie, „Regularization and variable selection via the elastic net“, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Statistical Methodology)*, Jg. 67, Nr. 2, S. 301–320, 2005. DOI: 10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x.
- [115] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort et al., „Scikit-learn: Machine Learning in Python“, *Journal of Machine Learning Research*, Jg. 12, S. 2825–2830, 2011.
- [116] J. Bergstra und Y. Bengio, „Random search for hyper-parameter optimization“, *The Journal of Machine Learning Research*, Jg. 13, Nr. 1, S. 281–305, 2012.
- [117] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres et al., *Global Sensitivity Analysis*. John Wiley & Sons, Ltd, 18. Dez. 2007, ISBN: 9780470725184. DOI: 10.1002/9780470725184.
- [118] M. T. Ribeiro, S. Singh und C. Guestrin, *Model-Agnostic Interpretability of Machine Learning*, ICML Workshop on Human Interpretability in Machine Learning, 2016. arXiv: 1606.05386 [stat.ML].
- [119] C. Molnar, *Interpretable Machine Learning - A Guide for Making Black Box Models Explainable*. 28. Feb. 2020, S. 318, ISBN: 9780244768522. eprint: <https://leanpub.com/interpretable-machine-learning>.
- [120] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo et al., *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, Ltd, 30. Apr. 2004, ISBN: 9780470870952. DOI: 10.1002/0470870958.
- [121] L. Breiman, „Random Forests“, *Machine Learning*, Jg. 45, Nr. 1, S. 5–32, 2001, ISSN: 1573-0565. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- [122] S. M. Lundberg und S.-I. Lee, „A Unified Approach to Interpreting Model Predictions“, in *Advances in Neural Information Processing Systems 30*, I. Guyon, U. V. Luxburg, S. Bengio et al., Hrsg., Curran Associates, Inc., 2017, S. 4765–4774.
- [123] I. M. Sobol, „Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates“, *Mathematics and Computers in Simulation*, Jg. 55, Nr. 1, S. 271–280, 15. Feb. 2001, The Second IMACS Seminar on Monte Carlo Methods, ISSN: 0378-4754. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6).
- [124] A. Goldstein, A. Kapelner, J. Bleich et al., „Peeking Inside the Black Box: Visualizing Statistical Learning with Plots of Individual Conditional Expectation“, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Jg. 24(1), S. 44–65, 2015. arXiv: 1309.6392 [stat.AP].
- [125] T. Zipperle, „Modellierung von Transformationspfaden für einen optimierten Energieeinsatz im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“, Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, München, 27. Apr. 2020, S. 139.
- [126] S. M. Lundberg, B. Nair, M. S. Vavilala et al., „Explainable machine-learning predictions for the prevention of hypoxaemia during surgery“, *Nature Biomedical Engineering*, Jg. 2, Nr. 10, S. 749–760, 10. Okt. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41551-018-0304-0>.
- [127] A. Altmann, L. Toloşi, O. Sander et al., „Permutation importance: a corrected feature importance measure“, *Bioinformatics*, Jg. 26, Nr. 10, S. 1340–1347, Apr. 2010, ISSN: 1367-4803. DOI: 10.1093/bioinformatics/btq134.
- [128] C. Strobl, A.-L. Boulesteix, A. Zeileis et al., „Bias in random forest variable importance measures: Illustrations, sources and a solution“, *BMC Bioinformatics*, Jg. 8, Nr. 1, S. 25, 2007. DOI: 10.1186/1471-2105-8-25.
- [129] J. Elfner, *MultiSim - A modular and flexible thermal simulation tool for heating appliances*, GitHub, Aug. 2020.
- [130] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Düsseldorf, Deutschland, *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl., P. D.-I. P. Stephan, Hrsg., 978-3-642-19982-0. Springer Vieweg, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3>.
- [131] M. R. Lauster, A. Constantin, P. Remmen et al., „Verification of a Low Order Building Model for the Modelica Library AixLib using ASHRAE Standard 140“, in *Proceedings of Building Simulation 2017: 15th Conference of IBPSA*, C. S. Barnaby und M. Wetter, Hrsg., San Francisco, USA, 17. Aug. 2017, S. 1149–1158, ISBN: 978-1-7750520-0-5. DOI: 10.26868/25222708.2017.303.
- [132] S. Balac und F. Mahé, „Embedded Runge-Kutta scheme for step-size control in the interaction picture method“, *Computer Physics Communications*, Jg. 184, Nr. 4, S. 1211–1219, 2013, ISSN: 0010-4655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.12.020>.

- [133] N. Nassif und D. K. Fayyad, *Introduction to Numerical Analysis and Scientific Computing*. CRC Press, 2016, ISBN: 9781466589490.
- [134] E. Fehlberg, „Low-order classical Runge-Kutta formulas with stepsize control and their application to some heat transfer problems“, NASA Marshall Space Flight Center; Huntsville, AL, United States, Techn. Ber., Juli 1969.
- [135] J. C. Butcher, *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*. John Wiley & Sons, Ltd, 26. Juli 2016, 513 S., ISBN: 9781119121534. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119121534>.
- [136] S. Balac und A. Fernandez, „Mathematical analysis of adaptive step-size techniques when solving the nonlinear Schrödinger equation for simulating light-wave propagation in optical fibers“, *Optics Communications*, Jg. 329, S. 1–9, 2014, ISSN: 0030-4018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.04.081>.
- [137] J. Crank und P. Nicolson, „A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type“, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Jg. 43, Nr. 1, S. 50–67, 1947.
- [138] J. D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics - The Basics with Applications*, Ser. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. New York, USA: McGraw-Hill, 1995, ISBN: 0-07-113210-4.
- [139] American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), „Measurement of Energy and Demand Savings“, Guideline 14-2014, Atlanta, GA, USA, Techn. Ber., 2014.
- [140] H. Mühlbacher, „Verbrauchsverhalten von Wärmeezeugern bei dynamisch variierten Lasten und Übertragungskomponenten“, Diss., Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2007.
- [141] U. Arndt, „Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandgestützter Simulation“, Diss., Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2008.
- [142] A. Hawkes und M. Leach, „Impacts of temporal precision in optimisation modelling of micro-Combined Heat and Power“, *Energy*, Jg. 30, Nr. 10, S. 1759–1779, 2005, ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.11.012>.
- [143] B. Schломann, E. Gruber, W. Eichhammer et al., „Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)“, Fraunhofer ISI; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung; GfK Marketing Services GmbH & Co. KG; GfK Panel Services Consumer Research GmbH; Institut für Energetik und Umwelt gGmbH; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technischen Universität München, Techn. Ber., 1. Apr. 2004.
- [144] „Bautätigkeit und Wohnungen - Bestand an Wohnungen“, Statistisches Bundesamt (Destatis), Techn. Ber. 2050300187004, 2019.
- [145] R. L. Iman und J. C. Helton, „An Investigation of Uncertainty and Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models“, *Risk Analysis*, Jg. 8, Nr. 1, S. 71–90, 1988. DOI: 10.1111/j.1539-6924.1988.tb01155.x.
- [146] G. E. P. Box und N. R. Draper, *Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses*, Ser. Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, Inc., 10. Apr. 2006, 880 S., ISBN: 978-0-470-05357-7. DOI: 10.1002/0470072768.
- [147] M. D. McKay, R. J. Beckman und W. J. Conover, „A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code“, Version 2, *Technometricsa journal of statistics for the physical and engineering sciences*, Jg. 21, 1. Mai 1979. DOI: 10.2307/1268522.
- [148] R. L. Iman und J. C. Helton, „Comparison of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer models“, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), Techn. Ber. NUREG/CR-3904, März 1985, S. 116.
- [149] M. Vorechovsky, „Hierarchical Refinement of Latin Hypercube Samples“, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, accepted, Juni 2014. DOI: 10.1111/mice.12088.
- [150] G. Manache und C. Melching, „Sensitivity of Latin Hypercube sampling to sample size and distributional assumptions“, Juli 2007.
- [151] G. Manache und C. S. Melching, „Identification of reliable regression- and correlation-based sensitivity measures for importance ranking of water-quality model parameters“, *Environmental Modelling & Software*, Jg. 23, Nr. 5, S. 549–562, 2008, ISSN: 1364-8152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.08.001>.
- [152] D. Kraft, „A software package for sequential quadratic programming“, 1988.

- [153] M. A. Branch, T. F. Coleman und Y. Li, „A subspace, interior, and conjugate gradient method for large-scale bound-constrained minimization problems“, *SIAM Journal on Scientific Computing*, Jg. 21, Nr. 1, S. 1–23, 1999.