



Technische Universität München
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen

Urs Wehmhörner

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Gerhard Hausladen

Die Dissertation wurde am 06.10.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 08.02.2012 angenommen.

Für meine zwei EEs!

Zusammenfassung

Vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und Validierung einer multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen zur Heizungsunterstützung. Unter Verwendung der temperaturbasierten Mess- und Berechnungsmethode des thermischen Pufferspeicherzustands optimiert die multikriteriell geregelte KWK-Anlage die Wärme- und die Stromerzeugung derart, dass die Eigenstromnutzung maximiert und der Wärmebedarf gedeckt wird. Gesteuerte Pufferspeicherladezyklen resultieren in einer bedarfsgerechten Stromerzeugung durch Mini-KWK-Anlagen. Dementsprechend zeigen multikriteriell geregelte KWK-Anlagen technische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Stand der Technik, die in experimentellen Untersuchungen und energiewirtschaftliche Analysen demonstriert wurden.

Abstract

This thesis describes the development and the validation of a multi-criteria control with a temperature-based determination of thermal storage states for CHP units in heating systems. The multi-criteria control uses the temperature-based calculation method to optimize the heat and power generation of the CHP unit. The control maximises the on-site utilization and cover the heat demand. Controlled charge cycles of thermal storages result in demand-oriented power generation of CHP units. Therefore the multi-criteria control of a CHP unit has technical and economical advantages compared to the state-of-the-art, which were demonstrated within experimental and energy-economical analyses.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München. Mein besonderer Dank gilt dem Ordinarius des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, für die stete Unterstützung meiner Arbeit und die gewährte Forschungsfreiheit zur Entwicklung und Umsetzung meiner Ideen. Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen gilt mein Dank für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats und Herrn Professor Dr.-Ing. Andreas Jossen danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen danke ich für ein Arbeitsumfeld, welches sich durch Kollegialität und überfachlichen Austausch auszeichnet. Darüber hinaus bedanke ich mich für die wertvollen Beiträge von Herrn Andreas Werthmüller und Herrn Guido Hilgers bei der Realisierung des experimentellen Teils dieser Arbeit. Insbesondere möchte ich meine Kollegen der KWK-Gruppe, Herr Dipl.-Ing. Josef Lipp, Herr Dipl.-Ing. Johannes Jungwirth und Herr Dipl.-Ing. Florian Sänger, hervorheben, die mich im Rahmen Ihrer Diplom- und Studienarbeiten und später im Rahmen Ihrer Lehrstuhl­tätigkeit beständig und tatkräftig unterstützt haben. Ohne die fachlichen und freundschaftlichen Gespräche im Kreise der KWK-Gruppe wäre diese Arbeit nicht zu Stande gekommen.

Ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern und meiner Familie. Meinen Eltern danke ich für die Förderung, die Welt entdecken zu können und meiner Familie, für das Entdecken der Welt.

München, im Oktober 2011

Urs Wehmhörner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3	Methodenkonzept und Aufbau der Arbeit.....	4
2	Technische Grundlagen und Rahmenbedingungen.....	6
2.1	Technische Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung	6
2.1.1	Technische Kennzahlen für Heizungssysteme.....	7
2.1.2	Leistungsklassen von KWK-Anlagen	9
2.1.3	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen.....	9
2.1.4	Grundsätzliche KWK-Betriebsarten.....	10
2.2	Definition des Untersuchungsobjektes.....	12
2.2.1	Gebäudespezifikationen	12
2.2.2	Gebäudeenergiebedarf und Typtage	14
2.2.3	Lastgänge des Typtages <i>Übergangstag – Heiter</i>	16
2.3	Spezifizierung der Gebäudeenergieversorgung.....	18
2.3.1	Technische Gebäudeausrüstung	18
2.3.2	Auslegung der Pufferspeicher.....	20
2.3.3	Auswahl der Pufferspeicher	24
2.4	Beschreibung der Prüfstandsumgebung.....	26
2.4.1	Hydraulisches Schema und Bilanzgrenzen	27
2.4.2	Messtechnik und Messaufbau des Bilanzkreise „KWK-Modul“	28
3	Stand der Technik von Mini-KWK-Anlagen.....	30
3.1	Mess-, Steuer-, und Regelungstechnik	30
3.2	Thermische Leistungen im wärmegeführten Betrieb	31
3.3	Elektrische Leistungen im wärmegeführten Betrieb	34
3.4	Pufferspeicherverhalten.....	36
3.5	Optimierungspotenziale	37
4	Temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung.....	38
4.1	Messaufbau zur Speicherzustandsbestimmung.....	38
4.2	Methodische Grundlagen der Speicherzustandsbestimmung	40
4.3	Bestimmung des Speichertemperaturverlaufs	41
4.3.1	Adaption als Sigmoidkurve	41
4.3.2	Parametrierung der Sigmoidkurve	43

4.4	Wärmebilanzbestimmung	43
4.4.1	Wärmebilanz über den Wendepunkt des Temperaturverlaufs.....	44
4.4.2	Wärmebilanz über den bezogenen Speicherenergieinhalt	45
4.5	Speicherenergiebestimmung	47
4.5.1	Speicherinhalt zur Raumheizung	48
4.5.2	Speicherinhalt zur Warmwasserversorgung.....	48
4.5.3	Speicherkapazität	49
4.6	Bestimmung der Regelungszeitfenster	49
4.7	Experimentelle Ergebnisse der Speicherzustandsbestimmung.....	50
4.7.1	Wärmebilanz am <i>Übergangstag – Heiter</i> mit Pufferspeicher 2.....	52
4.7.2	Speicherenergien am <i>Übergangstag – Heiter</i> mit Pufferspeicher 2.....	54
4.7.3	Regelungszeitfenster am <i>Übergangstag – Heiter</i> mit Pufferspeicher 2	55
4.8	Genauigkeit der Wärmebilanzbestimmung	55
4.9	Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Speicherzustandsbestimmung.....	57
4.9.1	Analyse der Mischzonenwanderung	59
4.9.2	Analyse der Mischzonendicke	60
4.9.3	Optimierter Messaufbau	62
4.9.4	Experimenteller Vergleich und Bewertung	64
5	Multikriterielle Regelung von KWK-Anlagen	66
5.1	Regelungskonzept.....	66
5.1.1	Regelungskaskade zur Maximierung des Produktionsdeckungsgrades.....	67
5.1.2	Regelungskaskade zur Wärmebedarfsdeckung.....	68
5.1.3	Kaskadenregelung des KWK-Moduls	69
5.2	Multikriterieller Regelungsalgorithmus	70
5.2.1	Berechnung der Sollleistung des KWK-Moduls.....	71
5.2.2	Berechnung der Störgröße bei positiver Wärmebilanz	72
5.2.3	Berechnung der Störgröße bei negativer Wärmebilanz.....	74
5.3	Experimentelle Ergebnisse am <i>Übergangstag – Heiter</i>	76
5.3.1	Analyse der thermischen Größen	77
5.3.2	Analyse der elektrischen Größen.....	79
5.4	Sensitivitäten der multikriteriellen Regelung	82
5.4.1	Einfluss der Heizkreisvorlauftemperatur.....	82
5.4.2	Einfluss des Speichervolumens	84
5.4.3	Einfluss des Speichertyps.....	86
6	Energiewirtschaftliche Bewertung der multikriteriellen Regelung.....	89
6.1	Tages- und Jahresendenergiebilanzen.....	90
6.1.1	Vergleich der Regelungen am <i>Übergangstag – Heiter</i>	91
6.1.2	Vergleich der Regelungen im Testreferenzjahr	93
6.2	Tages- und Jahresenergiekosten	94
6.2.1	Vergleich der Regelungen am <i>Übergangstag – Heiter</i>	95
6.2.2	Vergleich der Regelungen im Testreferenzjahr	96

7	Analyse der Netzurückwirkungen der multikriteriellen Regelung.....	99
7.1	Eigenstromerzeugung.....	99
7.2	Residuale Last.....	102
7.3	Lastwechsel.....	105
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	107
	Literatur.....	111
A	Anhang.....	115
A.1	Pufferspeichermaße.....	115
A.2	Fühlerhöhen.....	115
A.3	Tages- und Jahresendenergiebilanzen.....	116
A.4	Tages- und Jahresenergiekosten.....	117

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Energieversorgung von Wohngebäuden war im Jahr 2007 mit einem Anteil von 25,7 % an der deutschen Endenergiebilanz einer der größten Verbrauchssektoren von fossilen Brennstoffen und elektrischer Energie [27]. Gleichzeitig wird diesem Sektor ein erhebliches Verbrauchsreduktionspotenzial durch die Integration von Erneuerbaren Energien in die Wärme- und Stromversorgung sowie durch Effizienzsteigerungen bei der Energiebereitstellung zugeschrieben. [17]

Die Effizienzsteigerung gilt als Grundvoraussetzung bei der Lösung der anstehenden energiewirtschaftlichen Herausforderungen für Klimaschutz und Ressourcenschonung. Die Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“ nennt in ihren Bericht „Deutschlands Energiewende - Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft“ die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als eine Technologie, die

„[...] einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz sowie zur Minderung der CO₂-Emissionen [...]“

leisten kann [17]. Sie unterstreicht damit den politischen Willen zum Ausbau der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen), der bereits 2009 im Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) ausformuliert worden ist. Im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz wird das Ziel proklamiert, die Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in der Bundesrepublik Deutschland bis 2020 auf 25 Prozent zu erhöhen [7]. Dieses Ziel ist als ambitioniert zu bezeichnen, da der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung an der deutschen Nettostromerzeugung im Jahr 2009 lediglich ca. 15,8 % bzw. ca. 77 TWh betrug [43]. Es ist davon auszugehen, dass für die Zielerreichung erhebliche Anstrengungen nötig sind, die neben dem Ausbau von großen Heizkraftwerken einen Ausbau von kleinen bis kleinsten KWK-Anlagen zur dezentralen Stromerzeugung verlangen.

Insbesondere den dezentralen KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 15 kW_{el} wird nicht zuletzt wegen der Förderstruktur des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes eine dynamische Marktentwicklung prognostiziert [42]. Derzeit handelt es sich hierbei um eine Nischentechnologie mit Verkaufszahlen unterhalb von 5000 Geräten pro Jahr [16], jedoch belegen

Marktdaten aus Japan, dass höhere Stück- und Verkaufszahlen von kleinsten KWK-Anlagen möglich sind [28]. Dieser prognostizierte Ausbau von sogenannten Mini-KWK-Anlagen geschieht voraussichtlich verbrauchsnahe und kann die Gebäudeenergieversorgungsstruktur in einem erheblichen Maße verändern. Nach dem Stand der Technik tritt ein Wohngebäude als Verbraucher in der deutschen Energiebilanz auf. Werden jedoch KWK-Anlagen heizungsunterstützend im Gebäude installiert, ändert die dezentrale Stromerzeugung das energetische Verhalten des Gebäudes signifikant. Wärmegeführte KWK-Module, die ihre thermische Leistung dem Wärmebedarf des versorgten Gebäudes anpassen, treten nun als ungesteuerte Stromerzeuger im elektrischen Netz auf. Sie operieren weitestgehend unabhängig von Netzzustand und nehmen folglich an keiner Systemdienstleistung des Netzes teil. Die heutige Anzahl an dezentralen KWK-Anlagen hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Stromnetz, aber mit steigender Anzahl an dezentralen Einheiten nehmen die Rückwirkungen einer ungesteuerten Stromerzeugung auf das Versorgungsnetz zu. Demzufolge schlägt die Ethikkommission für das Erreichen des 25 %-Ziels veränderte Rahmenbedingungen für die Kraft-Wärme-Kopplung vor.

„Zukünftig sollen KWK-Anlagen deutlich stärker strommarktorientiert betrieben, mit größeren Wärmespeichern ausgelegt und auch die industriellen KWK-Potenziale stärker erschlossen werden. Die KWK auf Erdgasbasis ist für Haushalte hocheffizient und bietet sich dank der guten Steuerbarkeit insbesondere von Mini-KWK-Anlagen (Blockheizkraftwerke) als flexible Ergänzungstechnologie zur wetterbedingt schwankenden Stromproduktion von Windkraft und Photovoltaik an.“ [17]

Die Ethikkommission hebt die Betriebsweise von dezentralen KWK-Anlagen in Verbindung mit einem Wärmespeicher explizit hervor und skizziert die zukünftigen Anforderungen an die Kraft-Wärme-Kopplung. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung und Validierung einer multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen, die die KWK-Technologie für zukünftige Anwendungen flexibilisiert. Mithilfe gesteuerte Wärmespeicherladezyklen (respektive Pufferspeicherladezyklen) weist die Regelung die technischen Merkmale einer dezentralen und bedarfsgerechten Wärme- und Stromerzeugung auf.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Bei dezentralen KWK-Anlagen handelt es sich üblicherweise um verbrennungsmotorische Geräte mit einer starren Kopplung zwischen Wärme- und Stromerzeugung, die in Kombination mit einem Pufferspeicher in ein Heizungssystem eingebunden und monokriteriell geregelt

werden. Diese KWK-Anlagen werden heizungsunterstützend eingesetzt. Die häufigste Betriebsart ist der wärmegeführte Betrieb, wodurch die Stromerzeugung nicht bedarfsgerecht erfolgt. Zwar führt die Installation eines Pufferspeichers zu einer temporären Trennung zwischen Wärmeerzeugung und -bedarf, doch federt der Pufferspeicher im wärmegeführten Betrieb lediglich thermische Lastschwankungen ab, um die Anzahl der Startvorgänge des KWK-Moduls zu minimieren und mögliche Mindestlauf- oder Mindeststillstandszeiten zu gewährleisten. Tatsächlich löst sich mit der Trennung zwischen Wärmeerzeugung und -bedarf auch die Kopplung zwischen Stromerzeugung und Wärmebedarf. Wärmegeführte KWK-Module nach dem Stand der Technik nutzen den Freiheitsgrad der thermischen Zwischenspeicherung nicht, um die Stromerzeugung zu optimieren. Ihnen fehlt die Kenntnis über die thermische Last und die Speicherzustände, die eine bedarfsgerechte Stromerzeugung bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs ermöglicht.

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung des Zusammenspiels der Heizungskomponenten KWK-Modul und Pufferspeicher, um mithilfe von zielgerichteten Pufferspeicherladezyklen die Stromerzeugung unabhängig vom Wärmebedarf und abhängig vom Strombedarf zu steuern. Hierzu wird eine multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung entwickelt, die die Eigenstromerzeugung bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs maximiert. Die Zielsetzung ist eine strombedarfsorientierte Betriebsweise, die die Steuerbarkeit des KWK-Moduls unter Zuhilfenahme des Pufferspeichers nutzt, um die verbrauchsgebundenen Kosten und die Netzurückwirkungen des versorgten Objekts zu minimieren.

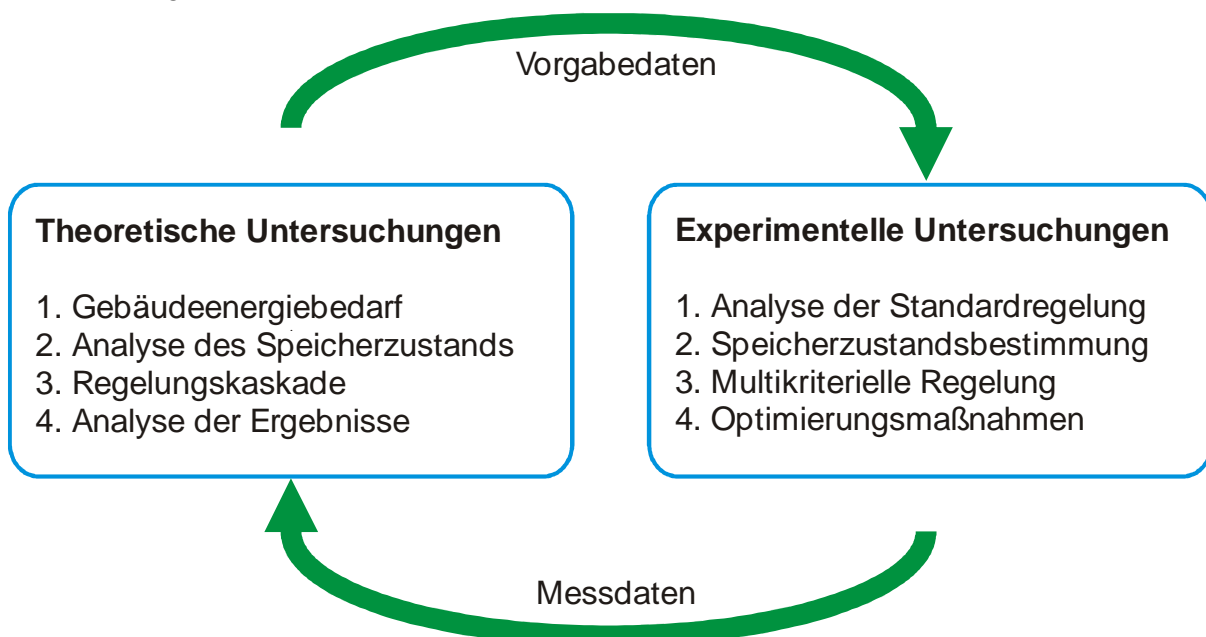
Multikriteriell wird die Regelung aufgrund der Rückkopplung einer elektrischen und einer thermischen Regelgröße. Die elektrische Regelgröße ist die residuale Last des versorgten Gebäudes, welche an modernen Stromzählern als Impulssignal abgegriffen werden kann. Die thermischen Regelgrößen sind die Leistungs- und die Energiebilanz am Pufferspeicher, die über die entwickelte temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung berechnet werden und jede Dynamik eines Heizungssystems detektieren. Dieser Aufbau ermöglicht eine technische Umsetzung der Regelung unter den Prämissen Einfachheit, Kosten und Übertragbarkeit. Unter Einfachheit werden die technische und die methodische Komplexität der Regelung verstanden, die durch die Verwendung von Standardtemperaturmesstechnik und einer geringen Anzahl an Regelungsparametern gewährleistet wird. Die Kosten werden durch die Verwendung von Standardprodukten begrenzt. Ein nachrüstbares Messkonzept, welches robust sowie technologie- und leistungsunabhängig dimensioniert ist, ermöglicht die Übertragbarkeit der Regelung auf beliebige Heizungssysteme.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die multikriterielle Regelungsaufgabe vorerst auf die energetischen Zustände des Versorgungsobjektes beschränkt. Zukünftige Anwendungen und Netz-

dienstleistungen, wie die Ausregelung dargebotsabhängiger Einspeiser auf Versorgungsebene oder der Aufbau eines Virtuellen Kraftwerks, sind mit der Regelung realisierbar, werden in dieser Arbeit aber nicht näher betrachtet. Des Weiteren wird in dieser Arbeit bewusst auf dem Stand der Technik aufgebaut. Die Maximierung des Produktionsdeckungsgrades und der strombedarfsorientierte Betrieb wären ebenfalls über einen elektrischen Speicher realisierbar, doch Pufferspeicher sind kostengünstig und üblicherweise vorhanden.

1.3 Methodenkonzept und Aufbau der Arbeit

Die Entwicklung und Validierung der multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung folgt dem iterativen Methodenkonzept aus **Abbildung 1**. Das Konzept unterscheidet zwischen theoretischen Teilaufgaben, die anhand von Simulations- und Berechnungsmodellen bearbeitet werden können und experimentellen Teilaufgaben, die ausschließlich über Prüfstandsuntersuchungen bearbeitet werden können. Eine realitätsnahe Regelungsentwicklung erzwingt dieses, sich periodisch wiederholende Untersuchungskonzept. Einerseits sind die Eingangsdaten und die Ausgangsdaten des experimentellen Untersuchungsteils modelgestützt zu ermitteln und zu analysieren und andererseits ist die Gebäudeenergieversorgung mit KWK-Modul und Pufferspeicher ein dynamischer Prozess, der mit Nichtlinearitäten behaftet ist. Die Pufferspeicherlade- und -entladevorgänge sowie das Schichtungsverhalten im Speicher sind hoch nichtlineare Vorgänge, die nur ungenügend in Modellen abgebildet werden können.



UW-001-B-11

Abbildung 1: Methodenkonzept

Der iterative Entwicklungsprozess beginnt mit der Berechnung der Gebäudeenergiebedarfe für die Prüfstandsmessungen. In Kapitel 2 werden die Untersuchungsumgebung definiert und die Eingangsdaten für die experimentelle Untersuchung der Standardregelung festgelegt. Die darauf aufbauenden Prüfstandsversuche beschreiben den Stand der Technik (wärmegeführtes Mini-KWK-Modul mit 1000 l-Pufferspeicher) und bilden die nötige Datengrundlage für die Analyse des Pufferspeicherverhaltens (siehe Kapitel 3). Aufbauend auf der Pufferspeicheranalyse wird in Kapitel 4 die temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung theoretisch entwickelt und experimentell untersucht. Die Entwicklung und Validierung des multikriteriellen Regelungsalgorithmus ist in Kapitel 5 beschrieben. In Kapitel 6 werden die energiewirtschaftlichen Auswirkungen und Veränderungen der entwickelten Regelung anhand von Tages- und Jahresendenergiebilanzen sowie Tages- und Jahresenergiekosten beschrieben. Abschließend wird in Kapitel 7 dargelegt, in welchem Maße mögliche Netzurückwirkungen durch die Maximierung der Eigenstromnutzung reduziert werden können.

Die Übertragbarkeit der multikriteriellen Regelung mit Speicherzustandsbestimmung ist eine wesentliche Zielvorgabe im Rahmen dieser Arbeit. Die Regelung wird mit drei verschiedenen Pufferspeichern an fünf verschiedenen Typtagen untersucht, um der Regelung die Einflüsse unterschiedlicher Heizungssysteme und veränderter Außenbedingungen aufzuprägen. Die Ergebnisse der verschiedenen Experimente geben den Regelungsalgorithmus in unterschiedlichem Maße wieder. Die Beschreibungen dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung am *Übergangstag – Heiter*. Dieser Tag zeigt den Regelungsalgorithmus am deutlichsten und dient damit als Beschreibungsgrundlage der Ergebnisse.

2 Technische Grundlagen und Rahmenbedingungen

Für die Einordnung, die Gültigkeit und die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit werden im folgenden Kapitel die Untersuchungsbedingungen definiert. Es werden die technischen und energetischen Rahmenbedingungen für die Entwicklung der multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung von Mini-KWK-Anlagen anhand von Literaturverweisen, Simulationen und Annahmen festgelegt.

2.1 Technische Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung

Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz definiert die Kraft-Wärme-Kopplung als „[...] die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in elektrische Energie und in Nutzwärme in einer ortsfesten technischen Anlage [...]“. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen „[...] im Sinne des Gesetzes sind Dampfturbinen-Anlagen (Gegendruckanlagen, Entnahme- und Anzapfkondensationsanlagen), Gasturbinen-Anlagen (mit Abhitzekeessel oder mit Abhitzekeessel und Dampfturbinen-Anlage), Verbrennungsmotoren-Anlagen, Stirling-Motoren, Dampfmaschinen-Anlagen, ORC (Organic Rankine Cycle)-Anlagen sowie Brennstoffzellen-Anlagen, in denen Strom und Nutzwärme erzeugt werden [...]“. [7]

Kraft-Wärme-Kopplung ist somit ein technischer Prozess, der technologie- und leistungs-klassenübergreifend eingesetzt wird. Haupteinsatzgebiete der Kraft-Wärme-Kopplung sind die Industrie und die allgemeine Versorgung (Fernwärme) mit elektrischen und thermischen Anlagenleistungen im Megawattbereich. Eine KWK-Anlage besteht aus einem, oder mehreren unmittelbar miteinander verbundenen, KWK-Modul/en. Das KWK-Modul beschreibt eine eigenständig einsatzfähige Einheit zur Kraft-Wärme-Kopplung.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf KWK-Modulen mit einer starren Kopplung zwischen Wärme- und Stromerzeugung und mit einer elektrischen Leistung bis $15 \text{ kW}_{\text{el}}$. Die Möglichkeit einer temporären, ungekoppelten Stromerzeugung ohne Abwärmenutzung wird nicht betrachtet. Darüber hinaus werden ausschließlich verbrennungsmotorische KWK-Module untersucht. Diese Module basieren vorwiegend auf wassergekühlten und erdgasbetriebenen Ottomotoren mit angeflanschem Generator. Zur Strom- und Wärmeerzeugung wird Brennstoff in einem oder mehreren Kolben gezündet und in mechanische Leistung umgewandelt. Diese Leistung wird mithilfe der Kurbelwelle übertragen und im Generator verstromt. Die

Abwärme dieser Umwandlungsschritte wird vom Kühlwasser aufgenommen und über einen hydraulischen Anschluss zum Heizungssystem bei Temperaturen von 70°C bis 80°C nutzbar gemacht.

Verbrennungsmotorische KWK-Module werden entweder alternierend oder modulierend betrieben. Während beim alternierenden Betrieb der Verbrennungsmotor nur in den Betriebspunkten „Aus“ und „Nennlast“ gefahren wird, sind modulierende KWK-Module in der Lage die Ausgangsleistung (thermisch und elektrisch) in einem spezifischen Leistungsbereich stufenlos zu variieren.

2.1.1 Technische Kennzahlen für Heizungssysteme

Mithilfe energietechnischer Kennzahlen können die Ergebnisse der theoretischen und experimentellen Arbeiten zur multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung bewertet und analysiert werden. Neben den endenergetischen und nutzenergetischen (thermischen und elektrischen) Größen des Gebäudes sind dies v. a. Nutzungsgrade und anlagentechnische Größen zur Bewertung der eingesetzten Technologien. Angelehnt an die Richtlinie 4608 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) [50], die Begriffe und Definitionen der Kraft-Wärme-Kopplung beschreibt, und die Dissertation von Arndt [3], die vorwiegend anlagenspezifische Kennzahlen definiert, werden in dieser Arbeit die folgenden, grundlegenden Gleichungen zur Berechnung der technischen Kennzahlen verwendet. Die Gleichungen sind allgemeingültig und bilanzkreisunabhängig dargestellt. Sie erhalten bei Bezug zu einem Bilanzkreis einen entsprechenden Index.

Die einzelnen Komponenten des Heizungssystems werden über ihre jeweiligen thermischen Größen beschrieben. Die Differentiation der thermischen Energie Q nach der Zeit ergibt die thermische Leistung \dot{Q} , welche ebenfalls über den Massenstrom \dot{m} (bzw. Volumenstrom \dot{V}), die Wärmekapazität von Wasser bei konstantem Druck c_p und die Temperaturdifferenz ΔT zweier Bezugstemperaturen berechnet werden kann.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Als einzige Heizungssystemkomponente wird das KWK-Modul anhand von thermischen und elektrischen Größen charakterisiert und kann durch die Stromkennzahl klassifiziert werden. Diese Kennzahl gibt das Verhältnis der gekoppelten Zielleistungen an.

$$\sigma = \frac{P_{el,Netto}}{\dot{Q}} \quad (2)$$

Die elektrische Netto-Wirkleistung $P_{el,Netto}$ wird über die Differentiation der elektrischen Netto-Energie $W_{el,Netto}$ (erzeugte elektrische Energie abzüglich des Eigenbedarfs für z. B. Pumpen,

etc.) nach der Zeit und gleichermaßen über den Strom I und die Spannung U sowie dem Phasenwinkel $\cos \varphi$ berechnet.

$$P_{el,Netto} = \frac{d(W_{el,Netto})}{dt} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Für die Bewertung der Stromerzeugung mit dem elektrischen Bedarf eines Versorgungsobjekts wird in Arndt [3] der Produktionsdeckungsgrad $d_{el,KWK,Produktion}$ eingeführt. Dieser gibt den Anteil der im Objekt nutzbaren Strommenge $W_{el,KWK,Produktion}$ zur generierten Strommenge $W_{el,Netto}$ an.

$$d_{el,KWK,Produktion} = \frac{W_{el,KWK,Produktion}}{W_{el,netto}} \quad (4)$$

Die zugeführte Brennstoffleistung P_{Gas} der Wärmeerzeuger im Heizungssystem berechnet sich über die zugeführte Brennstoffenergie (Heizwert) $H_{i,N} \cdot V_{Gas,N}$ pro Zeiteinheit. Das zugeführte Brennstoffvolumen V_{Gas} variiert mit den Umgebungsbedingungen und muss zur korrekten Bilanzierung mithilfe der Erdgastemperatur T_{Gas} , des Erdgasüberdruckes p_{Gas} und des Umgebungsdruckes p (am Entnahmepunkt) auf das Normvolumen $V_{Gas,N}$ umgerechnet werden. Im Datenblatt des Gasversorgers findet sich der (regelmäßig aktualisierte) Heizwert $H_{i,N}$ eines Kubikmeters Erdgas unter Normbedingungen für den Entnahmepunkt. [41]

$$P_{Gas} = \frac{d(H_{i,N} \cdot V_{Gas,N})}{dt} \quad (5)$$

$$V_{Gas,N} = V_{Gas} \cdot \frac{T_N}{T_{Gas}} \cdot \frac{(p_{Gas} + p)}{p_N} \quad (6)$$

Die eingesetzten Technologien werden über Wirk- und Nutzungsgrade bewertet. Der thermische Nutzungsgrad g_{th} und der elektrische Nutzungsgrad g_{el} werden über die zugeführte Erdgasmenge $H_{i,N} \cdot V_{Gas,N}$ und abgeführte Energiemengen (Q und $W_{el,Netto}$) definiert. Im Gegensatz dazu sind der thermische Wirkungsgrad η_{th} und der elektrische Wirkungsgrad η_{el} Momentangrößen, die über zugeführte Leistungen (P_{Gas}) und abgeführte Leistungen (\dot{Q} und $P_{el,Netto}$) definiert werden.

$$g_{th} = \frac{Q}{H_{i,N} \cdot V_{Gas,N}} \quad (7)$$

$$g_{el} = \frac{W_{el,netto}}{H_{i,N} \cdot V_{Gas,N}} \quad (8)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}}{P_{Gas}} \quad (9)$$

$$\eta_{el} = \frac{P}{P_{Gas}} \quad (10)$$

2.1.2 Leistungsklassen von KWK-Anlagen

Im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz werden KWK-Anlagen bis zu einer elektrischen Nennleistung von zwei Megawatt als kleine KWK-Anlagen bezeichnet [7]. Eine feinere Unterteilung oder eine allgemeingültige Klassifizierung ist in der Literatur nicht zu finden. Es existiert keine einheitliche Einteilung der KWK-Anlagen. Im Rahmen dieser Arbeit werden KWK-Anlagen nach Leistungsklassen (siehe **Tabelle 1**) klassifiziert. Hierbei werden KWK-Module, bzw. KWK-Anlagen, nach der elektrischen Nennleistung $P_{KWK,N}$ in vier Gruppen unterteilt.

Tabelle 1: Leistungsklassen von KWK-Anlagen

	Obergrenze		Untergrenze
Groß-KWK	-	$P_{KWK,N}$	> 50 kW
Klein-KWK	50 kW \geq	$P_{KWK,N}$	> 15 kW
Mini-KWK	15 kW \geq	$P_{KWK,N}$	> 3 kW
Mikro-KWK	3 kW \geq	$P_{KWK,N}$	-

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich auf ein KWK-Modul der Klasse der Mini-KWK-Anlagen. Geräte dieser Klasse sind seit den späten neunziger Jahren marktreif [48] und werden tausendfach pro Jahr in Deutschland verkauft [16].

2.1.3 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Das übliche Vorgehen bei der Ermittlung von Gebäudeenergiekosten basiert auf den jährlichen Gesamtkosten, die sich aus den Anteilen kapitalgebundene Kosten, verbrauchsgebundene Kosten, betriebsgebundene Kosten und sonstige Kosten (z. B. Versicherungen) zusammensetzen [49]. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik optimiert die Regelung von KWK-Modulen und beeinflusst somit direkt und ausschließlich die verbrauchsgebundenen Kosten (im folgenden Energiekosten) eines Versorgungsobjektes. Vergleichende Analysen zwischen den Regelungen erfolgen daher über Differenzbetrachtungen der täglichen und jährlichen Energiekosten.

Die verbrauchsgebundenen Kosten des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Wohngebäudes setzen sich aus den Kosten für den Erdgasbezug und den Strombezug zusammen. Gewinne für den Betreiber des KWK-Moduls entstehen durch die Verwendung eines förderfähigen KWK-Moduls [8]. Die in dieser Arbeit verwendeten Energiepreise und die derzeit gültigen Vergütungen sind in **Tabelle 2** aufgelistet. Es handelt sich um deutschlandweit gemittelte Haushaltspreise und die Vergütung für ein KWK-Modul mit einer elektrischen Leistung bis 50 kW_{el}, welches nach dem 01.04.2002 in Dauerbetrieb genommen worden ist.

Die Förderstruktur für KWK-Anlagen in Deutschland ist auf die Eigenstromerzeugung ausgelegt, d. h. der von KWK-Modul dezentral erzeugte Strom sollte möglichst lokal verbraucht

werden. Aus Tabelle 2 geht hervor, dass der Kosteneinspareffekt bei Bezugsminderung durch die Reduktion der Strombezugskosten höher ist als die Gewinne durch die vergütete Stromeinspeisung (Summe aus KWK-Bonus, vermiedenen Netznutzungsentgelten und Baseload-Preis).

Tabelle 2: Energiepreise und Vergütungen

Energiebezug	Preis	Bemerkung
Erdgas	6,36 €ct/kWh	Haushalt (einschl. MWSt. 19200 kWh/a) [9]
Energiesteuergesetz	0,55 €ct/kWh	Energiesteuerrückerstattung: Erdgas in KWK [6]
Strom – Hochtarif	23,42 €ct/kWh	Haushalt (einschl. MWSt. 3900 kWh/a) [9]
Strom – Niedrigtarif	17,565 €ct/kWh	$\frac{3}{4}$ -Hochtarif
KWK-Bonus	5,11 €ct/kWh	Vergütung nach KWK-Gesetz [7]
Verm. Netznutzungsentgelt	0,5 €ct/kWh	regional unterschiedlich, konservative Schätzung
Baseload-Preis	5,361 €ct/kWh	Quartalspreis der EEX [18]

Die deutsche Förderstruktur ist häufig ein Hindernis für die Installation von KWK-Modulen in Mehrfamilienhäusern. Sind der Betreiber des KWK-Moduls und der Stromverbraucher ein und dieselbe Person, wie im Einfamilienhaus, profitiert der Hausbewohner direkt von der Eigenstromerzeugung. In einem Mehrfamilienhaus ist der Betreiber der Heizungsanlage (eventuell mit KWK-Modul) in der Regel nicht der Verbraucher vor Ort. Der Betreiber hat nur dann ein wirtschaftliches KWK-Modul, wenn er den generierten Strom möglichst komplett an die Mietparteien verkaufen kann. Die Mieter wiederum können sich Ihren Stromlieferanten frei wählen und dies geschieht üblicherweise kostenoptimal. Der energiewirtschaftliche Nutzen für Betreiber und Verbraucher lässt sich also nur als Gemeinschaft generieren. Eine gemeinschaftliche Aufteilung des energiewirtschaftlichen Nutzens ist technisch machbar und rechtlich abgesichert. Derzeit ist dieses Modell unüblich, was auf erhebliche bürokratische Hürden zurückgeführt wird. [1]

2.1.4 Grundsätzliche KWK-Betriebsarten

KWK-Module können nach aktuellem Stand der Technik entweder wärme- oder stromgeführt betrieben werden, d. h. als Regelgröße dient entweder der Wärmebedarf oder der Strombedarf des Versorgungsobjektes. Dabei wird nur eine der Energieformen ausgeregelt. Es handelt sich um monokriterielle Regelungen. Für die Umsetzung beider Betriebsarten werden KWK-Module üblicherweise mit einem (hinreichend großen) Pufferspeicher kombiniert. Der Speicher dient sowohl bei der wärmegeführten als auch bei der stromgeführten Betriebsweise dem Ausgleich von thermischen Erzeugungs- oder Lastschwankungen und der Gewährleistung von Mindestlauf- bzw. -stillstandszeiten der KWK-Module.

Wärmegeführter Betrieb

Beim wärmegeführten Betrieb ist die Deckung des Wärmebedarfs eines Versorgungsobjektes das alleinige Regelungsziel des KWK-Moduls. Es wird unterstützend in das Heizungssystem eingebunden und versucht ausschließlich dem Wärmebedarf des Gebäudes zu folgen. Die Dimensionierung des KWK-Moduls erfolgt anhand der thermischen Grundlast des Versorgungsobjektes, um eine hohe Anzahl an Vollbenutzungsstunden zu gewährleisten. Vollbenutzungsstunden sind die Summe der Stunden eines Wärmeerzeugers bei Nennleistung. Thermische Lasten oberhalb oder unterhalb des Leistungsbereichs des KWK-Moduls werden durch den thermischen Speicher und/oder einen Spitzenlastkessel gedeckt.

Technisch erfolgt die Wärmeführung über eine Messung von einer herstellereigenen Anzahl an Pufferspeicher-, Warmwasserspeicher- und Heizkreistemperaturen und einem Vergleich dieser Messgrößen mit einem für jeden Temperaturfühler separat einstellbaren Temperatursollwert. Die Sollwerte definieren bestimmte Zustände im Heizungssystem. Diese Zustände werden mithilfe weiterer Eingangsgrößen, wie z. B. der Uhrzeit, der Außentemperatur oder der Raumtemperatur, bewertet. Ergibt die Bewertung eine Unter- oder Überschreitung von Hysterese-Schaltwerten, wird die Leistung der Wärmeerzeuger angepasst. Die Hysteresen können starr sein, oder einen integralen Anteil aufweisen. Bei der Integralregelung werden Abweichungen zum Temperatursollwert über der Zeit aufintegriert. Die Wärmeerzeugung wird bei einer vorab festgelegten maximalen Abweichung angepasst. [5]

Stromgeführter Betrieb

Beim stromgeführten Betrieb entspricht der Strombedarf des Versorgungsobjektes dem Regelungsziel des KWK-Moduls. Dementsprechend folgt das KWK-Modul ausschließlich dem elektrischen Lastgang eines Gebäudes. Eine Einspeisung von elektrischer Energie in das öffentliche Stromnetz findet nicht statt. Elektrische Lasten oberhalb der Nennleistung des KWK-Moduls führen zu Strombezug. Die gekoppelt erzeugte Wärme wird entweder thermisch zwischengespeichert oder durch ein zwingend erforderliches Notkühlsystem abgeführt. Diese Betriebsart wird für Inselssysteme verwendet, indem das KWK-Modul temporär als reiner Stromerzeuger eingesetzt wird [46,47]. Der Effizienzgewinn durch die Abwärmenutzung und die Förderung nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz [7] entfallen in diesem Fall.

Modulierende KWK-Module weisen für den stromgeführten Betriebsmodus erhebliche Vorteile auf. Sie können der stark nutzerabhängigen und stochastisch auftretenden elektrischen Last eines Versorgungsobjektes folgen. Diese Betriebsart stellt jedoch erhöhte Anforderungen an die Leistungselektronik des KWK-Moduls. Die technische Umsetzung des stromgeführten Betriebs wird durch eine Schnittstelle zwischen Stromzähler und KWK-Modul ge-

währleistet. Moderne Stromzähler erfassen die elektrische Last eines Gebäudes und geben die Momentanleistung als leistungsabhängige Taktfrequenz über Impulsschnittstellen aus. Einige KWK-Module können diese Impulsfrequenz abgreifen und der Regelung bereitstellen.

Weitere Betriebsarten

Neben den heute flächendeckend eingesetzten KWK-Betriebsarten existieren weitere Regelungsansätze im Versuchs- oder Laborstadium. Häufigster Ansatz ist die Entwicklung einer prädiktive Regelung. Hierbei bildet ein (lernendes) Prognosetool die zentrale Einheit der Regelung und entwickelt für eine bestimmte Vorlaufzeit einen Fahrplan für das KWK-Modul. Dieser Fahrplan kann auf verschiedenen Eingangsgrößen beruhen und einer beliebigen Zielfunktion folgen. [34]

Des Weiteren gibt es Ansätze die Regelung des KWK-Moduls nicht für die Bedarfe des lokalen Versorgungsobjektes, sondern für die Sollwertvorgaben eines sogenannten Virtuellen Kraftwerks auszulegen. Hierbei bestimmt eine Steuerungszentrale Sollwerte für einen Verbund dezentraler KWK-Anlagen um Netzdienstleistungen zu erbringen. [34,39]

2.2 Definition des Untersuchungsobjektes

Der thermische Energiebedarf eines Versorgungsobjektes ist maßgeblich für die Betriebsdauer und die Betriebszeitpunkte des Heizungssystems. Der thermische Lastgang ist Folge der bauphysikalischen Eigenschaften des Gebäudes, der umgebenden Bedingungen am Standort des Versorgungsobjektes und des Gebäudenutzerhaltens. Des Weiteren ist der elektrische Lastgang von hoher energiewirtschaftlicher Bedeutung für den Einsatz eines KWK-Moduls als dezentrale Wärme- und Stromversorgung (siehe **Kapitel 2.1.3**). Der elektrische Bedarf wird durch die Nutzerbedürfnisse hervorgerufen. Charakteristika im Lastgang eines Einfamilienhauses können häufig direkt einem Verbraucher zugeordnet werden, während sich im Falle eines Mehrfamilienhauses die Lastgänge der einzelnen Nutzer zu einem Gebäudelastgang überlagern. In den folgenden Kapiteln werden die Einflussgrößen des Energiebedarfs separat beschrieben und definieren den Untersuchungsrahmen dieser Arbeit.

2.2.1 Gebäudespezifikationen

Das in dieser Arbeit betrachtete Versorgungsobjekt ist ein Mehrfamilienhaus (MFH) mit zehn Wohneinheiten nach den Spezifikationen der deutschen Gebäudetypologie des Institutes Wohnen und Umwelt (IWU). **Tabelle 3** listet die bauphysikalischen und die technischen Parameter des betrachteten Mehrfamilienhauses auf. [24,25].

Tabelle 3: Gebäudeparameter des Mehrfamilienhauses [24,25]

Parameter des Mehrfamilienhauses							
Wohnfläche		Gebäudevolumen	Vollgeschosse	Wohneinheiten	A/V-Verhältnis	Bewohner	
[m ²]		[m ³]	[-]	[-]	[-]	[-]	
917,62		3353,87	4	10	0,42	22	
Bauteile							
		Dach	Außenwand	Kellerdecke	Fenster – Süd	Fenster – West/Ost	Fenster – Nord
Fläche	[m ²]	303,47	637,81	303,47	76,01	13,90	68,67
U-Wert	[W/m ² /K]	0,3	0,35	0,48	1,4	1,4	1,4
g-Wert	[-]	-	-	-	0,62	0,62	0,62
Wärmeverteilung							
Heizung	Zweirohr-Radiator-System				Nachtbetrieb: 00:00 – 06:00 Uhr Tagbetrieb: 06:00 – 22:00 Uhr Nachtbetrieb: 22:00 – 00:00 Uhr		
Heizungssystem	Wasserinhalt der Radiatoren: Wasserinhalt der Verrohrung:				400 l 110 l		
Warmwasser	Externer Warmwasserspeicher				Zirkulation: 06:00 – 24:00 Uhr		
WW-Speicher	Speicherinhalt:				500 l		

Das Mehrfamilienhaus ist bautechnisch an die Baualterklasse E (1958 – 1968) angelehnt, welche ca. 5,7 % der deutschen Wohneinheiten und ca. 4,5 % der deutschen Wohnfläche repräsentiert [25]. Das Gebäude wurde im Jahr 2002 nach geltender Energieeinsparverordnung saniert [10] und wird von 22 Personen bewohnt. Die Personenanzahl ergibt sich nach dem mittleren Wohnflächenbedarf eines Bundesbürgers aus Daten des statistischen Bundesamtes [13]. Der Standort des Mehrfamilienhauses ist München.

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass das Heizungssystem in den Nachtstunden abgeschaltet wird. Folglich kühlt das Gebäude aus und muss mit Beginn des Tagbetriebs aufgeheizt werden. Die Brauchwarmwasserverteilung erfolgt über ein Zirkulationssystem. Das Wasservolumen der Wärmeverteilung beträgt in Summe 510 l und entspricht einem Großteil der thermischen Trägheit des Mehrfamilienhauses. Die Zirkulationsleitungen sind wärmedämmend und weisen einen thermischen Verlust von ca. 8 W/m auf. Die Bestimmung dieser Kennzahlen ist in [20] erläutert.

2.2.2 Gebäudeenergiebedarf und Typtage

Das untersuchte Mehrfamilienhaus wird im Rahmen dieser Arbeit über den thermischen und elektrischen Energiebedarf und die entsprechenden Lastgänge definiert. Die Lastgänge legen die Rahmenbedingungen für Untersuchungen von Heizungssystemen mit und ohne KWK-Modul fest. Diese gebäudespezifischen Bedarfsprofile dienen als Bewertungsinstrument für die Entwicklung und Validierung der multikriteriellen Regelung. Der thermische Lastgang ist das Ergebnis von klimatologischen und bauphysikalischen Eingangsparametern und beschreibt die Einsatzbedingungen von Heizungssystemen. Der elektrische Lastgang ist das energiewirtschaftliche Bewertungsinstrument der dezentralen Stromerzeugung.

Aussagekräftige Ergebnisse zur multikriteriellen Regelung sowie für Vergleiche mit der heutigen Regelung erfordern reproduzierbare Prüfbedingungen in hoher zeitlicher Auflösung. Detaillierte thermische und elektrische Lastgänge ermöglichen experimentelle Untersuchungen von Mini-KWK-Anlagen unter praxisnahen Einsatzbedingungen, wobei es für vergleichende Untersuchungen nachteilig ist, dass Echtzeitmessungen unter dynamischen Lastbedingungen einen erheblichen Zeitaufwand mit sich bringen. Hierzu wurden in [29] und in der Dissertation von Mühlbacher [30] ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht mithilfe von fünf sogenannten Typtagen (Tageslastgänge in hoher zeitlicher Auflösung) häufig auftretende klimatologische Bedingungen während eines Jahres hochgenau in Echtzeit zu vermessen und die Ergebnisse anschließend auf Jahreswerte hochzurechnen. **Abbildung 2** zeigt den methodischen Ablauf zur Entwicklung des jährlichen Gebäudeenergiebedarfs und der Lastgänge der Typtage.

Mithilfe der Gebäudespezifikationen und den Klimadaten am Standort München wird der Heizwärmebedarf eines Jahres in einer Auflösung von 15 Minuten mit der Gesamtgebäudesimulationsumgebung TRNSYS simuliert [40]. Die Klimadaten sind dem Testreferenzjahr (TRY) der Region 13 des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) entnommen. „[...] Die Testreferenzjahre sind Datensätze ausgewählter meteorologischer Elemente für jede Stunde eines Jahres. Sie liefern die klimatologischen Randbedingungen für Simulationsrechnungen auf stündlicher Basis, insbesondere für heiz- und raumluftechnische Anlagen. [...]“ [12]

Die Simulationsergebnisse des Mehrfamilienhauses sind die Datengrundlage für die Bestimmung des Jahresheizwärmebedarfs und der Lastgänge der Typtage. Der Jahresheizwärmebedarf wird über die Integration des simulierten Lastgangs berechnet. Für die Entwicklung der Typtage werden die Simulationsergebnisse in fünf Taggruppen aufgeteilt. Diese Taggruppen basieren auf dem Testreferenzjahr. Die Daten des Testreferenzjahres werden in drei Tagesmittelaußentemperaturbänder ($T_{A,Winter} < 5^{\circ}\text{C} < T_{A,Übergang} < 15^{\circ}\text{C} < T_{A,Sommer}$) und zwei Bewölkungsgrade ($B_{Heiter} < 6/8 < B_{Trüb}$) unterteilt (siehe Abbildung 2). Dementsprechend repräsentieren die Taggruppen spezifische klimatologische Bedingungen und fassen simu-

lierte Tageslastgänge mit entsprechenden Eigenschaften zusammen. Die Taggruppen sind trübe und heitere Wintertage, trübe und heitere Übergangstage sowie Sommertage. [29,30]

Jede Taggruppe enthält eine bestimmte Anzahl an simulierten Tageslastgängen, die den festgelegten Bedingungen genügen. Für jede Taggruppe wird ein Typtag bestimmt, der die Eigenschaften der Taggruppe und die Realitätsnähe des Testreferenzjahres aufweist. Hierzu wird für jede Taggruppe ein mittlerer Tageslastgang berechnet. Anschließend wird jener Tag einer Taggruppe als Typtag ausgewählt, der die geringste Abweichung (nach der Varianzanalyse) zum mittleren Taggruppen-Tageslastgang aufweist. Mit dieser Methodik bleiben die Dynamik eines Tages und gleichzeitig die Repräsentativität für die Taggruppe erhalten.

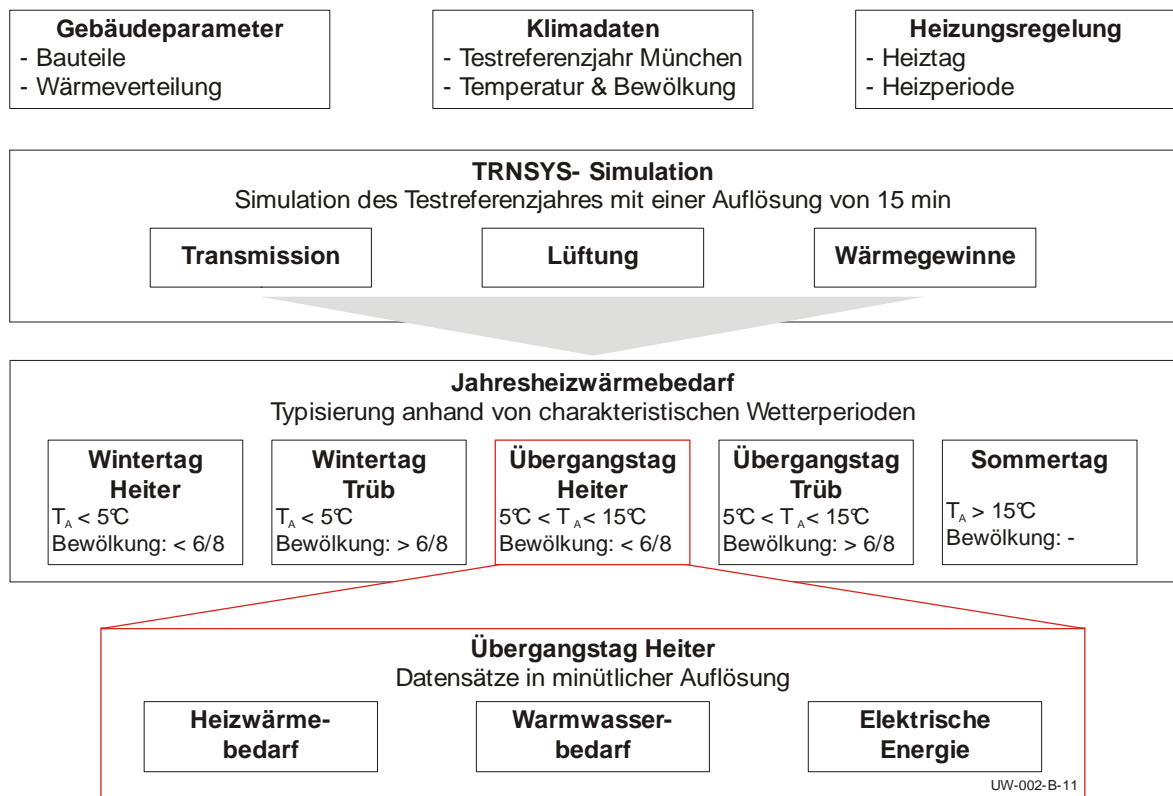


Abbildung 2: Entwicklung des Gebäudeheizwärmebedarfs und der Typtage

Die Typtage werden durch den Warmwasserbedarf (Brauchwarmwasser und Zirkulation) und den Stromlastgang komplettiert. Das Zapfprofil und der Tagesbedarf für Brauchwarmwasser an einem „Normaltag“ sind Mühlbacher [30] entnommen und wurden durch messtechnische Untersuchungen an realen Gebäuden mit darauf aufbauenden Simulationen entwickelt. Der elektrische Lastgang ist angelehnt an die VDI-Richtlinie 4655 und detailliert in [51] beschrieben. Die Lastprofile sind aus Messungen an Ein- und Mehrfamilienhäusern über die Dauer

von bis zu zwei Jahren hervorgegangen, wodurch die Datenbasis eine Synthetisierung zu Tageslastprofilen erlaubt. Die daraus resultierenden elektrischen Referenzlastprofile dienen im Rahmen der VDI-Richtlinie der Auslegung und Wirtschaftlichkeitsberechnung von KWK-Anlagen. Der Jahresenergiebedarf und die Tagesenergiebedarfe der entwickelten Typtage sind in **Tabelle 4** aufgelistet.

Tabelle 4: Energiebedarfe des Mehrfamilienhauses

Energiebedarfe			
	Heizwärme in kWh	Warmwasser in kWh	Elektrische Energie in kWh
Jahresenergiebedarf	62744,9	21600,7	30195,5
Wintertag – Trüb	384,6	59,2	86,6
Wintertag – Heiter	366,4	59,2	96,3
Übergangstag – Trüb	161,7	59,2	82,2
Übergangstag – Heiter	68,6	59,2	83,4
Sommertag	0	59,2	70,2

2.2.3 Lastgänge des Typtages *Übergangstag – Heiter*

Für die Entwicklung der multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung ist der zeitliche Verlauf der energetischen Größen und der regelungstechnischen Parameter der Gebäudeenergieversorgung von zentraler Bedeutung. Um die Funktionalität der entwickelten Regelung von KWK-Anlagen in allen Details genau beschreiben zu können und die regelungstechnischen Verbesserungen deutlich zu machen, werden, wie in **Kapitel 1.3** definiert, die Methodik und die Ergebnisse dieser Arbeit anhand des *Übergangstag – Heiter* beschrieben und analysiert.

Die thermischen und elektrischen Leistungen des *Übergangstag – Heiter* sind in **Abbildung 3** dargestellt. Hier sind im oberen Diagramm der Heizwärmebedarf $\dot{Q}_{\text{Heizung,Soll}}$ auf der primären Ordinate und die Außentemperatur des Typtages T_A auf der sekundären Ordinate über der Uhrzeit aufgetragen. Das Mehrfamilienhaus benötigt aufgrund des vorliegenden Verlaufs der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung (nicht gezeigt) keine Raumheizwärme in den Nachmittagsstunden. Die Transmissionswärmeverluste verhalten sich umgekehrt proportional zur Außentemperatur und die solaren Gewinne steigen mit der Einstrahlung. Lediglich 23 % des Tagesheizwärmebedarfs wird in der zweiten Tageshälfte benötigt. Der nachmittägliche Wärmebedarf zwischen 11:00 Uhr und 18:00 Uhr besteht lediglich aus regelmäßigen Warmwasserzapfungen und der kontinuierlichen Entladung des Warmwasserspeichers durch die Zirkulation (siehe unteres Diagramm von **Abbildung 3**). Gleichzeitig zeigt

der Verlauf der elektrischen Last des Mehrfamilienhauses im mittleren Diagramm von Abbildung 3 in den Nachmittagsstunden Maximalwerte von bis zu $6,5 \text{ kW}_{\text{el}}$. Des Weiteren ist der Mittelwert des elektrischen Bedarfs in der zweiten Hälfte des Tages um $820 \text{ W}_{\text{el}}$ höher als in der ersten Hälfte und liegt bei $3886 \text{ W}_{\text{el}}$. Es existiert somit in der Übergangszeit ein zeitlicher Versatz zwischen Wärme- und Strombedarf, der eine Entkopplung von Wärmeerzeugung und -bedarf für eine hohe Eigenstromnutzung nötig macht.

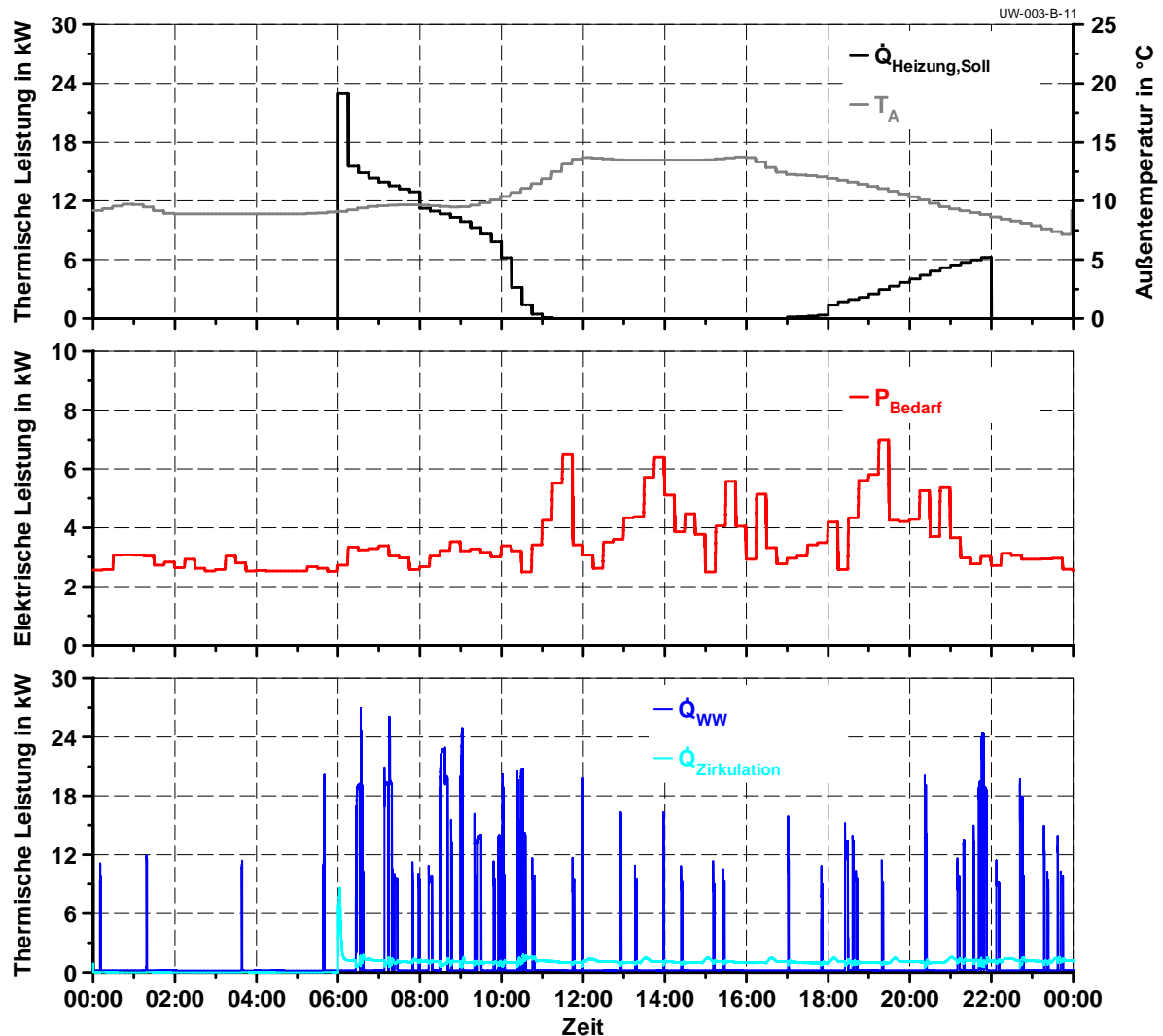


Abbildung 3: Thermische und elektrische Leistungen des Übergangstags – Heiter

Aus Tabelle 4 geht hervor, dass der Wärmebedarf des betrachteten Mehrfamilienhauses am *Übergangstag – Heiter* (ohne Verluste der Heizungskomponenten) $127,8 \text{ kWh}_{\text{th}}$ beträgt. Das bedeutet, dass der Wärmebedarf dieses Typtages durch ein Mini-KWK-Modul mit einer thermischen Leistung von $\dot{Q}_{\text{KWK}} = 12,5 \text{ kW}_{\text{th}}$ in Kombination mit einem Pufferspeicher monovalent (alleinig) gedeckt werden könnte. D. h. der Spitzenlastkessel wird theoretisch nicht für die Versorgung der Wärmeenergie dieses Typtages benötigt. Darüber hinaus ist der elektri-

sche Bedarf hoch genug, um den erzeugten Strom bei monovalenter Wärmedeckung auch im Gebäude zu verwenden. Die Wärmeerzeugung eines Mini-KWK-Moduls (und damit die gekoppelte Stromerzeugung) wird an diesem Typtag durch die benötigte Wärmemenge begrenzt, d. h. die Auswahl der Betriebszeiten des KWK-Moduls sollten durch einen gesteuerten Einsatz des Pufferspeichers optimiert werden.

Aufgrund der zeitlich versetzten Lastgänge am *Übergangstag – Heiter* eignet sich dieser Typtag in besonderem Maße für die Darstellung der multikriteriellen Regelung. Die in Abbildung 3 gezeigten Lastgänge bilden im Rahmen dieser Arbeit die energetischen Rahmenbedingungen für die Entwicklung der Regelung, die Beschreibung des Regelungsalgorithmus sowie für die Erläuterungen der resultierenden Veränderungen in der Gebäudeenergieversorgung.

2.3 Spezifizierung der Gebäudeenergieversorgung

Die Endenergieversorgung des bauphysikalisch und energetisch definierten Mehrfamilienhauses erfolgt über einen Gas- und einen Stromnetzanschluss. Das KWK-Modul wird netzparallel betrieben. Die installierten Komponenten zur Bereitstellung und Verteilung von Nutzwärme sind

- ein modulierendes KWK-Modul,
- eine modulierende Gasbrennwerttherme,
- ein skalierbarer Pufferspeicher,
- ein externer Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 500 l und
- das hydraulische Verteilnetz.

2.3.1 Technische Gebäudeausrüstung

Die Wärmeversorgung des Mehrfamilienhauses erfolgt zentral über ein hydraulisches Verteilnetz mit Radiatorheizkörpern. Das modulierende KWK-Modul ist auf ca. 25 % der thermischen Spitzenlast ausgelegt. Hierbei handelt es sich um die übliche Auslegungsgröße von KWK-Modulen zur Deckung der thermischen Grundlast in Wohngebäuden. Diese Dimensionierung gewährleistet eine hohe Anzahl an Vollbenutzungsstunden des KWK-Moduls über das gesamte Jahr. Vergleichbare KWK-Module und vergleichbare Dimensionierungen wurden in [19] und [29] untersucht und die Ergebnisse belegen, dass durch die gewählte Dimensionierung üblicherweise eine hohe jährliche Laufzeit des Mini-KWK-Moduls erreicht wird.

Die modulierende Gasbrennwerttherme ist als Spitzenlastkessel (SLK) parallel zum KWK-Modul ins Heizungsnetz eingebunden. Die Therme stellt die benötigte Restwärme bereit, wenn die thermische Last nicht durch das KWK-Modul gedeckt werden kann. Das Heizungs-system wird durch einen Pufferspeicher ergänzt, der den Betrieb des KWK-Moduls vergleichmäßigen soll. Der externe Warmwasserspeicher hält temperiertes Wasser für Zapfungen vor. Aus hygienischen Gründen und den Komfortbedürfnissen der Gebäudenutzer zirkuliert das Warmwasser im Gebäude.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Wärmeerzeuger sind das Vaillant ecoPOWER Mini-KWK-Modul mit einer thermischen Nennleistung von $12,5 \text{ kW}_{\text{th}}$ und einer elektrischen Nennleistung von $4,7 \text{ kW}_{\text{el}}$ [46] und die Vaillant Gasbrennwerttherme ecoTEC exclusiv VC 466 mit einer thermische Nennleistung von $45,0 \text{ kW}_{\text{th}}$ [45]. Die beiden Geräte kommunizieren über eine gemeinsame Schnittstelle, mit der das KWK-Modul die Therme freigeben und eine Sollvorlauftemperatur vorgeben kann. Die beiden Wärmeerzeuger sind in **Abbildung 4** dargestellt.



UW-004-B-11

Abbildung 4: Außenansicht der Vaillant-Geräte ecoPOWER Mini-KWK-Modul und ecoTEC exclusiv VC 466 Gasbrennwerttherme [45,46]

Das ecoPOWER ist ein verbrennungsmotorisches KWK-Modul mit einem Hubraum von 252 cm^3 . Die Modulationsfähigkeit des KWK-Moduls entsteht durch eine Drehzahlvariation des Verbrennungsmotors, womit die mechanische Leistung angepasst wird. Die Drehzahl des Einzylinder-Viertakt-Motors ist in einem Drehzahlband von 1200 U/min bis 3600 U/min stufenlos variabel. Durch den Einsatz eines permanenterregten Synchrongenerators mit Frequenzumrichter (Gleichstromzwischenkreis) lässt sich die Netzfrequenz unabhängig von der mechanischen Drehzahl einhalten. Die integrierte Mess-, Regelungs- und Steuerungstechnik (MSR-Technik) übernimmt den gesamten elektrischen und thermischen Betrieb des Mini-

KWK-Moduls und kann bis zu zwei Heizkreise, die Aufbereitung und Verteilung von Brauchwarmwasser, den Spitzenlastkessel sowie den Pufferspeicher steuern. Eine detaillierte Beschreibung der Standardregelung des ecoPOWER Mini-KWK-Moduls findet sich in **Kapitel 3**. [46]

Die Gasbrennwerttherme ist ein wandhängendes Gerät mit Gebläsebrenner für die Heizungs- und Brauchwarmwasserversorgung, das durch eine vordefinierte Schnittstelle als Spitzenlastkessel für das ecoPOWER Mini-KWK-Modul fungiert. Der Mindestvolumenstrom des internen Wärmetauschers beträgt 1150 l/h [45]. Die interne Verrohrung und der Wärmetauscher der Therme fassen lediglich 2,4 l Heizungswasser [4]. Der geringe Wasserinhalt führt zu einer schnellen Regelung des Spitzenlastkessels. Die thermische Leistung der Gasbrennwerttherme lässt sich stufenlos zwischen der thermischen Mindestleistung von ca. 20 kW_{th} und der Nennleistung von 45,0 kW_{th} einstellen.

2.3.2 Auslegung der Pufferspeicher

KWK-Module zur Heizungsunterstützung werden üblicherweise mit einem Pufferspeicher kombiniert. Dieser wird in der Regel direkt mit dem KWK-Modul verbunden, gewährleistet Mindestlauf- und/oder -stillstandszeiten und reduziert die Anzahl der Motorstarts. Der Pufferspeicher vergleichmäßigt die Dynamiken im Heizungssystem des Gebäudes, indem durch Speicherinhalt und Speicherkapazität eine thermische Unter- oder Überversorgung des Gebäudes abgefedert wird. Durch die Speicherung von kurzzeitig auftretender Überschusswärme kann der Pufferspeicher die jährliche Laufzeit eines KWK-Moduls verlängern. Eine gezielte Entkopplung von thermischem Bedarf und thermischer Erzeugung findet jedoch nach dem Stand der Technik nicht statt.

Um den Einfluss eines Pufferspeichers auf den Betrieb eines KWK-Moduls zu evaluieren und um die Möglichkeiten eines gezielten Einsatzes des Pufferspeichers zu analysieren, werden in dieser Arbeit drei Pufferspeicher untersucht und bewertet. Die Auslegung der Pufferspeicher erfolgt einerseits nach dem heutigen Standardvorgehen (siehe Auslegung von Pufferspeicher 1) und andererseits mit dem Ziel der Maximierung des Produktionsdeckungsgrades nach Gleichung 10 (siehe Auslegung von Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3). Die beiden Auslegungsvarianten sind in den folgenden Absätzen näher beschrieben.

Auslegung von Pufferspeicher 1

Für die Dimensionierung des Speichervolumens existieren in der Literatur spezifische Erfahrungswerte. Diese besagen, dass der Pufferspeicher auf ein Volumen zwischen 50 l/kW_{th} und 100 l/kW_{th}, bzw. zwischen 60 l/kW_{th} und 70 l/kW_{th}, ausgelegt sein sollte [3]. Für das Vaillant ecoPOWER Mini-KWK-Modul bedeutet dies ein erforderliches Speichervolumen zwischen 650 l und 1250 l. Der Hersteller bietet zum KWK-Modul entsprechende Speichergro-

ßen an. Für die folgenden Untersuchungen in dieser Arbeit beschreibt der Pufferspeicher 1 den Standardspeicher mit einem Speichervolumen von 1000 l, welcher im üblichen Lieferumfang des Herstellers enthalten ist.

Auslegung von Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3

Die Möglichkeiten einer zeitlichen Entkopplung von Wärmebedarf und -erzeugung durch Pufferspeicher steigen mit dem Speichervolumen. Größere Speicherfähigkeit bedeutet eine stärkere Entkopplung von Wärmebedarf und -erzeugung und einen dementsprechend größeren Freiheitsgrad für einen gesteuerten KWK-Betrieb. Das optimale Speichervolumen ist abhängig von der verwendeten Zielfunktion der Speicherauslegung. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Speicher für die Maximierung des Produktionsdeckungsgrades ausgelegt und nach Gleichung 10 gilt somit, dass

$$d_{el,KWK,Produktion} = \frac{W_{el,KWK,Produktion}}{W_{el,netto}} = \textit{Maximal} \textit{ wird.}$$

Die Forderung wird erfüllt, wenn die Einspeisung Null wird und der erzeugte Strom vollständig im Gebäude verbleibt. Die Reduktion der verbrauchsgebundenen Kosten durch Strombezugsminderung entspricht dem wirtschaftlich optimalen Betrieb einer dezentralen Stromerzeugung mit KWK-Modulen (siehe Kapitel 2.1.3).

Die Auslegung der Pufferspeicher erfolgt auf Basis der thermischen Speicherkapazität in der Einheit Kilowattstunden. Die thermische Speicherkapazität kann über die nutzbare Speichertemperaturdifferenz in ein Speichervolumen umgerechnet werden und erlaubt damit eine Übertragbarkeit der Auslegungsergebnisse auf verschiedene Speichertypen mit unterschiedlichem Schichtungsverhalten. Für vergleichende, aussagekräftige Untersuchungen zur multikriteriellen Regelung werden zwei Speichertypen mit näherungsweise gleicher Speicherkapazität Q_{PS} (gleichem Speichervolumen), aber unterschiedlichem thermischen Verhalten eingesetzt. Die Auslegung wird in vier Schritten durchgeführt:

1. Jahresdauerlinie der thermischen Last mit zugeordneter elektrischer Last
2. Berechnung der Wärme- und Stromerzeugung mit verschiedenen Speichergrößen
3. Szenarios der Einsatzzeit des KWK-Moduls
4. Analyse der Szenarios anhand des Produktionsdeckungsgrades

Die Methodik der Pufferspeicherauslegung ist in **Abbildung 5** als Programmablaufplan skizziert und wird im Folgenden anhand der einzelnen Auslegungsschritte erläutert. Weitere Erläuterungen zur Auslegungsmethodik sind in [21] und [53] zu finden.

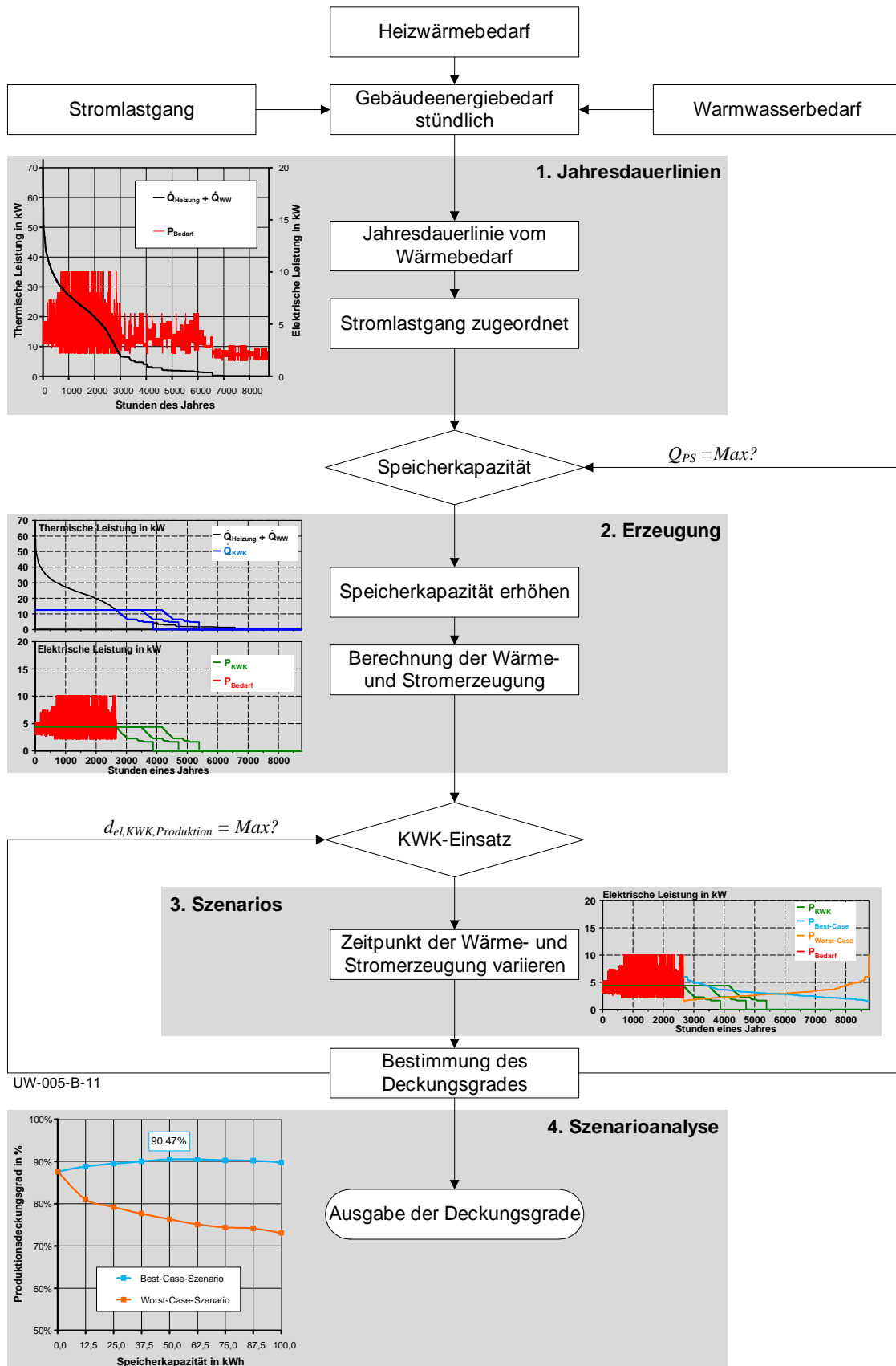


Abbildung 5: Auslegung der Speicherkapazität auf den Produktionsdeckungsgrad

Zu 1. Jahresdauerlinien:

Die Ermittlung der optimalen Speicherkapazität erfolgt anhand der sortierten Jahresdauerlinie des stündlichen thermischen Bedarfs des untersuchten Mehrfamilienhauses. Die elektrische Last wird nicht sortiert, sondern bleibt der jeweiligen thermischen Leistung zugeordnet. Im ersten Abschnitt von Abbildung 5 ist der Wärmebedarf mit zugeordneter elektrischer Last über den Stunden eines Jahres dargestellt.

Zu 2. Erzeugung:

Die Auslegung der Speicherkapazität erfolgt über einen iterativen Optimierungsprozess. Hierbei wird zuerst die Speicherkapazität schrittweise vergrößert und anschließend Wärme- und Stromerzeugung des Mini-KWK-Moduls mit der jeweiligen Speicherkapazität berechnet. Die Speicherkapazität wird in Schritten von $12,5 \text{ kWh}_{th}$, einer Vollbenutzungsstunde des KWK-Moduls, erhöht. Die maximale Speicherkapazität $Q_{PS,max}$ ergibt sich aus der Überlegung, dass die gesamte produzierte Wärmemenge während der Nachtabschaltung des Heizungssystems zwischengespeichert werden sollte und beträgt somit $Q_{PS,max} = 100 \text{ kWh}_{th}$. Die Graphen im zweiten Abschnitt von Abbildung 5 zeigen in der oberen Hälfte die thermische Last sowie die Wärmeerzeugung bei Speicherkapazitäten von $Q_{PS} = 0 \text{ kWh}_{th}$, $Q_{PS} = 50 \text{ kWh}_{th}$ und $Q_{PS} = 100 \text{ kWh}_{th}$.

Mit der Vergrößerung der Speicherkapazität verlängert sich die Laufzeit des KWK-Moduls bei gleichzeitiger Entkopplung von Wärmeerzeugung und -bedarf. Läuft das KWK-Modul ohne Pufferspeicher ($Q_{PS} = 0 \text{ kWh}_{th}$) nur in Zeiten, in denen die erzeugte Wärmemenge auch tatsächlich vom Heizungssystem abgenommen werden kann, so führt bereits eine Speicherkapazität von $12,5 \text{ kWh}_{th}$ zu einer Verlängerung der KWK-Laufzeit um 210 Stunden pro Jahr. Die maximale Speicherkapazität von 100 kWh_{th} bedeutet für das untersuchte Mehrfamilienhaus eine Laufzeitverlängerung von 1513 h/a. Hierbei handelt es sich um Stunden, in denen der Wärmebedarf kleiner ist als die Wärmeerzeugung. Die resultierende Überschusswärme der zusätzlichen Betriebsstunden dient der Deckung der thermischen Last zu Spitzenzeiten. Der Pufferspeicher gleicht somit Differenzen zwischen Wärmebedarf und -erzeugung innerhalb eines Tages aus, wodurch die zusätzlichen Betriebsstunden durch den Tageswärmebedarf limitiert werden.

Zu 3. Szenarios:

Neben der reinen Laufzeitverlängerung ergibt sich der eigentliche Nutzen der Speicherkapazität aus dem entstehenden Freiheitsgrad, dass die Zeitpunkte des thermischen Ausgleichsprozesses während eines Tages „quasi“ frei wählbar sind. Mit der temporären Entkopplung von Wärmebedarf und -erzeugung wird die Möglichkeit geschaffen den Einsatzzeitpunkt des KWK-Moduls zu variieren und die Stromerzeugung am Strombedarf auszurichten. Die

Zeitpunkte, in denen das KWK-Modul aufgrund des Wärmebedarfs in Betrieb ist, sind in Abschnitt 3 der Abbildung 5 durch den roten Verlauf des elektrischen Bedarfs gekennzeichnet. Der orange Lastverlauf beschreibt den Worst-Case und der hellblaue Lastverlauf zeigt den Best-Case der Einsatzzeitpunkte des KWK-Moduls. Im Worst-Case-Szenario wird das KWK-Modul bei elektrischer Minimallast und im Best-Case-Szenario zu den Maximallastzeitpunkten eingesetzt. Die grünen Verläufe repräsentieren die Stromerzeugung des KWK-Moduls bei Speicherkapazitäten von $Q_{PS} = 0 \text{ kWh}_{th}$, $Q_{PS} = 50 \text{ kWh}_{th}$ und $Q_{PS} = 100 \text{ kWh}_{th}$.

Zu 4. Szenarioanalyse:

Die Szenarioanalyse zeigt in Abschnitt 4 der Abbildung 5, dass ein gesteuerter Einsatz des KWK-Moduls mithilfe der Speicherkapazität entscheidend für die Maximierung des Produktionsdeckungsgrades ist. Ungünstig gewählte Einsatzzeitpunkte des KWK-Moduls erhöhen lediglich die Stromeinspeisung und nicht die Deckung des elektrischen Bedarfs des untersuchten Mehrfamilienhauses (siehe Worst-Case-Szenario). Der deterministische Ansatz des Best-Case-Szenarios weist ein Deckungsgradmaximum von 90,5 % bei $Q_{PS} = 50 \text{ kWh}_{th}$ auf. Größere Speicherkapazitäten erhöhen die KWK-Laufzeit und die Stromerzeugung, jedoch bei gleichzeitiger Erhöhung der Stromeinspeisung. Folglich fällt der Produktionsdeckungsgrad wieder. Mit einer thermischen Speicherkapazität von 50 kWh_{th} kann das KWK-Modul in allen Stunden des Jahres eingesetzt werden, in denen der elektrische Bedarf des untersuchten Mehrfamilienhauses größer oder gleich der elektrischen Nennleistung des KWK-Moduls ist.

Unter der Annahme einer nutzbaren Speichertemperaturdifferenz von 20 Kelvin ergibt sich bei einer Speicherkapazität von 50 kWh_{th} nach Gleichung 1 ein Speichervolumen von 2149,5 l. Entsprechend dieser Berechnung und den üblichen am Markt erhältlichen Speichervolumina wird für Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3 ein Speichervolumen von 2000 l für alle weiteren Untersuchungen angesetzt.

2.3.3 Auswahl der Pufferspeicher

Die Auswahl der Pufferspeicher für die Entwicklung der Speicherzustandsbestimmung sowie für die Untersuchung der Sensitivität der entwickelten Methodik erfolgt anhand

- der Marktverfügbarkeit der Pufferspeicher,
- unterschiedlichem Speichervolumen und
- unterschiedlichem thermischen Verhalten der Pufferspeicher,

um eine allgemeingültige Funktionalität der Speicherzustandsbestimmung zu gewährleisten, und um mithilfe von vergleichenden Analysen die Allgemeingültigkeit zu bewerten.

Es werden drei Pufferspeicher ausgewählt. Pufferspeicher 1 und Pufferspeicher 2 entsprechen der vom Hersteller des KWK-Moduls bevorzugten Konstruktion, unterscheiden sich lediglich im Speichervolumen. Unterschiedliches Speicherverhalten wird durch Vergleiche zwischen Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3 untersucht. Pufferspeicher 3 ist ein am Markt verfügbares Produkt mit internen Einbauten zur Schichtung des Heizungswassers. **Abbildung 6** zeigt die schematischen Zeichnungen der drei ausgewählten Speichertypen. [35,46,55]

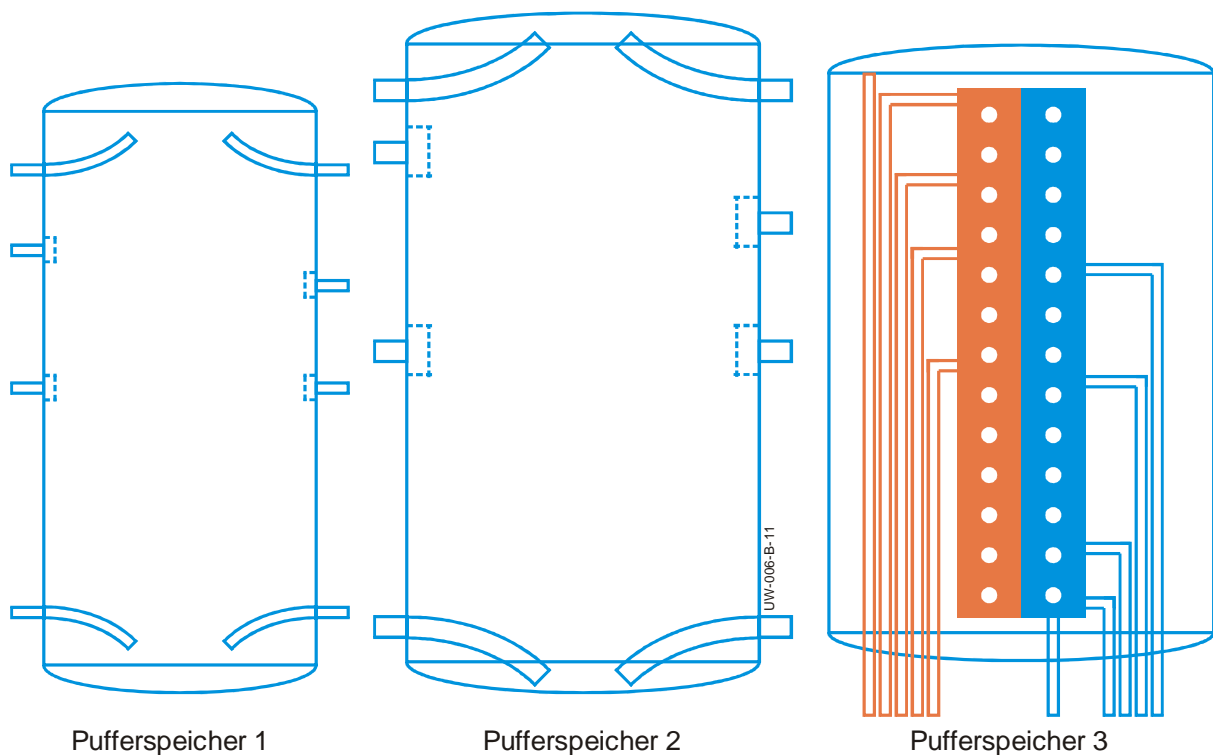


Abbildung 6: Technische Zeichnung der ausgewählten Pufferspeicher

Pufferspeicher 1 und Pufferspeicher 2 haben identische Einbauten. Die oberen und die unteren Anschlüsse verfügen über Leitrohre, die das gesamte Speichervolumen nutzbar machen. Die beidseitig mittig angebrachten hydraulischen Anschlüsse reduzieren die Einströmgeschwindigkeit über so genannte Prallplatten. Diese sollen Vermischungen und Verwirbelungen verringern. Die in der Speicherhöhe verteilten Anschlüsse ergeben sich aus der voraussichtlichen Temperatur des ein- oder ausströmenden Wassers am jeweiligen Anschluss und sollen die Wasserschichtung vereinfachen.

Pufferspeicher 3 ist explizit für eine Schichtung des Speicherwassers entwickelt worden. Die Schichtung erfolgt über zwei interne Strömungszylinder, jeweils einen für den Vorlauf der Wärmeerzeuger und -verbraucher und einen für den Rücklauf der angeschlossenen Wärmeerzeuger und -verbraucher. Die Schichtung der ein- oder austretenden Volumenströme erfolgt innerhalb der Zylinder. Erst anschließend tritt das Speicherwasser in der entsprechen-

den Speicherhöhe durch die Öffnungen der Schichtungszyylinder in das eigentliche Speichervolumen ein. Turbulenzen und Vermischungen werden somit vom Speichervolumen separiert. Die internen Einbauten bestehen aus Kunststoff und verhindern Wärmeleitvorgänge zwischen einzelnen Wasserschichten. Als weitere Besonderheit ist zu nennen, dass alle Anschlüsse durch die Bodenisolierung herausgeführt werden und intern mit den Schichtungszyindern verbunden sind. Auf diese Weise wird die Mantelisolierung nicht durchbrochen und verhindert die Entstehung von Wärmebrücken über die hydraulischen Anschlüsse. Die Speichermaße der drei Pufferspeicher finden sich in Anhang A.1.

2.4 Beschreibung der Prüfstandsumgebung

Hochdynamische Betriebszustände sind in Gebäuden mit KWK-Modulen zur Heizungsunterstützung nicht unüblich. Insbesondere die Speicherzustände sind hoch nichtlinear und schwer im Rahmen von Simulationen nachzubilden. Diese Komplexität von Heizungssystemen hat dazu geführt, dass am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik im Rahmen von verschiedenen Projekten ein Prüfstand entwickelt und aufgebaut wurde, der thermische Betriebszustände von Ein- und Mehrfamilienhäusern reproduzierbar und dynamisch nachbilden kann. [19,20,29,30]

Der sogenannte KWK-Prüfstand besteht aus fünf Hauptkomponenten und der Verrohrung. Die Hauptkomponenten sind das KWK-Modul, der Spitzenlastkessel, der Pufferspeicher, der Warmwasserspeicher und die Gebäudesimulation. Die Wärmeverbraucher sind in der Gebäudesimulation zusammengefasst, die unter der Prämisse einer dynamischen thermischen Last, inklusive der thermischen Trägheiten eines Wohngebäudes, entwickelt wurde. Wärmetauscher mit motorisch geregelter Kühlwasservolumenstrom (Wärmesenke) simulieren die thermische Last des Heizungssystems eines Wohngebäudes. Hohe thermische Warmwasserzapfleistungen werden mithilfe des sogenannten Zapfgenerators erzeugt, der das Verhalten von Badarmaturen nachahmt. Die thermische Trägheit eines Wohngebäudes wird durch kombinierbare, zuschaltbare und durchströmte Wasserbehälter, die den Wasserinhalt eines realen Heizungssystems fassen, nachgebildet. Mithilfe dieses Prüfstandsbaus können den Pufferspeichern und den Wärmeerzeugern beliebige Aufheiz- und Abkühlvorgänge eines Gebäudes dynamisch aufgeprägt werden. Der KWK-Prüfstand ermöglicht somit realitätsnahe Untersuchungen von Heizungssystemen. [19,29]

Zur Realisierung der temperaturbasierten Speicherzustandsbestimmung von Pufferspeichern für eine multikriterielle Regelung musste im Rahmen dieser Arbeit die Prüfstandssoftware an die mess- und regelungstechnischen Bedürfnisse der Aufgabenstellung angepasst werden. Hierzu wurde die Struktur der parallelen While-Loops [26] in LabVIEW [33] für die

Prüfstandssoftware gewählt. Diese ermöglicht Updates des Mess-, Steuer- und Regelungsprogramms ohne Änderung des Programmhauptteils. Der Programmhauptteil übernimmt die Grundfunktionen „Messwerte aufnehmen“ und „Speichern“. Dabei werden die Messwerte im Sekundentakt abgetastet und abgespeichert. Das Prüfstandsprogramm berechnet die thermischen und elektrischen Leistungen und Energien sowie regelungstechnische Größen und Effizienzen kontinuierlich und speichert diese Werte zusammen mit den Messwerten in einer Datei. Anschließend kann diese Datei mit der Software DIAdem [32] geöffnet und bearbeitet werden. Auf diese Weise werden alle dynamischen Vorgänge in Echtzeit erfasst und als Datensatz eines Typtages zur Auswertung und Analyse zur Verfügung gestellt. [26]

2.4.1 Hydraulisches Schema und Bilanzgrenzen

Die Konstruktion des Prüfstands erlaubt eine Vielzahl an hydraulischen Verschaltungen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde ein hydraulisches Schema nach **Abbildung 7** gewählt. Eine entsprechende Verschaltung ist in der Praxis üblich. Der Pufferspeicher ist zentral zwischen den Wärmeerzeugern und -verbrauchern platziert.

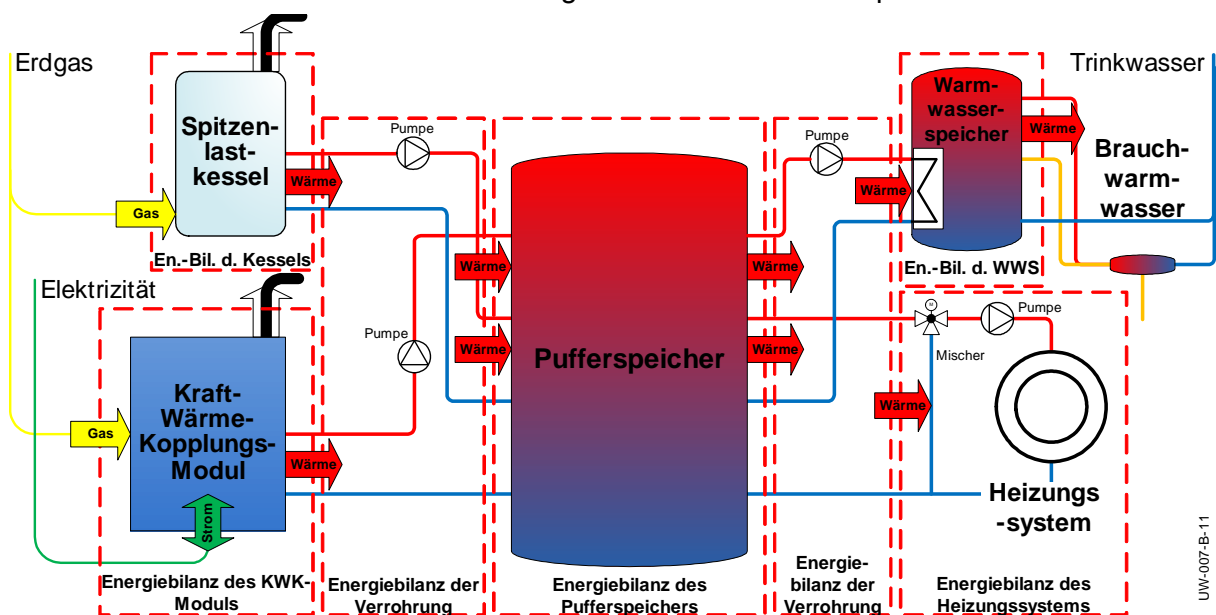


Abbildung 7: Hydraulisches Schema des untersuchten Heizungssystems

Darüber hinaus sind in **Abbildung 7** die Bilanzgrenzen der Hauptkomponenten und die Energieströme zwischen den einzelnen Bilanzgrenzen eingezeichnet. Die zusätzliche Messtechnik und die hydraulischen Einbauten für die Gebäudesimulation, sowie die räumliche Situation im Lehrstuhllabor, führen zu Wärmeverlusten des Prüfstands, die in der Realität in einem Wohngebäude nicht auftreten würden. Aus diesem Grund werden die Rohrleitungen des Prüfstands gesondert bilanziert und in der Jahreshochrechnung der Prüfstandsergebnisse berücksichtigt.

Jeder Bilanzkreis wird getrennt voneinander vermessen und bilanziert. Die Messung der relevanten Größen für die Berechnung der Kennzahlen des Heizungssystems wird im folgenden Kapitel am Beispiel des Bilanzkreises „KWK-Modul“ gezeigt.

2.4.2 Messtechnik und Messaufbau des Bilanzkreise „KWK-Modul“

Die Messtechnik des KWK-Prüfstands besteht aus Messstellen für Temperaturen, Drücke und Volumenströme von Wasser und Erdgas sowie für elektrische Leistungen und Energien. Dieses messtechnische Konzept gewährleistet die Berechnung aller relevanten Größen eines Bilanzkreises. Für den Bilanzkreis des KWK-Moduls sind in **Abbildung 8** die Messpunkte und die Messinstrumente eingezeichnet. Hier, sowie in allen weiteren Bilanzkreisen, erfolgt die Berechnung der thermischen Leistung über eine getrennte Messung der Vor- und Rücklauftemperatur und des Volumenstroms. Die Vor- und Rücklauftemperatur wird mit Platin-Widerstandsthermometern des Typs Pt100 gemessen [22]. Die Thermometer werden in der Genauigkeitsklasse B in 4-Leitertechnik installiert und anschließend über einen Kalibrator auf eine Genauigkeit von $\pm 0,1$ K kalibriert [2]. Die Kalibrierung erfolgt nicht direkt am Thermometermesswert, sondern der Wert der Datenerfassung wird korrigiert. Somit wird die gesamte Messstrecke, bestehend aus Kabeln und Messwandler, mitkalibriert. [26]

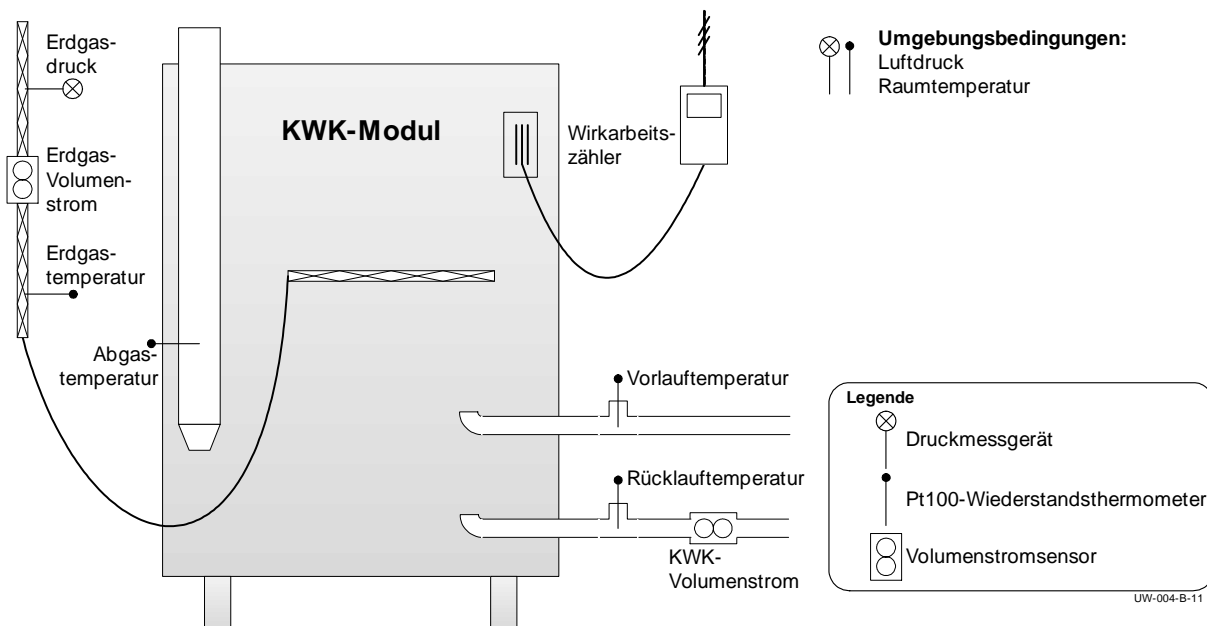


Abbildung 8: Messtechnik und Messaufbau des Bilanzraums KWK-Modul

Für die Bestimmung des Volumenstroms werden magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte (MID) eingesetzt, die über Induktion die Strömungsgeschwindigkeit des fließenden Heizungswassers messen und diese zusammen mit dem Rohrquerschnitt in einen Volumenstrom umrechnen. Die Genauigkeit der installierten MIDs beträgt $\pm 0,5$ % bei einem Messbereich von $0 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $282 \text{ m}^3/\text{h}$. Die MIDs geben ein kontinuierliches, dem Volumenstrom pro-

proportionales, Analogsignal aus, welches am Messrechner zur Bestimmung der thermischen Leistung in den Volumenstrom umgerechnet wird. [15]

Die elektrische Leistung des KWK-Moduls wird ohne Nebenverbraucher direkt am Generator und mit Nebenverbrauchern an der Einspeisestelle gemessen. Die Brutto- und Nettoleistung werden über Multifunktions-Messumformer erfasst, die ein zur bezogenen oder eingespeisten Leistung proportionales Analogsignal ausgeben. Die Messumformer haben eine Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ bei einem Eingangsspannungsbereich von 40 V bis 750 V und einem Eingangstrom von 1 A. Der Eingangstrom wird über vorgeschaltete Messwandler begrenzt. [31]

Die Gasmengen der Wärmeerzeuger werden über Balgengaszähler mit einer Impulsrate von einem Impuls pro Kubikdezimeter Erdgas erfasst. Diese sogenannten Experimentiergaszähler haben einen Messbereich von 0,06 m³/h bis 10 m³/h bei einem maximalen Erdgasüberdruck von 0,5 bar. Die maximale Messabweichung wird vom Hersteller mit 2 % angegeben. [14]

3 Stand der Technik von Mini-KWK-Anlagen

Für die Entwicklung der multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung ist die genaue Kenntnis des Stands der Technik unverzichtbar. Mithilfe einer genauen Analyse der heute üblichen Heizungssysteme und den Regelungsvorgängen der Standardregelung können Optimierungsansätze identifiziert werden, die in Verbesserungen des KWK-Einsatzes münden. In den folgenden Kapiteln wird der wärmegeführte Betrieb (Standardregelung) des ecoPOWER Mini-KWK-Moduls mit Pufferspeicher 1 genau vorgestellt. Diese Konfiguration entspricht dem Stand der Technik dezentraler KWK-Anlagen zur Heizungsunterstützung in Wohngebäuden.

3.1 Mess-, Steuer-, und Regelungstechnik

Die MSR-Technik des ecoPOWER Mini-KWK-Moduls übernimmt die Regelung und Steuerung des gesamten Wärmeversorgungssystems in einem Wohngebäude auf Basis von Temperaturmessungen an zentralen Stellen des Wärmeversorgungssystems. Der Umfang der Messungen hängt von der Konfiguration des Heizungssystems ab. **Abbildung 9** zeigt die hydraulische und regelungstechnische Einbindung des KWK-Moduls, die in ähnlicher Form am Prüfstand umgesetzt ist.

Aus **Abbildung 9** gehen die Positionen der Temperaturmessstellen und der Aktoren zur Heizungsregelung hervor. Die Regelungstechnik verarbeitet die Temperaturmesswerte und steuert den Spitzenlastkessel, die Pumpen und die Mischer mit verschiedenen (proportionalen) Ausgangssignalen, um die Temperaturen des Heizungssystems in den voreingestellten Toleranzgrenzen zu halten. Die herstellereigenen Temperaturmessstellen für den wärmegeführten Betrieb sind die Außentemperatur T_{AF} , die Raumtemperatur T_{RF} , die Pufferspeichertemperaturen $T_{VF,gesamt}$, $T_{SP2,mitte}$ und $T_{SP3,unten}$, die Warmwasserspeichertemperatur $T_{SP1,WW}$ und die Heizkreisvorlauftemperatur T_{VF1} (und T_{VF2} bei einem zweiten Heizkreis).

Die Pufferspeichertemperaturen sind die maßgebenden Größen für den wärmegeführten Betrieb. Die Positionen der Speichertemperaturfühler der Standardregelung sind in **Abbildung 9** als blaue Markierungen am Pufferspeicher zu sehen. Die Regelung vergleicht die Messwerte mit den voreingestellten Solltemperaturen und passt gegebenenfalls die thermische Leistung des ecoPOWER Mini-KWK-Moduls an. Die Regelungsparametereinstellung

für den wärmegeführten Betrieb erfolgt im sogenannten Produktionsprogramm. Das Produktionsprogramm hat vier Stufen, mithilfe derer eine Einsatzgewichtung der Tageszeiten für das KWK-Modul eingestellt werden kann. D. h. das KWK-Modul kann zeitlich gesperrt, oder mit einer gewissen Gewichtung (bis zum erzwungenen Start) freigegeben werden.

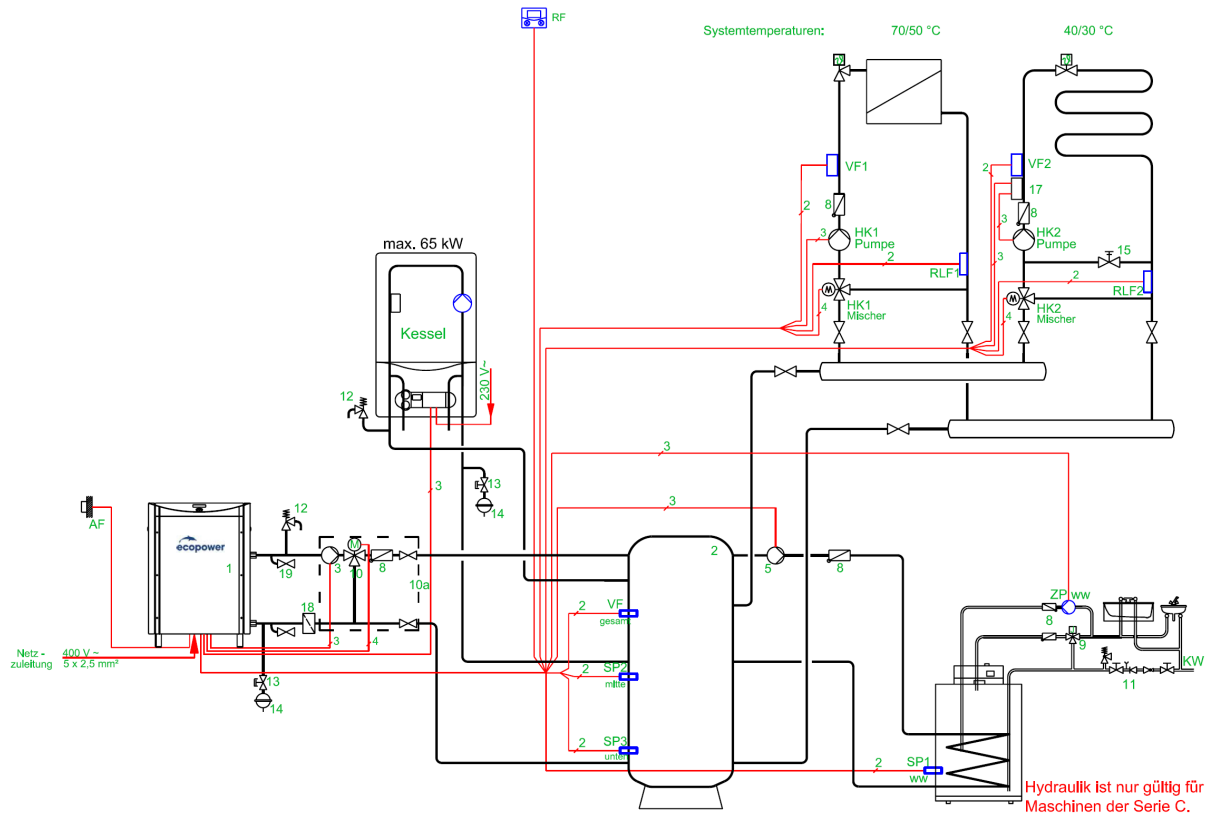


Abbildung 9: Schaltschema der MSR-Technik des ecoPOWER Mini-KWK-Moduls [46]

Neben den Pufferspeichertemperaturen werden die übrigen Messwerte ebenfalls durch die Regelung bewertet. Die Bewertungen erfolgen im Heizprogramm und im Warmwasserprogramm. Das Heizprogramm kann in drei Stufen die Heizkreisvorlauftemperatur regulieren und das Warmwasserprogramm legt das zulässige Temperaturband des Warmwasserspeichers fest. [46]

3.2 Thermische Leistungen im wärmegeführten Betrieb

Die Analyse der Standardregelung des ecoPOWER Mini-KWK-Moduls mit Pufferspeicher 1 im wärmegeführten Betrieb basiert auf den Lastgängen des *Übergangstag – Heiter*. Das Produktionsprogramm ist zwischen 06:00 Uhr und 22:00 Uhr auf „Mittlere Produktion“ (Tagbetrieb) und in den Nachtstunden auf „Niedrige Produktion“ (Nachtbetrieb) eingestellt. Das Heizprogramm wechselt im selben Rhythmus zwischen Tag- und Nachtbetrieb. Die Warm-

wasserspeicherladung startet bei einer Warmwassertemperatur von $T_{Sp1,WW} = 58^{\circ}\text{C}$ und stoppt sobald $T_{Sp1,WW} = 60^{\circ}\text{C}$ ist.

In **Abbildung 10** sind der Heizwärmebedarf, die thermischen Leistungen der Wärmeerzeuger und -verbraucher, die Pufferspeichertemperaturen, die Warmwasserspeichertemperatur und die Heizkreisvorlauftemperatur am *Übergangstag – Heiter* dargestellt. Des Weiteren sind die Zeiten, des Produktions- und Heizprogramms, sowie die Warmwasserspeichersolltemperatur, grau, bzw. rot, hinterlegt. Das Regelungsverhalten wird anhand der thermischen Leistungen der Wärmeversorgung beschrieben. Die Leistungen ergeben sich aus den eingestellten Programmzeiten und Sollwerten. Abweichungen zu den Einstellungen führen zu Regelungseingriffen.

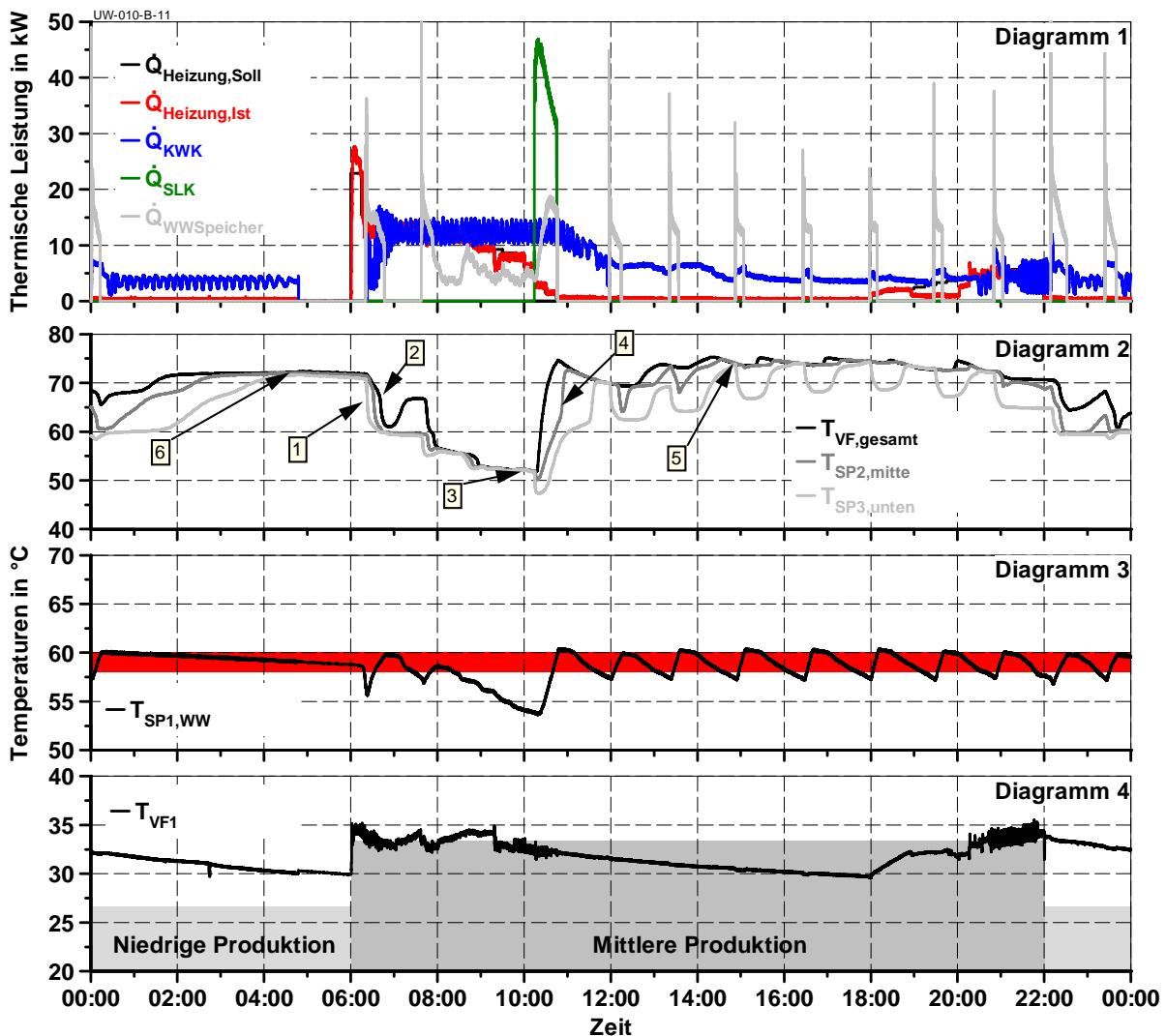


Abbildung 10: Thermische Leistungen im wärmegeführten Betrieb am *Übergangstag – Heiter*

Diagramm 1 zeigt die thermischen Leistungen des Wärmeversorgungssystems. Die Leistungsverläufe geben die Wirkungen der Regelungseingriffe der Mini-KWK-Modul-Regelung

wieder. Die Ursachen der Regelungseingriffe sind in Diagramm 2, Diagramm 3 und Diagramm 4 dargestellt. Diese Diagramme zeigen die Temperaturen, die im wärmegeführten Betrieb in den voreingestellten Toleranzgrenzen gehalten werden. Die wichtigsten Regelungseingriffe sind in Diagramm 2 in Abbildung 10 nummeriert worden, um den wärmegeführten Betrieb schrittweise zu beschreiben.

1. Das Heizprogramm startet um 06:00 Uhr. Das Gebäude wird aufgeheizt. Die thermische Morgenspitze wird durch den Pufferspeicher gedeckt. Durch die Entladung des Pufferspeichers wird $T_{SP3,unten} < 65^{\circ}\text{C}$. Das KWK-Modul wird freigegeben. Nahezu zeitgleich fällt $T_{SP1,WW}$ unter den Sollwert von 58°C . Die Warmwasserspeicherladung beginnt und der Pufferspeicher wird zusätzlich entladen.
2. Die Temperaturen im Pufferspeicher fallen und das KWK-Modul erhöht die thermische Leistung \dot{Q}_{KWK} bis zur Nennleistung. Die thermische Leistung des KWK-Moduls schwankt aufgrund der Rücklaufhochhaltung. Diese regelt die Temperatur des Rücklaufwassers des KWK-Moduls und mischt Vor- und Rücklaufwasser, um die Sollrücklauftemperatur einzuhalten. Dies führt zu Durchflussschwankungen am KWK-Modul, die die Leistungsschwankungen bewirken.
3. Um 7:35 Uhr sinkt $T_{SP1,WW}$ erneut unter 58°C und die Warmwasserspeicherladepumpe startet. Das KWK-Modul mit Pufferspeicher 1 kann den Bedarf nicht decken und die Warmwassertemperatur $T_{SP1,WW}$ unterschreitet um ca. 10:15 Uhr den Sollwert um 6 K. Der Spitzenlastkessel wird mit Nennleistung \dot{Q}_{SLK} freigegeben.
4. Die Freigabe des Spitzenlastkessels führt zu einer Beladung des Pufferspeichers. Das KWK-Modul berechnet die Motordrehzahl aus den steigenden Temperaturen $T_{SP2,mitte}$ und $T_{SP3,unten}$. Die Regelung reduziert die thermische Leistung des KWK-Moduls bei steigenden Pufferspeichertemperaturen und höheren Temperaturniveaus.
5. Regelmäßige Warmwasserspeicherladungen führen zu einer Erhöhung der thermischen Leistung des KWK-Moduls, um den zusätzlichen Bedarf zu decken. Beim Erreichen der Warmwasserspeichersolltemperatur regelt das KWK-Modul wieder anhand der Speichertemperaturen.
6. Ein Herunterfahren des KWK-Moduls wird durch die Modulation bis zur Minimallast solange verhindert, bis der Messwert am Fühler $T_{SP3,unten} > 70^{\circ}\text{C}$ (voreingestellter Ausschaltwert) beträgt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich mithilfe des wärmegeführten Betriebs des ecoPOWER Mini-KWK-Moduls mit Pufferspeicher 1 der Wärmebedarf des untersuchten Mehrfamilienhauses problemlos decken lässt. Mithilfe des Produktionsprogramms kann die Wärmeerzeugung an den Betriebszeiten und den (vermuteten) thermischen Zu-

ständen des Heizungssystems angelehnt werden. Darüber hinaus wird die thermische Leistung verringert, wenn die Pufferspeichertemperaturen steigen. Auf diese Weise wird die Anzahl der Starts reduziert und die Eigenstromnutzung erhöht.

3.3 Elektrische Leistungen im wärmegeführten Betrieb

Der momentane elektrische Bedarf des Versorgungsobjektes wird zur Steuerung des KWK-Moduls im wärmegeführten Betrieb nicht verwendet. **Abbildung 11** zeigt im Diagramm 1 den elektrischen Bedarf des Mehrfamilienhauses als schwarze Kurve und die Stromerzeugung des KWK-Moduls als rote Kurve über der Uhrzeit am *Übergangstag – Heiter*. Diagramm 2 zeigt die residuale Last

$$P_{Residual} = P_{Bedarf} - P_{KWK} \quad (11)$$

des Mehrfamilienhauses, d. h. das resultierende Lastprofil aus Strombedarf und Stromerzeugung. Die Analyse der Rückwirkungen des wärmegeführten Betriebs auf die residuale Last wird im Folgenden anhand der sechs Zeitpunkte aus **Abbildung 10**, ebenso dargestellt in **Diagramm 3** von **Abbildung 11**, beschrieben.

1. Am Beginn des Tagbetriebs wird die thermische Morgenspitze aus dem Pufferspeicher 1 gedeckt. Der Start des KWK-Moduls ist verzögert. Infolge des hohen thermischen Bedarfs moduliert das KWK-Modul um 06:30 Uhr auf Nennlast. Der elektrische Bedarf ist niedrig. Demzufolge ändert sich der Lastfluss des Versorgungsobjektes innerhalb von 10 Minuten von Strombezug zu Stromeinspeisung.
2. Das KWK-Modul läuft bei Nennlast und versucht die thermische Last, bestehend aus Heizwärme- und Warmwasserbedarf, zu decken. Die Nennleistung des KWK-Moduls ist in den Vormittagsstunden höher als der elektrische Bedarf. Die Differenzleistung wird eingespeist. Durch die Freigabe des Spitzenlastkessels um 10:15 Uhr wird der Pufferspeicher geladen und die Pufferspeichertemperaturen steigen.
3. Die elektrische Last am *Übergangstag – Heiter* steigt ab 10:45 Uhr, aber die Regelung des KWK-Moduls reduziert die elektrische Leistung. Das KWK-Modul moduliert, weil der Heizwärmebedarf sinkt und der Spitzenlastkessel den Pufferspeicher geladen hat. Der elektrische Lastfluss des untersuchten Mehrfamilienhauses ändert sich von Einspeisung zu Bezug. Die Stromerzeugung geht trotz steigenden elektrischen Bedarfs zurück.
4. Während der Nachmittagstunden beträgt die Temperatur am Fühler $T_{SP2,mitte}$ mehr als 65°C und das KWK-Modul läuft bei niedrigen Drehzahlen. Das Mehrfamilienhaus be-

zieht Strom aus dem Netz. Ein gezieltes Abfahren von elektrischen Lastspitzen findet nicht statt.

- Die regelmäßigen Warmwasserspeicherladungen führen zu einer zeitlich begrenzten, erhöhten Stromerzeugung. Die elektrische Last im Gebäude ist ausreichend, um die zusätzliche Strommenge im Gebäude zu nutzen. Eine gezielte Stromerzeugung in Abhängigkeit des Strombedarfs ist nicht möglich.

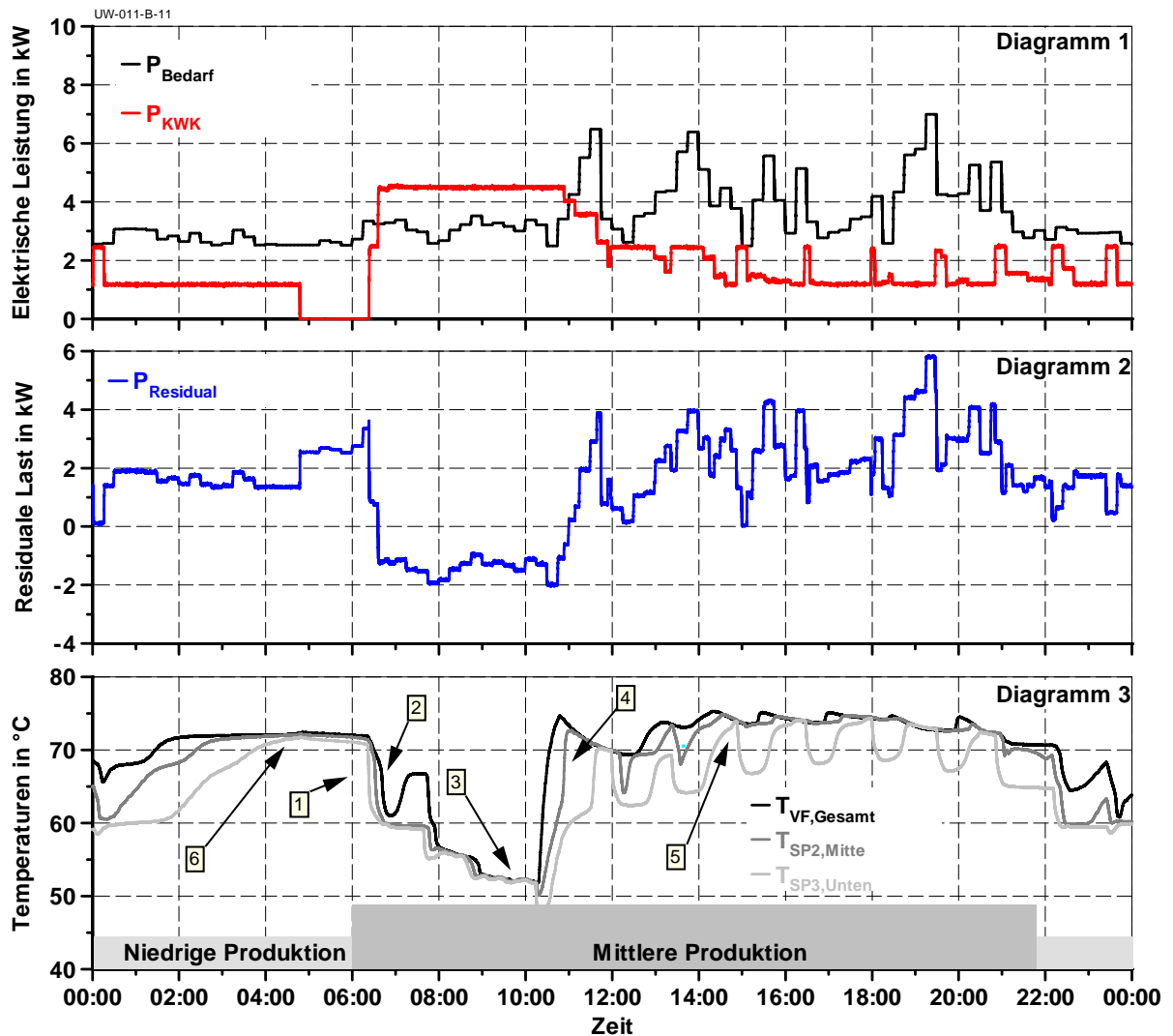


Abbildung 11: Elektrische Leistungen im wärmegeführten Betrieb am Übergangstag – Heiter

- Die Laufzeit des KWK-Moduls wird durch den Minimallastbetrieb bei einer Motordrehzahl von 1200 U/min verlängert. Um ca. 05:00 Uhr ist der Pufferspeicher vollständig geladen und das KWK-Modul schaltet ab, weil die Temperatur des Rücklaufwassers die nötige Motorkühlung nicht mehr gewährleistet.

Zusammenfassend verdeutlichen die Ergebnisse aus Abbildung 11, dass der wärmegeführten Betrieb das KWK-Modul unabhängig von der elektrischen Last des Gebäudes einsetzt.

Zu keinem Zeitpunkt werden elektrische Lastzustände gezielt ausgeglet. Die Standardregelung passt die thermische Leistung des KWK-Moduls weitestgehend stufenförmig gemäß den Temperaturen im Pufferspeicher und infolge von Warmwasserspeicherladungen an.

3.4 Pufferspeicherverhalten

Aus der Analyse des wärmegeführten Betriebs geht hervor, dass die Standardregelung die thermische Leistung des KWK-Moduls anhand der Speichertemperaturen variiert. Es wird lediglich Überschusswärme zwischengespeichert. Der Pufferspeicher ist ein passives Element im Heizungssystem, wodurch die Wärmeerzeugung eng an den Wärmebedarf gekoppelt ist. Ein Pufferspeicher hat jedoch weitergehende energetische Einsatzmöglichkeiten, die durch die multikriterielle Regelung ausgeschöpft werden können. Basis hierfür ist eine genaue Kenntnis über das Pufferspeicherverhalten. Hierzu ist in **Abbildung 12** der Farbverlauf der Pufferspeichertemperaturen zwischen der Uhrzeit auf der Abszisse und der Pufferspeicherhöhe auf der Ordinate aufgetragen. Wiederum handelt es sich um Pufferspeicher 1 am *Übergangstag – Heiter*.

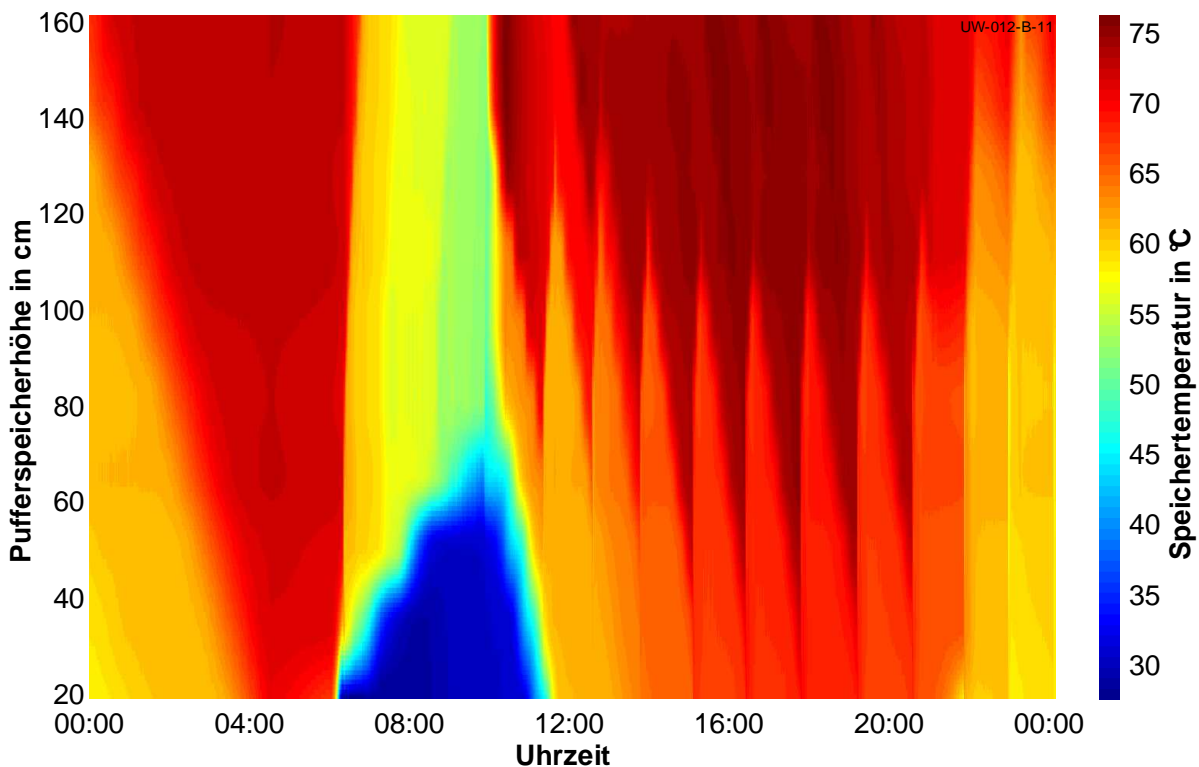


Abbildung 12: Temperaturen im Pufferspeicher 1 beim Übergangstag – Heiter [36]

Die verschiedenen thermischen Zustände des Heizungssystems sind anhand der unterschiedlichen Farbverläufe deutlich zu erkennen. Bis ca. 05:00 Uhr wird der Pufferspeicher mit kleiner thermischer Leistung geladen, wodurch kälteres Speicherwasser verdrängt wird.

Ab 06:00 Uhr wird der Pufferspeicher durch den morgendlichen Heizwärme- und Warmwasserbedarf entladen. Das warme Speicherwasser wird durch kaltes Rücklaufwasser ausgetauscht und der Farbverlauf des Speichers in Abbildung 12 wird bläulich. Nachdem die Freigabe des Spitzenlastkessels um 10:15 Uhr erfolgt ist, steigen die Temperaturen im Speicher stark an. Das Vorlaufwasser des Spitzenlastkessels verdrängt das kalte Rücklaufwasser aus dem Speicher. In den Nachmittagstunden sind regelmäßige Pufferspeicherentladungen durch hellrote Spitzen zu erkennen, die von den Warmwasserspeicherladungen hervorgerufen werden. Das Pufferspeicherverhalten in Abbildung 12 zeigt deutlich, dass der Zustand des Wärmeversorgungssystems an den Speichertemperaturen und den Temperaturänderungen abgelesen werden kann. Die verschiedenen Systemzustände hinterlassen charakteristische Merkmale im Pufferspeichertemperaturverlauf, die mithilfe der temperaturbasierten Speicherzustandsbestimmung detektiert werden können. Die Umsetzung der Speicherzustandsbestimmung wird detailliert in **Kapitel 4** erläutert.

3.5 Optimierungspotenziale

Heizungsunterstützende KWK-Anlagen mit Regelungen auf Basis von Solltemperaturen und Hysteresen decken den Heizwärmebedarf und erfüllen alle Komfortansprüche der Gebäudenutzer. Diese Regelungen sind aber im Grunde genommen diskret. Die starren Temperatursollwerte detektieren Zustandsänderungen im Heizungssystem und im Pufferspeicher ausschließlich sprunghaft. Durch eine Integration der Temperaturabweichung werden die Übergänge gleitender, aber der thermische Bedarf des Versorgungsobjektes, die erzeugte thermische Leistung und die energetischen Zustände im Pufferspeicher sind der Regelung nicht bekannt. Die Standardregelungen kennen nur die Heizungssystemzustände „Wärmebedarf vorhanden“ und „Wärmebedarf nicht vorhanden“ und die Speicherzustände „Geladen“ und „Nicht geladen“ aus. Die Wärmeerzeugung kann nicht bedarfsgerecht erfolgen.

Mithilfe einer Transformation der Regelungsparameter von Temperaturschalt- und -sollwerten hin zu Energiemengen und thermischen Leistungen, könnten die Wärmeerzeuger bedarfsgerechter eingesetzt werden. Ist z. B. die thermische Last und die gespeicherte Energiemenge bekannt, ist der Regelung auch die Dringlichkeit, die Zeit oder Dauer einer Anpassung der Wärmeerzeugung, bekannt. Die entwickelte Regelung mit Speicherzustandsbestimmung setzt hier an. Basierend auf der momentanen Leistungsbilanz im Heizungssystem und dem Pufferspeicherzustand (Speicherinhalt und Speicherkapazität) kann das KWK-Modul multikriteriell eingesetzt werden. Die Wärmeerzeugung wird zeitlich vom Wärmebedarf entkoppelt, um den Produktionsdeckungsgrad zu maximieren.

4 Temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung

Die Basis für eine multikriterielle Regelung von KWK-Anlagen ist die exakte Kenntnis der Regelgrößen. Diese sind der elektrische und der thermische Lastgang des untersuchten Mehrfamilienhauses. Die elektrische Last wird bereits am Stromzähler des Gebäudes gemessen. Moderne Stromzähler haben Impulsausgänge, die eine leistungsabhängige Taktfrequenz ausgeben, welche der multikriteriellen Regelung als Eingangssignal dienen kann. Die Bestimmung der thermischen Last des Heizungssystems wird durch die in der vorliegenden Arbeit entwickelte temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung realisiert, wodurch die benötigten Eingangssignale für die entwickelte Regelung komplettiert werden.

Die thermischen Leistungen und Energien der Wärmeversorgung könnten gleichermaßen über zusätzliche Messtechnik, wie z. B. über Volumenstrom- oder Wärmemengenzähler, gemessen werden, jedoch sind hierzu hydraulische Installationsarbeiten nötig, die eine einfache Nachrüstbarkeit der Speicherzustandsbestimmung ausschließen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein, auf Temperaturmessungen basiertes Konzept verfolgt, das unter der Prämisse der Nachrüstbarkeit entwickelt wurde. In den folgenden Unterkapiteln wird die einfache, leicht nachrüstbare und robuste Berechnungs- und Messmethodik für die Speicherzustandsbestimmung exemplarisch anhand von Pufferspeicher 1 beschrieben.

4.1 Messaufbau zur Speicherzustandsbestimmung

Die Basis für die Speicherzustandsbestimmung bildet die temperaturabhängige Dichte von Wasser. Unter Vernachlässigung der Dichteanomalie von Wasser (Einschränkung auf Wassertemperaturen $T_{PS} > 4^{\circ}\text{C}$) nimmt die Dichte von Wasser mit steigender Temperatur ab. Diese physikalische Eigenschaft führt zu einer natürlichen Schichtung des Heizungswassers im Pufferspeicher. Warmes Wasser strömt nach oben und kälteres Wasser verbleibt unten im Pufferspeicher. [44]

Folglich wird der energetische Zustand eines Pufferspeichers durch den Temperaturverlauf und die nutzbare Temperaturdifferenz des gespeicherten Wassers bestimmt. Der Aufbau für eine zeitkontinuierliche Messung der Speichertemperaturen ist exemplarisch für Pufferspeicher 1 in **Abbildung 13** gezeigt. Zehn Messstellen mit Pt100-Widerstandsthermometern, die äquidistant verteilt über der Pufferspeicherhöhe angebracht sind, messen die Speichertem-

peraturen T_{PS_1} bis $T_{PS_{10}}$. Der resultierende Temperaturverlauf bildet die Basis für die Speicherzustandsbestimmung.

Die Installation der Pt100-Widerstandsthermometer kann als Anlegefühler, in Tauchhülsen, oder direkt im Heizungswasser erfolgen. Die Temperaturfühler sollten unter einer ausreichenden Speicherwärmedämmung installiert werden, damit das Messergebnis nicht durch die Umgebung verfälscht wird. Unter der Prämisse der einfachen Nachrüstbarkeit sind Anlegefühler zu bevorzugen. Die Verwendung von Tauchhülsen würde den Installationsaufwand durch Arbeiten an der Speicherwand vervielfältigen. Die Position der Temperaturmessstellen in horizontaler Richtung ist weitestgehend beliebig. Seiten mit hydraulischen Anschlüssen von Wärmeerzeugern oder -verbrauchern sind aufgrund von Turbulenzen bei Ein- oder Ausströmvorgängen ungeeignet. Die Strömungsvorgänge können lokale Mischtemperaturen hervorrufen, die die Genauigkeit der Speicherzustandsbestimmung beeinflussen.

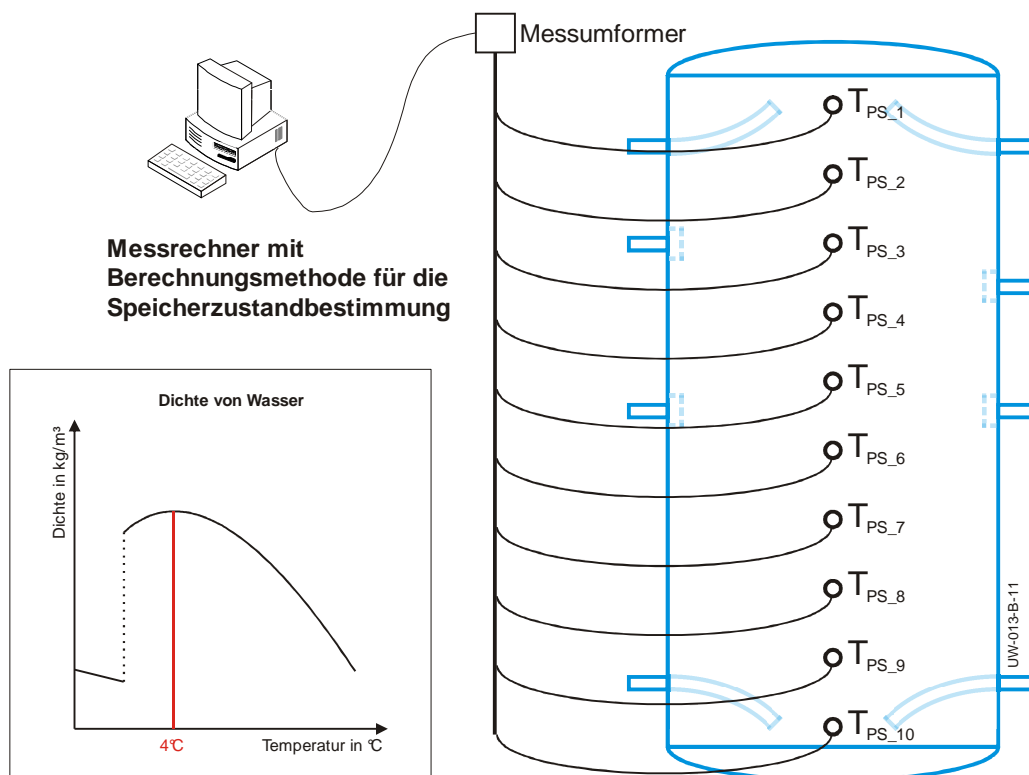


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Speicherzustandsbestimmung

Die Anzahl und die Position der Temperaturfühler in vertikaler Richtung bestimmen die Genauigkeit des berechneten Temperaturverlaufs. Eine geeignete Auswahl von Messstellenanzahl und -position ist gegeben, wenn Anzahl und Position der Stützstellen eine Messung des Speichertemperaturverlaufs mit hoher Genauigkeit erlauben. In dieser Arbeit werden die Experimente zur Speicherzustandsbestimmung und zur multikriteriellen Regelung anhand

Beispielhaft sind in Abbildung 14 zehn lokale Speichertemperaturen als schwarze Punkte im Koordinatensystem eingetragen und graphisch verbunden worden. Der entstehende Graph beschreibt den Speichertemperaturverlauf und damit den aktuellen Speicherzustand. Der Verlauf bildet sich durch die Schichtungseigenschaften des Pufferspeichers heraus und ist der funktionale Zusammenhang für die temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung. Die wesentlichen Speicherparameter für die Zustandsbestimmung sind neben dem Speichertemperaturverlauf die obere Speichertemperatur $T_{PS,oben}$ und die untere Speichertemperatur $T_{PS,unten}$, die eine nutzbare Temperaturdifferenz definieren. Die sogenannte Mischzone wird über den Temperaturgradienten $\Delta T_{PS}/\Delta h_{PS}$ bestimmt und durch Mischzonenmitte $h_{PS,Misch}$ und die Mischzonendicke $\Delta h_{PS,Misch}$ beschrieben. Der funktionale Zusammenhang und die Speicherparameter zur Speicherzustandsbestimmung werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

4.3 Bestimmung des Speichertemperaturverlaufs

Die Speicherzustandsbestimmung basiert auf einer verteilten Temperaturmessung, da sich Temperaturänderungen proportional zu Speicherzustandsänderungen verhalten. Mithilfe einer robusten Methodik zur kontinuierlichen Bestimmung des Speichertemperaturverlaufs kann der Speicherzustand und jede Zustandsänderung mit hoher Genauigkeit und in hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden. Die Grundlage für die Zustandsbestimmung des Pufferspeichers bildet dabei der Speichertemperaturverlauf, der in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben wird.

4.3.1 Adaption als Sigmoidkurve

Die exemplarische Darstellung des Speichertemperaturverlaufs in Abbildung 14 ist der Realität nachempfunden und zeigt, dass die Temperaturkurve im T_{PS} - h_{PS} -Diagramm eine S-Form aufweist. Diese charakteristische Form wird durch experimentelle Ergebnisse der Speichertemperaturverläufe eines Ladevorgangs von Pufferspeicher 1 zwischen 00:00 Uhr und 03:00 Uhr des *Übergangstag – Heiter* im linken Teil von **Abbildung 15** verdeutlicht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind lediglich die zehn Speichertemperaturen zu den vollen Stunden dargestellt und graphisch verbunden worden. Die Kurvenschar verdeutlicht die S-Form des Temperaturverlaufs und zeigt die Robustheit der Kurvenform über eine Ladedauer von drei Stunden. Diese Ergebnisse resultieren in dem Vorgehen, die Messwerte mit sogenannten Sigmoidfunktionen zu adaptieren.

In der Mathematik sind verschiedene Funktionen bekannt, die S-förmige Kurven beschreiben. Unter anderem sind dies logistische Funktionen sowie einfache algebraische Funktio-

nen, die im Allgemeinen differenzierbar sind und einen Wendepunkt haben. Im Rahmen dieser Arbeit wird mithilfe der Gleichung 12 ein stetig differenzierbarer Speichertemperaturverlauf aus den Messwerten approximiert. Der rechte Teil in Abbildung 15 zeigt den adaptierten Temperaturverlauf als Sigmoidkurve.

$$T_{PS}(h_{PS}) = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{h_{PS} - h_0} \right)^C} + D \quad (12)$$

Die Approximation der Sigmoidkurve zu den gemessenen Temperaturwerten nach Gleichung 14 erfolgt durch die Anpassung der Parameter A , B , C , D und h_0 . Hierzu kann ein beliebiger Anpassungsalgorithmus verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das in LabVIEW verfügbare Levenberg-Marquardt-Verfahren eingesetzt [33]. Hierbei werden die Parameter nach dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate angepasst. Dieses Verfahren hat sich am KWK-Prüfstand als schnell, robust und zweckmäßig erwiesen. [38,54]

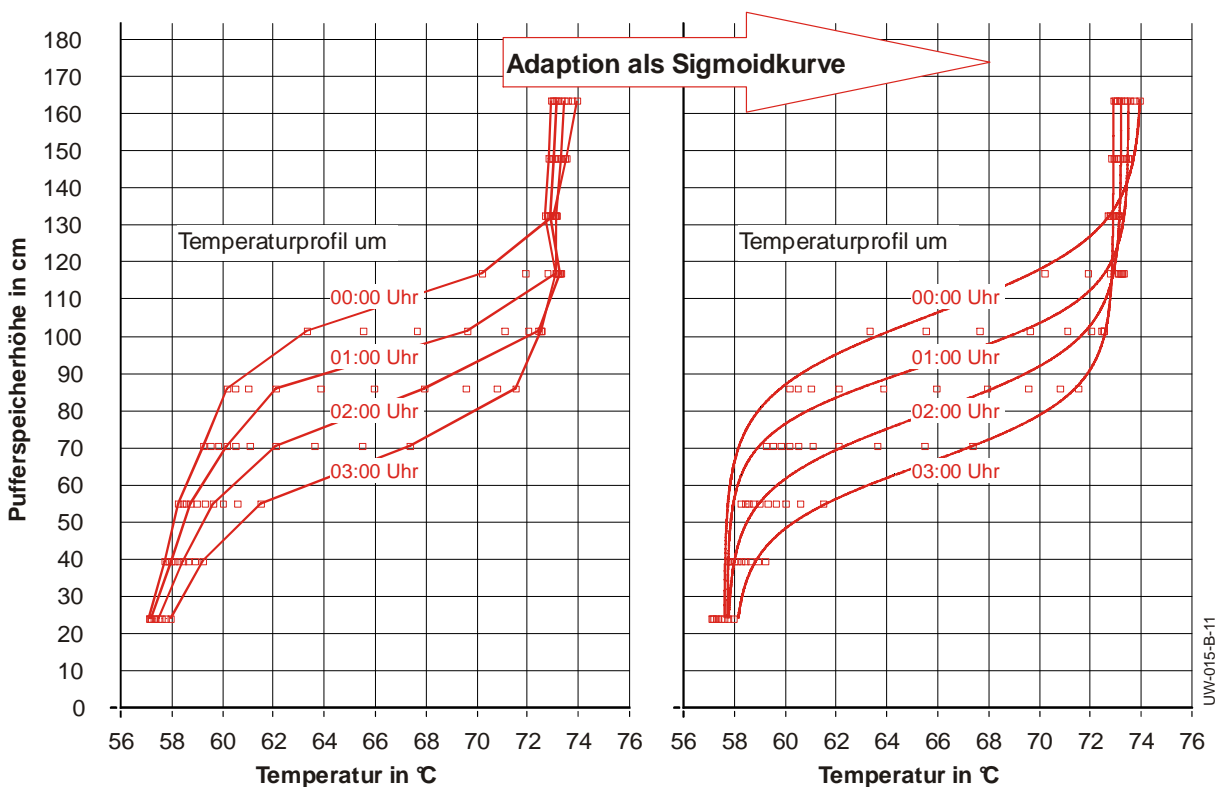


Abbildung 15: Adaption des gemessenen Temperaturprofils als Sigmoidkurve

4.3.2 Parametrierung der Sigmoidkurve

Mit der Anzahl der Parameter steigen der Rechenaufwand zur Approximation der Gleichung und die Fehleranfälligkeit des Approximationsverfahrens. Um eine kontinuierliche, sekundliche Approximation zu gewährleisten, wurde die Sigmoidfunktion nach Gleichung 12 für den gegebenen Anwendungsfall vereinfacht und vorparametriert. Der Parameter D entspricht einer Nullpunktverschiebung der Sigmoidkurve und ist somit definiert durch die minimale Speichertemperatur $D = T_{PS,unten}$. Der Parameter A bestimmt die Breite der Kurve zwischen dem maximalen und dem minimalen Temperaturgrenzwert und ist somit definiert durch $A = T_{PS,oben} - T_{PS,unten}$. Die Gleichung 12 ist in den Bereichen $h_{PS} - h_0 < 0$ und $h_{PS} - h_0 > 0$ jeweils abschnittsweise sigmoidförmig. D. h. der Parameter h_0 sollte konstant sein und ein Vielfaches der Pufferspeicherhöhe betragen. Auf diese Weise wird die Sigmoidkurve auf einen Abschnitt begrenzt und ist stetig differenzierbar. h_0 wurde empirisch ermittelt und auf $h_0 = -400 \text{ cm}$ festgelegt. Die Parameter B und C bestimmen den Verlauf der Sigmoidkurve im Bereich zwischen den Temperaturgrenzen. Sie werden durch das Approximationsverfahren sekundlich neu bestimmt. Um die Approximation zu beschleunigen sind für beide Parameter Startwerte empirisch ermittelt worden. Diese betragen $B = 500 \text{ cm}$ und $C = 50$. [38]

4.4 Wärmebilanzbestimmung

Aufbauend auf dem stetigen Speichertemperaturverlauf kann die sogenannte Wärmebilanz des Pufferspeichers berechnet werden. Die Wärmebilanz des Pufferspeichers ist eine der fehlenden Regelgrößen, um das Mini-KWK-Modul multikriteriell anhand von thermischen und elektrischen Leistungen und Energien zu regeln. Sie ist definiert als Leistungsbilanz der Wärmeversorgung und berechnet sich nach Gleichung 13 zu

$$\dot{Q}_{PS} = \dot{Q}_{KWK} + \dot{Q}_{SLK} - \dot{Q}_{Heizung} - \dot{Q}_{WWSpeicher} \quad (13)$$

Hierin ist \dot{Q}_{PS} die Wärmebilanz des Pufferspeichers, respektive das Ergebnis der Summe der thermischen Leistungen des Wärmeversorgungssystems. Die Leistungen der Wärmeerzeuger KWK-Modul \dot{Q}_{KWK} und Spitzenlastkessel \dot{Q}_{SLK} werden mit den Leistungen der Wärmeverbraucher Raumheizung $\dot{Q}_{Heizung}$ und Brauchwarmwasseraufbereitung $\dot{Q}_{WWSpeicher}$ zu einer Leistungsbilanz verrechnet. Die Wärmebilanz definiert eine thermische Über- oder Unterversorgung sowie eine ausgeglichene Wärmeversorgung des untersuchten Mehrfamilienhauses. Eine Pufferspeicherladung ergibt eine Wärmebilanz $\dot{Q}_{PS} > 0$, die einer thermischen Überversorgung entspricht, wohingegen eine Speicherentladung eine Wärmebilanz $\dot{Q}_{PS} < 0$ zur Folge hat und eine Unterversorgung des Gebäudes beschreibt. Die Wärmebilanz ist ausgeglichen, wenn Wärmeerzeugung und -bedarf gleich sind. Der Pufferspeicher wird in diesem Fall weder ge- noch entladen.

Die Wärmebilanz kann mit zwei Berechnungsmethoden aus dem Speichertemperaturverlauf berechnet werden, die sich jedoch in der Genauigkeit unterscheiden. Die Berechnungsmethoden werden in den folgenden Unterkapiteln separat beschrieben und anschließend in **Kapitel 4.8** anhand der Bestimmungsgenauigkeit bewertet. Die Entwicklung der multikriteriellen Regelung basiert auf der Methode mit der höheren Genauigkeit.

4.4.1 Wärmebilanz über den Wendepunkt des Temperaturverlaufs

Eine Veränderung des Speichertemperaturverlaufs entspricht einer Veränderung des Speicherzustands. Zustandsänderungen werden durch Lade- und Entladevorgänge von Wärmeerzeugern bzw. -verbrauchern, oder Wärmeverlusten an die Umgebung, die eine natürliche Konvektion im Pufferspeicher hervorrufen [23], ausgelöst. Die Änderungsgeschwindigkeiten im Pufferspeicher sind proportional zur thermischen Leistung, mit der der Pufferspeicher gelad oder entladen wird. Diese Änderungsgeschwindigkeit kann anhand der Höhenverschiebung des Wendepunkts der Speichertemperaturkurve (Mischzonenmittelpunkt) gemessen werden. Die schematische Darstellung in **Abbildung 16** zeigt die Methodik der Wärmebilanzbestimmung über den Wendepunkt exemplarisch für Pufferspeicher 1.

Wärmebilanzbestimmung über den Wendepunkt

- Festlegung von $\Delta t = t_{n+1} - t_n$
- Bestimmung der Höhe der Wendepunkte
- Berechnung des Nettovolumenstroms
- Berechnung der Wärmebilanz

T_{PS} bei t_n ... Speichertemperaturverlauf zum Zeitpunkt t_n

T_{PS} bei t_{n+1} ... Speichertemperaturverlauf zum Zeitpunkt t_{n+1}

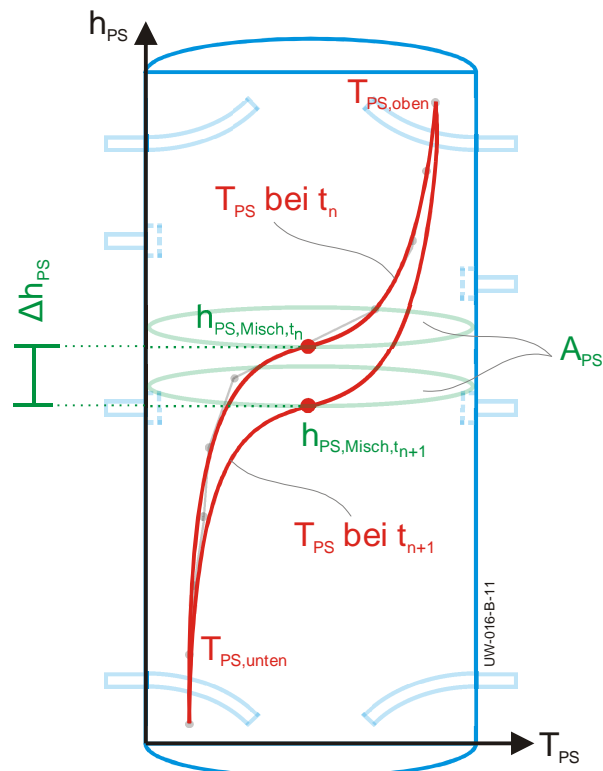


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Wärmebilanzbestimmung über den Wendepunkt

Die Wärmebilanzbestimmung erfolgt durch die Adaption zweier Speichertemperaturverläufe zu den Zeitpunkten t_n und t_{n+1} als Sigmoidkurve. Die zweimalige Differenzierung der zwei

Temperaturkurven nach der Pufferspeicherhöhe ergibt die Position der Wendepunkte bzw. der Mischzonenmittelpunkte $h_{PS,Misch,t_n}$ und $h_{PS,Misch,t_{n+1}}$. Das Vorzeichen der Höhendifferenz $\Delta h_{PS} = h_{PS,Misch,t_n} - h_{PS,Misch,t_{n+1}}$ zeigt die Bewegungsrichtung der Wendepunkte bzw. der Mischzone an. Unter Berücksichtigung der Speicherquerschnittsfläche A_{PS} kann das verdrängte Wasservolumen berechnet werden. Wird die Wasserverdrängung anschließend auf den Zeitabstand Δt zwischen t_n und t_{n+1} bezogen, entspricht dies dem mittleren Nettovolumenstrom \dot{V}_{PS} des Pufferspeichers (Differenz der Volumenströme von Wärmeerzeugern und -verbrauchern), der mit Gleichung 14 berechnet werden kann.

$$\dot{V}_{PS} = A_{PS} \cdot \frac{\Delta h_{PS}}{\Delta t} \quad (14)$$

Dieser Volumenstrom ist nach Gleichung 1 proportional zu einer thermischen Leistung, die in diesem Fall der Wärmebilanz entspricht. Die Wärmebilanz kann daher mit Gleichung 15 direkt aus den Wendepunkten, der Speicherquerschnittsfläche, der nutzbaren Temperaturdifferenz und dem zugrunde gelegtem Zeitabstand berechnet werden.

$$\dot{Q}_{PS} = \dot{V}_{PS} \cdot \rho \cdot c_{\rho} \cdot (T_{PS,oben} - T_{PS,unten}) \quad \text{mit } \dot{V}_{PS} = A_{PS} \cdot \frac{\Delta h_{PS}}{\Delta t} \quad (15)$$

In den Gleichungen 14 und 15 ist $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ ein Zeitabstand, der es erlaubt Speicherzustandsänderungen zeitlich und absolut eindeutig zu detektieren. Im Laufe der experimentellen Untersuchungen hat sich ein Zeitabstand von $\Delta t = 120 \text{ s}$ bis $\Delta t = 240 \text{ s}$ als geeignet erwiesen. [38]

4.4.2 Wärmebilanz über den bezogenen Speicherenergieinhalt

Speicherzustandsänderungen sind neben Temperaturänderungen auch Energiemengenänderungen. Diese Eigenschaft wird zur Wärmebilanzbestimmung über den bezogenen Speicherenergieinhalt genutzt. Diese zweite Berechnungsmethode wird durch die schematische Darstellung in **Abbildung 17** verdeutlicht.

Entsprechend der Berechnungsmethode über den Wendepunkt basiert die Wärmebilanzbestimmung über den bezogenen Speicherinhalt ebenfalls auf der Adaption zweier Speichertemperaturverläufe zu den Zeitpunkten t_n und t_{n+1} . Die daraus resultierenden stetigen Kurven werden jedoch über der Pufferspeicherhöhe integriert anstatt differenziert. Gleichung 16 beschreibt den mathematischen Zusammenhang.

$$\dot{Q}_{PS,Inhalt,bezogen} = A_{PS} \cdot \rho \cdot c_{\rho} \int_0^{h_{PS}} (T_{PS} - 0^{\circ}\text{C}) dh_{PS} \quad (16)$$

Hierin wird die Temperaturdifferenz zwischen der Speichertemperatur T_{PS} und einem vorab festgelegten Minimalwert (zur Vereinfachung der Integration ist hier 0°C gewählt) über der

Höhe integriert und mit den Werten der Pufferspeicherquerschnittsfläche A_{PS} , der Wärmekapazität von Wasser c_p und der Dichte von Wasser ρ multipliziert.

Wärmebilanzbestimmung über den bezogenen Speicherenergieinhalt

- Festlegung von $\Delta t = t_{n+1} - t_n$
- Bestimmung der absoluten Speicherenergieinhalte
- Bestimmung der Energiedifferenz
- Berechnung der Wärmebilanz

T_{PS} bei t_n ... Speichertemperaturverlauf zum Zeitpunkt t_n

T_{PS} bei t_{n+1} ... Speichertemperaturverlauf zum Zeitpunkt t_{n+1}

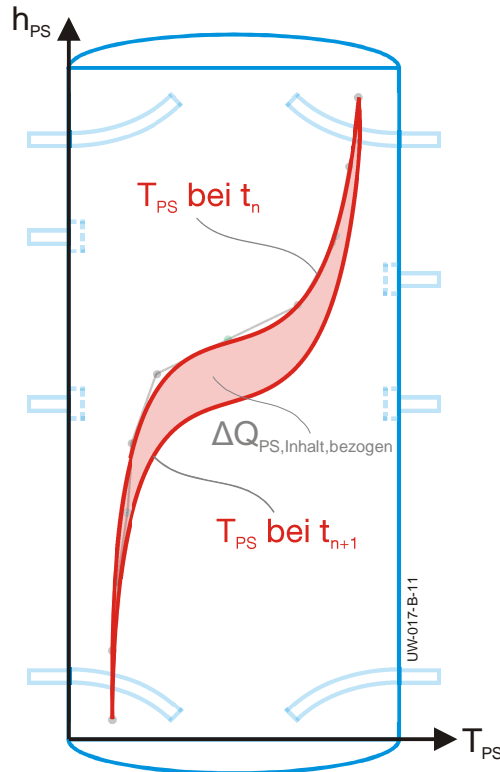


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Wärmebilanzbestimmung über den bezogenen Speicherinhalt

Im Falle einer Regelungsaufgabe, die mögliche Einbußen bei der Genauigkeit des bezogenen Speicherenergieinhalts zulässt, kann der bezogene Speicherinhalt auch höhensegmentweise aufsummiert werden. Gleichung 17 zeigt den entsprechenden mathematischen Zusammenhang, der die Berechnung der Wärmebilanz beschleunigen kann.

$$Q_{PS, \text{Inhalt, bezogen}} = A_{PS} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \sum_0^{h_{PS}} (T_{PS} - 0^\circ\text{C}) \Delta h_{PS} \quad (17)$$

Die Genauigkeit dieser Gleichung ist abhängig von der Anzahl der Höhensegmente. Je nach geforderter Genauigkeit ist bei der Verwendung der Summation auf eine ausreichend feine Unterteilung der Pufferspeicherhöhe zu achten.

Die resultierende Wärmebilanz ergibt sich aus der Division der Differenz der Speicherenergieinhalte zu den Zeitpunkten t_n und t_{n+1} mit dem Zeitabstand Δt .

$$\dot{Q}_{PS} = \frac{Q_{PS, \text{Inhalt, absolut, } t_n} - Q_{PS, \text{Inhalt, absolut, } t_{n+1}}}{\Delta t} \quad (18)$$

Diese Energiemengenänderung nach Gleichung 18 ist in Abbildung 17 als rote Fläche markiert und entspricht, je nach Veränderungsrichtung, einer geladenen oder einer entladenen Energiemenge. [38]

4.5 Speicherenergiebestimmung

Die Kenntnis der Speicherenergien ist zentraler Bestandteil der Speicherzustandsbestimmung. Die Speicherenergien der Pufferspeicher sind der Freiheitsgrad in der Entkopplung von Wärmeerzeugung und -bedarf und somit zentrale Parameter der multikriteriellen Regelung. Die Pufferspeicherenergien sind:

1. Nutzbarer Speicherinhalt zur Raumheizung
2. Nutzbarer Speicherinhalt zur Warmwasserversorgung
3. Nutzbare Speicherkapazität

Ausgehend vom Speichertemperaturverlauf bestimmen maßgebende Bezugstemperaturen die Speicherenergien. Die Bezugstemperaturen begrenzen die nutzbaren Temperaturdifferenzen im Pufferspeicher, die nach Gleichung 1 proportional zu thermischen Energien sind. **Abbildung 18** zeigt die Speicherenergien mit den Bezugstemperaturen Heizkreisvorlauftemperatur $T_{HK,VL}$, Warmwasserspeicherladetemperatur $T_{WWS,VL}$ und Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger $T_{WE,VL}$.

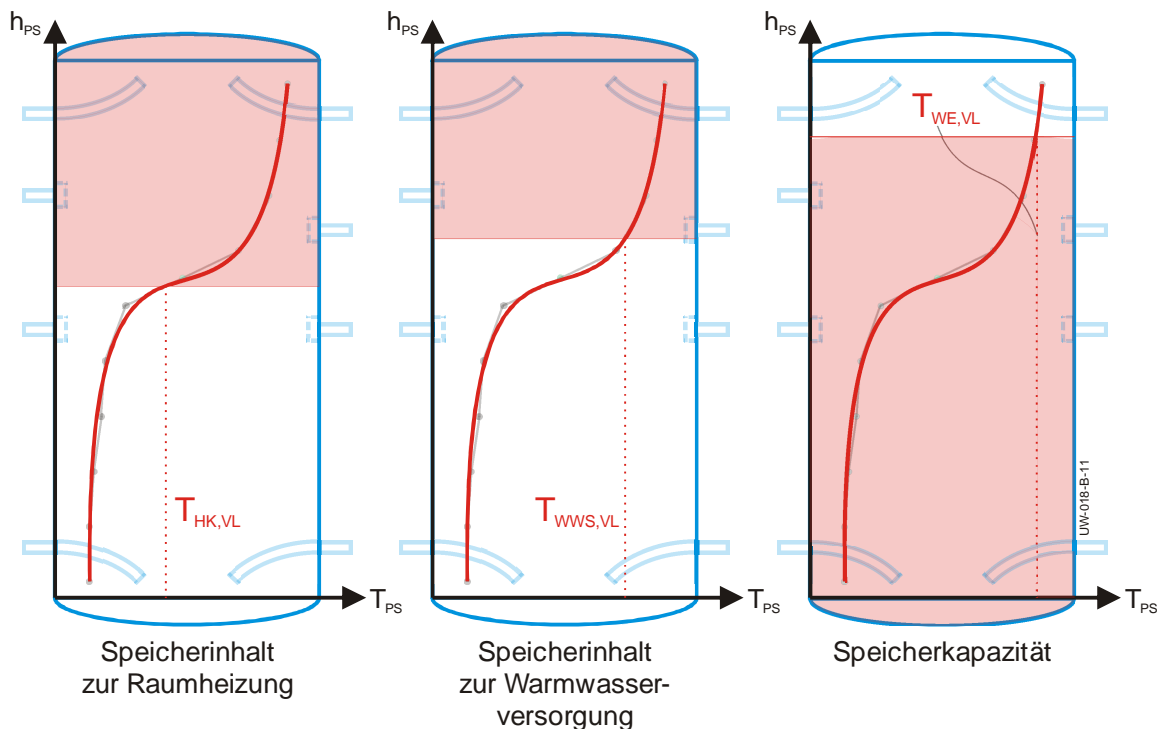


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Speicherenergien

Die schematische Darstellung in Abbildung 18 zeigt die nutzbaren Temperaturdifferenzen und die Speicherenergien als rote Flächen und beschreibt einen Pufferspeicher mit hoher Speicherkapazität. Dieser exemplarische Speicherzustand bedeutet, dass der Pufferspeicher eine erhebliche Wassermenge mit der Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger aufnehmen kann, aber nur geringe Wassermengen für die Deckung des Heizwärme- und des Brauchwarmwasserbedarfs vorhält. Die Berechnung der drei Speicherenergien wird in den folgenden Unterkapiteln erläutert. [38]

4.5.1 Speicherinhalt zur Raumheizung

Die Heizkreisvorlauftemperatur $T_{HK,VL}$ ist die Bezugstemperatur für die Bestimmung des Speicherinhalts zur Raumheizung, die aber je nach Heizungssystem und verwendeter Heizungsregelung von verschiedenen Parametern abhängig ist. Heizungsregelungen mit konstanter Vorlauftemperatur haben eine feste Bezugstemperatur, wohingegen außen-temperaturabhängige Heizungsregelungen die Vorlauftemperatur auf Basis der Heizkurve einstellen. Diese beschreibt einen herstellerabhängigen Zusammenhang zwischen Außen- und Heizkreisvorlauftemperatur, hat aber grundsätzlich eine positive Steigung. D. h. je kälter es außerhalb des Gebäudes ist, desto höher ist die Vorlauftemperatur des Heizungssystems und desto kleiner wird die nutzbare Speichertemperaturdifferenz. Des Weiteren haben Flächenheizungssysteme geringere Heizkreisvorlauftemperaturen als Radiatorheizungen und weisen damit einen höheren Speicherinhalt zur Raumheizung auf.

Die Berechnung des Speicherinhalts zur Raumheizung erfolgt durch die Integration der nutzbaren Speichertemperaturdifferenz nach der Pufferspeicherhöhe. Gleichung 19 zeigt den funktionalen Zusammenhang.

$$Q_{PS, \text{Inhalt}, HK} = A_{PS} \cdot \rho \cdot c_{\rho} \cdot \int_0^{h_{PS}} (T_{PS} - T_{HK, VL}) dh_{PS} \quad \text{für alle } T_{PS} \geq T_{HK, VL} \quad (19)$$

Unter Einbußen bei der Berechnungsgenauigkeit ist eine Summation nach Höhensegmenten für die Bestimmung des Speicherinhalts zur Raumheizung möglich.

4.5.2 Speicherinhalt zur Warmwasserversorgung

Die Brauchwarmwasserversorgung orientiert sich an den Komfortbedürfnissen der Bewohner sowie an hygienischen Bestimmungen wie dem Legionellen-Schutz. Das Arbeitsblatt W 551 des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs (DVGW) fordert zur Einhaltung der Wasserqualität, dass bei externen Warmwasserspeichern eine Austrittstemperatur von mindestens 60°C einzuhalten ist, wobei eine Unterschreitung im Minutenbereich zulässig ist [11]. Je größer die Übertemperatur $T_{WWS, VL}$ beim Aufheizvorgang ist, desto schneller verläuft die Ladung des Warmwasserspeichers. Unter diesen Randbedingungen ist der nutzbare Speicher-

inhalt zur Warmwasserversorgung tendenziell kleiner als zur Raumheizung. Gleichung 20 und der mittlere Speicher in Abbildung 18 machen diesen Zusammenhang deutlich.

$$Q_{PS, \text{Inhalt}, WWS} = A_{PS} \cdot \rho \cdot c_{\rho} \cdot \int_0^{h_{PS}} (T_{PS} - T_{WWS, VL}) dh_{PS} \quad \text{für alle } T_{PS} \geq T_{WWS, VL} \quad (20)$$

Wiederum kann der Speicherinhalt auch über eine Summation der Speichertemperaturdifferenzen bestimmt werden.

4.5.3 Speicherkapazität

Die Speicherkapazität wird durch die maximale Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger $T_{WE, VL}$ begrenzt. Die zugrundeliegende nutzbare Temperaturdifferenz entspricht in diesem Fall der Übertemperatur der Wärmeerzeuger. Die Berechnung der vorhandenen Speicherkapazität erfolgt nach Gleichung 21.

$$Q_{PS, \text{Kapazität}} = A_{PS} \cdot \rho \cdot c_{\rho} \cdot \int_0^{h_{PS}} (T_{WE, VL} - T_{PS}) dh_{PS} \quad \text{für alle } T_{WE, VL} \geq T_{PS} \quad (21)$$

Die tatsächliche Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger ist jedoch nicht konstant, sondern von der Rücklauftemperatur am Wärmeerzeuger und der thermischen Leistung zum gleichen Zeitpunkt abhängig. Bezüglich der Betriebszustandsabhängigkeit der Bezugstemperatur bietet es sich an, die Speicherkapazität durch einen festen Vorlauftemperaturwert zu berechnen. Eine Summation der Temperaturdifferenz zwischen Pufferspeichertemperatur und Wärmeerzeugervorlauftemperatur ist auch hier mit Einbußen in der Genauigkeit möglich.

4.6 Bestimmung der Regelungszeitfenster

Nachdem aus dem Speichertemperaturverlauf die Wärmebilanz und die Speicherenergien bestimmt werden können, ist es ebenfalls möglich sogenannte Regelungszeitfenster zu berechnen. Diese ergeben sich nach Gleichung 22, Gleichung 23 und Gleichung 24 aus der Division einer Speicherenergie mit dem Betrag der Wärmebilanz.

$$t_{PS, \text{Inhalt}, HK} = \frac{Q_{PS, \text{Inhalt}, HK}}{|\dot{Q}_{PS}|} \quad \text{für } \dot{Q}_{PS} < 0 \quad (22)$$

$$t_{PS, \text{Inhalt}, WWS} = \frac{Q_{PS, \text{Inhalt}, WWS}}{|\dot{Q}_{PS}|} \quad \text{für } \dot{Q}_{PS} < 0 \quad (23)$$

$$t_{PS, \text{Kapazität}} = \frac{Q_{PS, \text{Kapazität}}}{\dot{Q}_{PS}} \quad \text{für } \dot{Q}_{PS} > 0 \quad (24)$$

Die Regelungszeitfenster $t_{PS,Inhalt,HK}$, $t_{PS,Inhalt,WWS}$ und $t_{PS,Kapazität}$ entsprechen somit jeweils der Dauer eines quasistationären Betriebs bei einem spezifischen Zustand im Wärmeversorgungssystem. Beispielhaft sei $Q_{PS,Inhalt,HK} = 50 \text{ kWh}$ und $\dot{Q}_{PS} = -5 \text{ kW}$, dann beträgt das Regelungszeitfenster $t_{PS,Inhalt,HK} = 10 \text{ h}$. Nach Ablauf dieses Zeitfensters ist der Pufferspeicher entladen und auf die Vorlauftemperatur des Heizungssystems abgekühlt.

Die Regelungszeitfenster geben dem Freiheitsgrad des Pufferspeichers einen zeitlichen Wert. Sie beschreiben den Zeithorizont, indem die Heizungsregelung multikriteriell eingesetzt werden kann. Nachteilig ist, dass die Regelungszeitfenster der Dynamik der Wärmebilanz unterliegen und stark schwanken können. Des Weiteren führt die Division mit einer ausgeglichenen Wärmebilanz ($\dot{Q}_{PS} \approx \pm 0 \text{ kW}$), z. B. bei temporärer Wärmeführung, zu unendlichen Regelungszeitfenstern. Dies ist zwar grundsätzlich korrekt, weil eine ausgeglichene Wärmebilanz den Speicher weder lädt noch entlädt, es führt aber zu einer unpraktischen Handhabung der Zeitfenster für die multikriterielle Regelung. Die Aussage des Regelungszeitfensters als Zeithorizont für Regelungseingriffe bleibt jedoch bestehen. Eine Beschränkung auf 24 h als maximales Regelungszeitfenster festigt dessen Aussagekraft als quasistationäre Betriebsdauer. Die Regelungszeitfenster könnten als Eingangssignale für übergeordnete Regelungen, z. B. für die zentrale Steuereinheit eines Virtuellen Kraftwerks, dienen.

4.7 Experimentelle Ergebnisse der Speicherzustandsbestimmung

Die Funktionalität der Zustandsbestimmung der Pufferspeicher wird durch experimentelle Untersuchungen am KWK-Prüfstand demonstriert. Anhand der thermischen Lastverläufe am *Übergangstag – Heiter* werden die Wärmebilanzbestimmung, die Speicherenergiebestimmung und die Berechnung der Regelungszeitfenster analysiert. Die experimentellen Ergebnisse der Speicherzustandsbestimmung mit Pufferspeicher 2 sind in **Abbildung 19** dargestellt. Um Übersichtlichkeit zu gewährleisten und gleichzeitig Details zeigen zu können, ist nicht der gesamte Typtag in den einzelnen Abbildungen dargestellt, sondern lediglich die Vormittagstunden zwischen 05:00 Uhr und 13:00 Uhr. Abbildung 19 ist in vier Diagramme untergliedert und basiert auf einem Heizungssystem mit wärmegeführtem KWK-Modul und Pufferspeicher 2. Die sich einstellenden thermischen Leistungen des Wärmeversorgungssystems sind in Diagramm 1 dargestellt. Hierin sind die thermische Sollleistung $\dot{Q}_{Heizung,Soll}$ des Typtages als schwarzer Graph und die thermische Istleistung $\dot{Q}_{Heizung,Ist}$ als roter Graph dargestellt. Die Ladeleistung des externen Warmwasserspeichers $\dot{Q}_{WWSpeicher}$ ist als grauer Graph zu sehen. Die Leistungen der Wärmeerzeuger KWK-Modul \dot{Q}_{KWK} (blauer Graph) und Spitzenlastkessel \dot{Q}_{SLK} (grüner Graph) decken die thermische Last zu jedem Zeitpunkt. Der

Spitzenlastkessel wird einmal zwischen 07:25 Uhr und 08:15 Uhr freigegeben und lädt sowohl den Warmwasserspeicher als auch den Pufferspeicher 2.

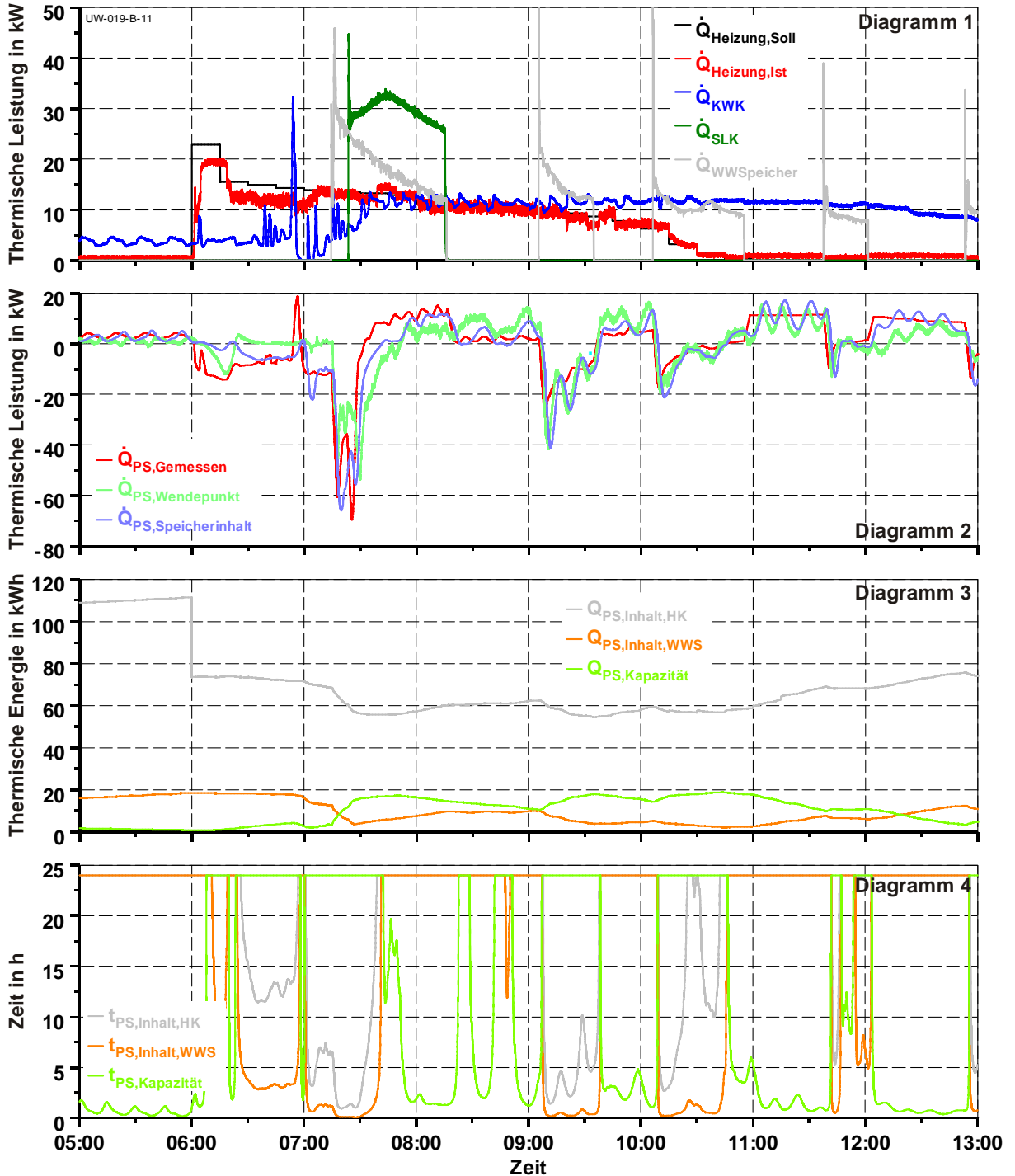


Abbildung 19: Speicherzustände am Übergangstag – Heiter zw. 05:00 Uhr und 13:00 Uhr

Um die Speicherzustandsbestimmung zu prüfen und zu bewerten, bestimmt die Prüfstandssoftware im Hintergrund die Wärmebilanz, die Speicherenergien und die Regelungszeitfenster. Der Zeitabstand für die Speicherzustandsbestimmung beträgt $\Delta t = 180 \text{ s}$. D. h. das regelungstechnische Equipment ist in Betrieb, die Regelgrößen werden jedoch nicht an die multikriterielle Regelung weitergegeben. Auf diese Weise kann die Güte und die Genauigkeit der einzelnen Parameter der Speicherzustandsbestimmung offline analysiert werden. Diagramm 2 vergleicht die gemessenen und die berechneten Wärmebilanzen, in Diagramm 3 sind die Speicherenergien über der Uhrzeit aufgetragen. Die Regelungszeitfenster sind in Diagramm 4 dargestellt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die experimentellen Ergebnisse der Wärmebilanz- und der Speicherenergiebestimmung sowie die Regelungszeitfenster in der Abfolge der Diagramme in Abbildung 19 separat diskutiert.

4.7.1 Wärmebilanz am Übergangstag – Heiter mit Pufferspeicher 2

Die Wärmebilanz entspricht der Summe der thermischen Leistungen von KWK-Modul, Spitzenlastkessel, Heizungssystem und Warmwasserspeicher (siehe Gleichung 13). Jede dieser Leistungen wird am Prüfstand messtechnisch erfasst, so dass die reale Wärmebilanz kontinuierlich und hochgenau aus den Messergebnissen der Pufferspeicherlade- und -entladeleistungen berechnet werden kann. Die experimentellen Untersuchungen erlauben somit vergleichende Analysen zwischen der gemessenen Wärmebilanz (Summe der gemessenen Leistungen) und der berechneten Wärmebilanzen (Berechnung anhand der beschriebenen Methoden). Auf diese Weise kann die entwickelte Wärmebilanzbestimmung über Messergebnisse bewertet werden. Diagramm 2 in Abbildung 19 zeigt den Vergleich der gemessenen Wärmebilanz $\dot{Q}_{PS,Gemessen}$ (roter Graph) mit der berechneten Wärmebilanz $\dot{Q}_{PS,Wendepunkt}$ nach Kapitel 4.4.1 (grüner Graph) und der berechneten Wärmebilanz $\dot{Q}_{PS,Speicherinhalt}$ nach Kapitel 4.4.2 (blauer Graph).

Aus Diagramm 2 geht deutlich hervor, dass die entwickelten Mess- und Berechnungsmethoden die Wärmebilanz mit hoher zeitlicher Genauigkeit und mit der richtigen Leistung bestimmen. Jede Ladung des externen Warmwasserspeichers (um 07:15 Uhr, um 09:05 Uhr, etc.) wird durch beide Wärmebilanzberechnungsmethoden detektiert. Am Beispiel der Warmwasserspeicherladung um 09:05 Uhr ist zu sehen, dass die berechneten Wärmebilanzen der Gemessenen mit hoher Genauigkeit folgen und darüber hinaus die Leistungsänderungsgeschwindigkeiten sehr ähnlich sind. Ein zeitlicher Versatz zwischen den gemessenen und den berechneten Werten ergibt sich automatisch aus dem nötigen Zeitabstand, der für die Erkennung von Speicherzustandsänderungen erforderlich ist. Der Zeitabstand führt zu einem Versatz zwischen der realen (momentanen) Wärmebilanz und den berechneten Wärmebi-

lanzen. Die Berechnungen folgen der realen Wärmebilanz nach. Die resultierenden Abweichungen können durch eine höhere Fühleranzahl oder einen kürzeren Zeitabstand reduziert werden. Die Bestimmungsgenauigkeit insgesamt ist hoch, die Verläufe der Wärmebilanzen in Diagramm 2 zeigen jedoch, dass sich die Genauigkeit der Wärmebilanzbestimmung für die zwei Berechnungsmethoden unterscheidet. Die einzelnen Genauigkeiten werden detailliert in Kapitel 4.8 analysiert.

Des Weiteren weisen die berechneten Wärmebilanzen in Diagramm 2 Leistungsschwankungen auf, die in der Realität nicht auftreten. Die Leistungsschwankungen ergeben sich aus einer Kombination von Zeitabstand, Mischzonendicke und Fühlerabstand. **Abbildung 20** skizziert die Entstehung der Leistungsschwankungen.

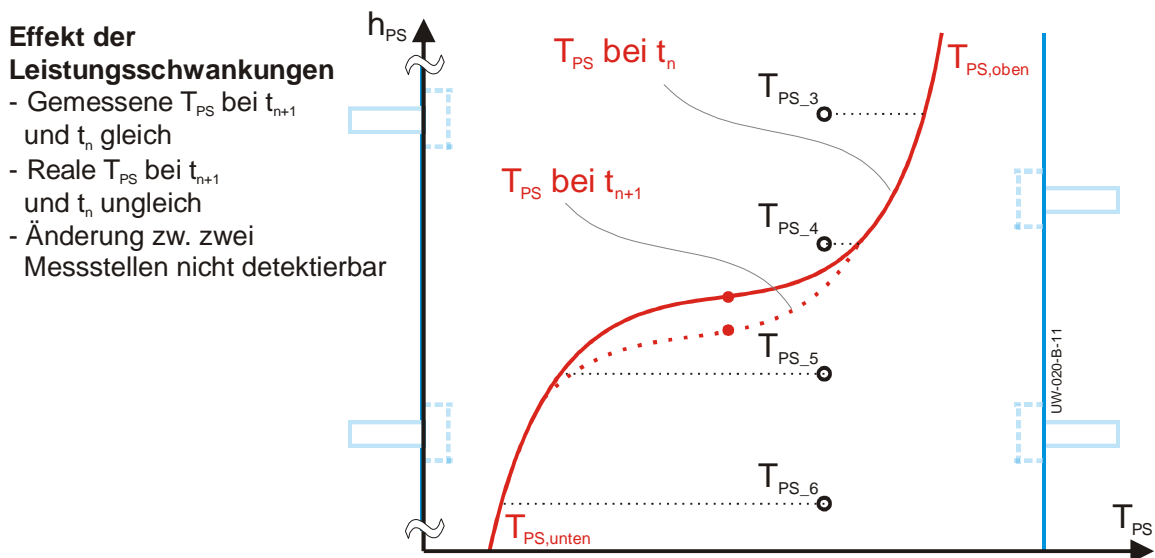


Abbildung 20: Entstehung von Leistungsschwankungen bei der Wärmebilanz

Im Falle einer scharfen Schichtung ist die Mischzone wesentlich dünner als der Abstand zweier übereinander liegender Temperaturfühler am Speicher. Abbildung 20 zeigt schematisch, dass die Temperaturfühler der Messstellen 3 bis 6 zu den Zeitpunkten t_n und t_{n+1} näherungsweise die gleichen Speichertemperaturen messen, der reale Temperaturverlauf (gepunktete Linie) hat sich jedoch verändert. Hier wird die Mischzone beim Speicherladevorgang parallel nach unten verschoben. Die Wärmeerzeuger speisen warmes Wasser in den Speicher ein und verdrängen kaltes Wasser. Der resultierende Nettovolumenstrom des Pufferspeichers ist nach Gleichung 15 proportional zur Wärmebilanz. Wenn im Falle einer scharfen Schichtung das verdrängte Speichervolumen (bzw. die Ladeleistung) im gegebenen Zeitabstand kleiner ist als ein Höhenabstand zwischen zwei Messstellen, multipliziert mit der Speicherquerschnittsfläche, dann bleibt die Speichertemperaturkurve für die Zustandsbestimmung konstant. Die Adaption berechnet für beide Zeitpunkte eine ähnliche Speichertem-

peraturkurve. Die Speicherzustandsbestimmung erkennt damit eine Wärmebilanz kleiner der realen Ladeleistung.

Im folgenden Zeitschritt erreicht die Mischzone die Messstelle 5 und für den Zeitabstand t_{n+1} bis t_{n+2} wird ein deutlicher Temperaturunterschied gemessen. Je schärfer die Schichtung ist, desto deutlicher ist der Temperatursprung. Die Speicherzustandsbestimmung berechnet dadurch eine hohe Leistungsänderung. Die Leistungsschwankungen können durch einen kleineren Fühlerabstand, oder einen längeren Zeitabstand behoben werden. Kleinere Fühlerabstände führen zu einer kontinuierlicheren Erfassung der Mischzone und erhöhen die Genauigkeit der Speicherzustandsbestimmung. Ein längerer Zeitabstand führt lediglich zu einer Glättung der Schwankungen durch eine Mittelung der Lade- und Entladevorgänge über einen längeren Zeitraum. Dynamiken in der thermischen Leistung werden unterdrückt, so dass eine Erhöhung der Genauigkeit der Speicherzustandsbestimmung über die Messstellen und nicht über den Zeitabstand anzustreben ist. Die Optimierung der Fühleranzahl und der Fühlerpositionen erfolgt unter Beachtung dieser Erkenntnisse, um die Berechnungsgenauigkeit zu erhöhen. In **Kapitel 4.9** ist die Optimierung der Messstellen beschrieben.

4.7.2 Speicherenergien am Übergangstag – Heiter mit Pufferspeicher 2

Wird der Speichertemperaturverlauf auf eine Temperatur bezogen und über der Pufferspeicherhöhe integriert, so ergeben sich robuste Ergebnisse. Dies zeigt auch Diagramm 3 aus Abbildung 19. Hier sind die Speicherinhalte für die Heizung $Q_{PS,Inhalt,HK}$ (in grau) und für die Warmwasserversorgung $Q_{PS,Inhalt,WWS}$ (in orange) sowie die Speicherkapazität $Q_{PS,Kapazität}$ (in hellgrün) aufgetragen. Die Kurven beschreiben die Speicherenergien zu jedem Zeitpunkt und zeigen charakteristische Merkmale, die Speicherzustandsänderungen zugeordnet werden können. Merkmale sind einerseits die Wellenform der Speicherenergiekurven und andererseits die Sprünge im Verlauf des Speicherinhalts zur Raumheizung. Die Wellenform zeigt die Vorzeichenwechsel der Wärmebilanz, die infolge der Warmwasserspeicherladungen auftreten. Die Sprünge im Verlauf des Speicherinhalts zur Raumheizung verdeutlichen, wie sich eine veränderte Bezugstemperatur auswirkt. Um 06:00 Uhr beginnt der Heiztag und die Sollvorlauftemperatur des Heizungssystems springt vom abgesenkten Wert für die Nacht auf einen Wert, der sich aus der Heizkurve und der Außentemperatur ergibt. Dieser Wert ist üblicherweise wesentlich höher als die Sollvorlauftemperatur in der Nacht und reduziert somit die nutzbare Temperaturdifferenz im Pufferspeicher. Dies hat einen Sprung zu deutlich geringeren Speicherinhalten zur Folge.

Am Verlauf der Speicherenergien werden Lade- und Entladevorgänge deutlich. In der Zeit von 10:00 Uhr bis 13:00 Uhr wechseln sich regelmäßige Warmwasserspeicherladungen mit Pufferspeicherladungen durch das KWK-Modul ab. Dies führt zu wellenförmigen Speicher-

energieverläufen. Die Wellenform der Speicherkapazität verhält sich antizyklisch zur Wellenform der Speicherinhalte. Eine direkte Umrechnung der Speicherenergie ist nicht möglich, weil sich die Speicherenergien auf veränderliche und verschiedene Temperaturen beziehen.

4.7.3 Regelungszeitfenster am *Übergangstag – Heiter* mit Pufferspeicher 2

Die Bestimmung der Regelungszeitfenster basiert auf der Division der in den vorherigen Kapiteln bestimmten Wärmebilanz über den bezogenen Speicherenergieinhalt und den Speicherenergien. Diagramm 4 in Abbildung 19 zeigt die nach oben auf 24 h begrenzten (siehe Kapitel 4.6) Regelungszeitfenster. Im Falle einer Pufferspeicherladung ändert sich nur das Regelungszeitfenster $t_{PS,Kapazität}$ (in hellgrün) der Speicherkapazität. Die Speicherinhalte sind bei Ladevorgängen sekundär, weil die Ladedauer lediglich durch die Speicherkapazität beschränkt wird. Die Zeitfenster der Speicherinhalte werden daher auf 24 h festgesetzt. Im umgekehrten Fall der Speicherentladung ändern sich nur die Zeitfenster $t_{PS,Inhalt,HK}$ (in grau) und $t_{PS,Inhalt,WWS}$ (in orange) der Speicherinhalte und das Regelungszeitfenster der Speicherkapazität beträgt 24 h, weil die Speicherkapazität keine einschränkende Größe bei der Speicherentladung darstellt.

Speicherlade- und -entladevorgänge werden durch die Wärmebilanz definiert. Die regelmäßigen Warmwasserspeicherladungen zwischen 09:00 Uhr und 13:00 Uhr, gezeigt im Diagramm 4 in Abbildung 19, erzeugen wechselnde Wärmebilanzvorzeichen. Positive Wärmebilanz bedeutet, dass die Regelungszeitfenster der Speicherinhalte auf 24 h festgesetzt werden. Dies verdeutlicht der Ladevorgang zwischen 09:35 Uhr und 10:10 Uhr. In diesem Zeitraum verändert sich nur die Speicherkapazität. Der Pufferspeicher wird mit einer mittleren thermischen Leistung von $\dot{Q}_{PS} = 5 \text{ kW}$ geladen und das Regelungszeitfenster der Speicherkapazität geht von ca. 5 h auf ca. 2,5 h zurück. Die anschließende Warmwasserspeicherladung ab 10:10 Uhr führt zu einer negativen Wärmebilanz. Der Pufferspeicher wird wieder entladen, jedoch mit geringer thermischer Leistung.

4.8 Genauigkeit der Wärmebilanzbestimmung

Zentrale Größe der Speicherzustandsbestimmung ist die Wärmebilanz und deren Genauigkeit ist ausschlaggebend für die Qualität der multikriteriellen Regelung. Dementsprechend wird in diesem Kapitel die Genauigkeit der beiden Berechnungsmethoden anhand der relativen Häufigkeit der Abweichung $f_{Abweichung}$ nach Gleichung 25 bewertet.

$$f_{Abweichung} = \dot{Q}_{PS} - \dot{Q}_{PS,Gemessen} \quad (25)$$

Die Ergebnisse der Gleichung 25 sind in **Abbildung 21** für den *Übergangstag – Heiter* mit Pufferspeicher 2 als Säulendiagramme dargestellt. Im oberen Diagramm ist die Fehlerhäu-

figkeit der Wärmebilanzbestimmung über den Wendepunkt aufgetragen. Das untere Diagramm zeigt die Abweichung der Wärmebilanz über den bezogenen Speicherinhalt zur gemessenen Wärmebilanz. Die Klassenbreite der Abweichung beträgt für beide Berechnungsmethoden $500 \text{ W}_{\text{th}}$. Die Diagramme sind auf den Ausschnitt zwischen $\pm 10 \text{ kW}_{\text{th}}$ beschränkt. Die maximalen Abweichungen der Wärmebilanzbestimmung über den Wendepunkt sind in negative Richtung $-48,7 \text{ kW}_{\text{th}}$ und in positive Richtung $43,2 \text{ kW}_{\text{th}}$. Bei der Wärmebilanzbestimmung über den bezogenen Speicherinhalt ist diese Spreizung deutlich geringer. Sie reicht von $-38,8 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis $26,1 \text{ kW}_{\text{th}}$ und somit ist die Abweichung der Wärmebilanzbestimmung über den Wendepunkt um den Faktor 1,25 bei negativer Abweichung und um den Faktor 1,6 bei positiver Abweichung größer, als bei der Wärmebilanzbestimmung über den bezogenen Speicherinhalt. Unabhängig von der Berechnungsmethodik treten die maximalen Abweichungen äußerst selten auf. Die Säulendiagramme für beide Wärmebilanzberechnungsmethoden in Abbildung 21 zeigen, dass Abweichungen von $\pm 10 \text{ kW}_{\text{th}}$ bereits eine geringe relative Häufigkeit aufweisen. Eine ausschnittsweise Darstellung nach Abbildung 21 ist daher zulässig und ausreichend.

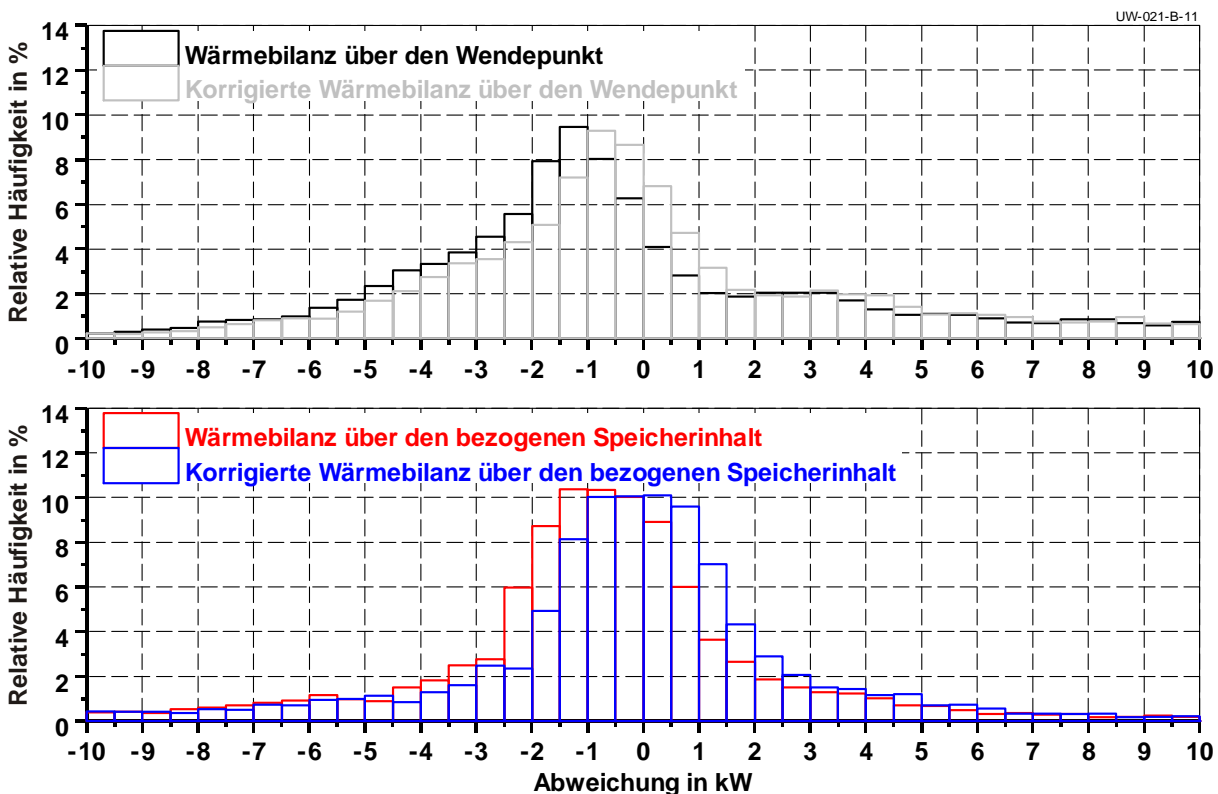


Abbildung 21: Relative Häufigkeit der Abweichung der Wärmebilanz

Beide Berechnungsmethoden zeigen tendenziell negative Abweichungen. D. h. die Wärmebilanzbestimmung berechnet die Wärmebilanz zu niedrig. Beide Säulendiagramme zeigen eine Häufung der Abweichungen zwischen $-500 \text{ W}_{\text{th}}$ bis $-2 \text{ kW}_{\text{th}}$. Die Berechnung über den

Wendepunkt bestimmt die Wärmebilanz in 31,7 % der Fälle mit einer Abweichung bis $-2 \text{ kW}_{\text{th}}$. Die Berechnungsmethode über den bezogenen Speicherinhalt weicht in 39,5 % der Zeit mit bis zu $-2 \text{ kW}_{\text{th}}$ von der gemessenen Wärmebilanz ab. Diese negativen Abweichungstendenzen der Wärmebilanzbestimmung resultieren aus den Speicherverlusten. Sie sind daher keine Ungenauigkeit und die Wärmebilanzen können um die Speicherverluste korrigiert werden. Die gleichmäßige Verteilung der thermischen Speicherverluste am *Übergangstag – Heiter* von $15,8 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{d}$ auf den gesamten Typtag entspricht einer konstanten Verlustleistung von $659,7 \text{ W}_{\text{th}}$. Die um die Speicherverluste korrigierten Wärmebilanzen sind in Abbildung 21 als korrigierte Säulen eingetragen. Die korrigierten Abweichungen häufen sich für beide Berechnungsmethoden infolge der gewählten Klassenbreite zwischen $\pm 500 \text{ W}_{\text{th}}$. Die zum Nullpunkt verschobenen Häufigkeiten zeigen, dass beide Berechnungsmethoden den Speicherverlust mitbestimmen und somit eine zusätzliche Genauigkeit und keine fehlerhafte Berechnung aufweisen.

Die Wärmebilanzbestimmung über den Wendepunkt weicht stärker von der gemessenen Wärmebilanz ab, als die Bestimmung über den bezogenen Speicherinhalt. Die Integration über den gesamten Speichertemperaturverlauf ist eine robustere Bestimmungsmethode, als die Berechnung anhand von zwei Temperaturen ($T_{PS,oben}$ und $T_{PS,unten}$) und der Höhenbewegung des Mischzonenmittelpunkts. Messabweichungen an den Temperaturfühlern am Pufferspeicher haben im Falle der Berechnungsmethode über den Wendepunkt eine stärkere Rückwirkung auf die Wärmebilanzbestimmung. Die Entwicklung und Validierung der multikriteriellen Regelung basiert aufgrund der höheren Bestimmungsgenauigkeit auf der Berechnungsmethode über den bezogenen Speicherinhalt.

4.9 Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Speicherzustandsbestimmung

Die Analyse der experimentellen Ergebnisse der Speicherzustandsbestimmung hat gezeigt, dass die Bestimmungsgenauigkeit der Speicherzustandsgrößen in den häufigsten Fällen hoch ist, aber in den Grenzbereichen durch eine speicherspezifische Anpassung der Messstellenanzahl und der Messstellenposition verbessert werden kann. Basis der Speicherzustandsbestimmung sind Speichertemperaturänderungen über der Pufferspeicherhöhe, die Temperaturgradienten. Die Mischzone ist jener Bereich mit den höchsten Temperaturgradienten, d. h. der Bereich, der die Speicherzustandsänderungen zeigt. Eine Verbesserung der Temperaturmessung orientiert sich somit an den Temperaturgradienten, respektive der Mischzone, um die optimalen Positionen für die Messstellen zu ermitteln. **Abbildung 22**

zeigt die Temperaturgradienten am *Übergangstag – Heiter* von Pufferspeicher 2 als Farbverlauf, aufgetragen zwischen der Uhrzeit und der Pufferspeicherhöhe.

Der Farbverlauf zwischen dunkelblau und tiefrot verdeutlicht die Wanderung der Mischzone und beschreibt die Lade- und Entladevorgänge des Pufferspeichers durch das Wärmeversorgungssystem. Dunkelblaue Bereiche kennzeichnen Pufferspeichersegmente mit konstanter Temperatur. Die helleren Bereiche markieren die Höhe der Mischzone und grenzen die Höhenausbreitung ein. Der Pufferspeicher 2 wird zwischen 00:00 Uhr und 06:00 Uhr durch das KWK-Modul mit einer thermischen Leistung von 4 kW_{th} geladen. Die Mischzone wandert in den Nachtstunden (bis zum Beginn des Heiztages um 06:00 Uhr) von der Pufferspeicherhöhe $h_{\text{PS}} = 110 \text{ cm}$ bis zum Boden des Speichers.

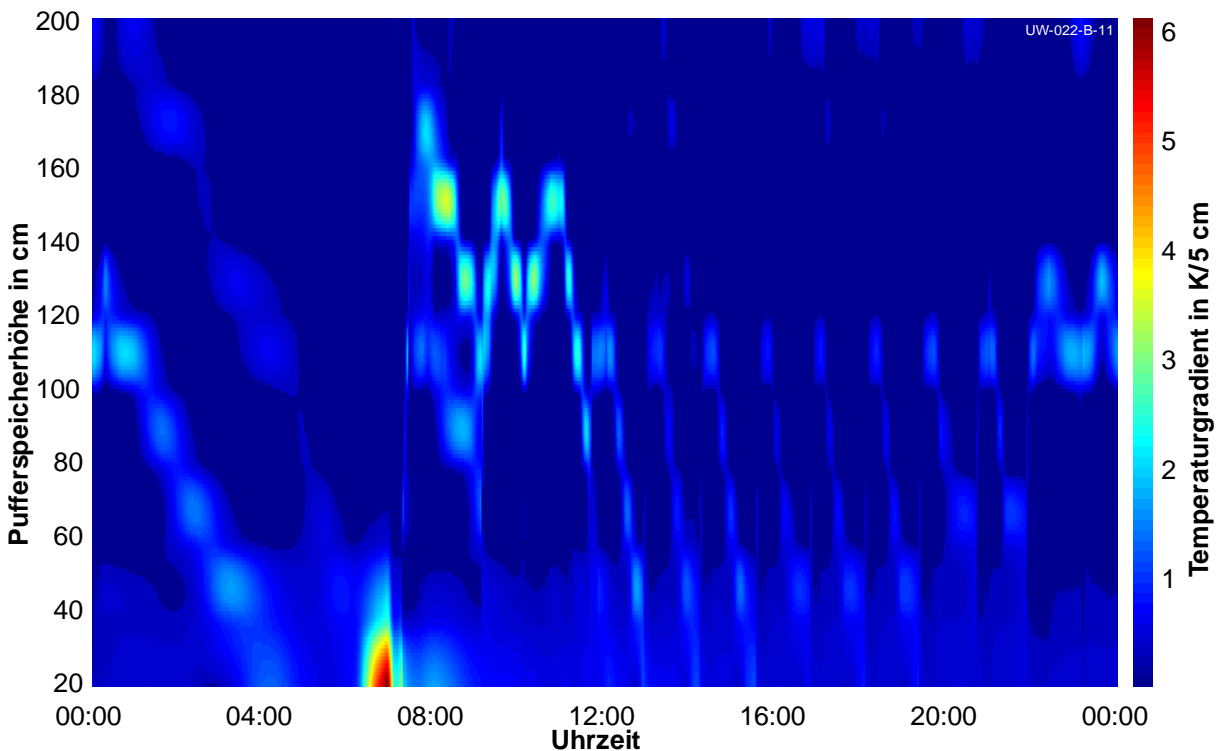


Abbildung 22: Temperaturgradienten am *Übergangstag – Heiter* mit Pufferspeicher 2 [36]

Die Mischzone hat Temperaturgradienten bis zu $2 \text{ K}/5 \text{ cm}$. Der Farbverlauf aus Abbildung 22 erweckt den Eindruck, als würde die Mischzone in Stufen wandern und lokale Maxima des Temperaturgradienten ausprägen. Die Maxima werden an den Messstellen durch denselben Effekt hervorgerufen, der auch für die Leistungsschwankungen in Kapitel 4.7.1 verantwortlich ist. Im Falle einer dünnen Mischzone und einem gegebenen Messstellenabstand treten Zeitpunkte auf, in denen die Messfühler keine Temperaturänderungen messen, weil sich die Mischzone zwischen zwei übereinanderliegenden Messstellen aufhält. Erreicht die Mischzone eine Messstelle, dann treten verstärkte Temperaturänderungen auf. Dieser Wechsel aus Messstelle und Fühlerabstand resultiert in den Schwankungen der Temperaturgradienten.

In der Zeit von 06:00 Uhr bis 12:00 Uhr ist dieser Effekt besonders ausgeprägt. Die Schichtung im Pufferspeicher wird durch die Entladevorgänge in den Vormittagstunden besser, d. h. die Schichtdicke nimmt ab. Die Pufferspeicherentladung durch den Heizkreis und den Warmwasserspeicher erzeugt stark ausgeprägte Maxima an den Temperaturmessstellen in der oberen Hälfte des Pufferspeichers 2, obwohl die Mischzone tatsächlich mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit durch den Pufferspeicher wandert.

Eine Optimierung der Messstellenanzahl und der –position muss anhand der Temperaturgradienten erfolgen, um die Speicherzustandsbestimmung tatsächlich zu vereinfachen und zu verbessern. Die Messstellen müssen jene Speicherbereiche abdecken, in denen sich die Mischzone der Pufferspeicher mit hoher Wahrscheinlichkeit befindet, um die Speichertemperaturkurve hochgenau approximieren zu können. Die Kombination aus Fühleranzahl und Fühlerposition ist derart zu wählen, dass die Auswahl der beiden Parameter die Adaption der Speichertemperaturkurve mit hoher Genauigkeit und Robustheit gewährleistet. Sowohl die Temperaturfühleranzahl, als auch die Positionierung der Fühler hängt von dem gewählten Speichertyp ab. Für Pufferspeicher 2 wird in den folgenden Unterkapiteln die Fühleranzahl reduziert und die Fühlerposition optimiert. Die Unterkapitel beschreiben lediglich einen Ansatz zur Fühleranzahlreduktion und Fühlerpositionierung, um die Möglichkeit eines geringeren Messaufwands aufzuzeigen. Es wird keine optimale Lösung für die Speicherzustandsbestimmung entwickelt.

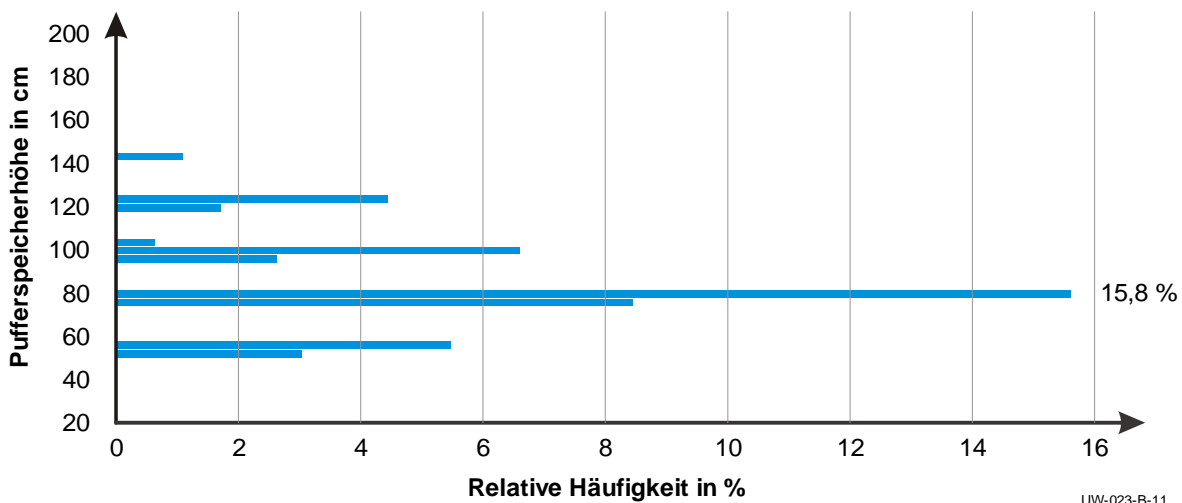
4.9.1 Analyse der Mischzonenwanderung

Die Fühleranzahl hat einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Speicherzustandsbestimmung. Die Messfühler sind die Stützstellen der Berechnungsmethodik und je höher aufgelöst der Speichertemperaturverlauf zu jedem Zeitpunkt abgebildet wird, desto exakter können Speicherzustandsänderungen detektiert werden. D. h. eine hohe Fühleranzahl erhöht die Genauigkeit der Speicherzustandsbestimmung. Mit Blick auf eine einfache Handhabung der Mess- und Regelungsmethodik ist eine Reduzierung der Fühleranzahl letztlich dem Installations- und Kostenaufwand der Temperaturfühler geschuldet.

Die Reduktion der Fühleranzahl basiert auf dem Ansatz, dass keine Speichertemperatur doppelt gemessen werden muss, um eine Adaption der Speichertemperaturkurve als Sigmoidkurve zu ermöglichen. Die Speichertemperaturkurve hat einen oberen und einen unteren Temperaturgrenzwert, der jeweils bekannt sein muss und für ein spezifisches Höhensegment konstant ist. Die Identifizierung der Speicherbereiche, in denen die Temperatur weitestgehend konstant bleibt, erfolgt über die Häufigkeit mit der die Mischzonen in einer bestimmten Pufferspeicherhöhe zu finden ist. **Abbildung 23** zeigt die relative Häufigkeit der Mischzonenmitte auf der Abszisse und die Höhe von Pufferspeicher 2 auf der Ordinate. Die

Verteilung ist nicht gleichmäßig, sondern zeigt Häufungen der Mischzonenmitte auf bestimmten Pufferspeicherhöhen. Die Häufungen zeigen indirekt die Temperaturmessstellen, weil wiederum der Effekt der dünnen Mischzone dazu führt, dass die Mischzonenmitte nur an den Messstellen und damit in Intervallen detektiert werden kann. Die einhüllende Verteilungskurve ist jedoch erkennbar und lässt Rückschlüsse für die Messstellenzwischenbereiche zu.

Die Verteilkurve in Abbildung 23 zeigt deutlich, dass die Mischzone am *Übergangstag - Heiter* hauptsächlich in der unteren Hälfte des Pufferspeichers wandert. Die Bereiche oberhalb von $h_{PS} = 140 \text{ cm}$ und unterhalb von $h_{PS} = 50 \text{ cm}$ sind relativ selten durchmischt und können in erster Näherung als Bereiche konstanter Temperatur angenommen werden. In diesen Bereichen ist jeweils nur ein Fühler anzubringen. Der Zwischenbereich ist jedoch exakt zu vermessen, damit die Mischzone in Form und Geschwindigkeit bekannt ist.



UW-023-B-11

Abbildung 23: Verteilung der Mischzone über der Pufferspeicherhöhe

4.9.2 Analyse der Mischzonendicke

Die Analyse der Mischzonenwanderung hat gezeigt, dass das mittlere Drittel des Pufferspeichers das bevorzugte Höhensegment für Messstellen ist, um eine hohe Bestimmungsgenauigkeit des Speicherzustands zu erreichen. Wie in Kapitel 4.7.1 und in Abbildung 20 bereits gezeigt wurde, ist eine gute Schichtung, d. h. eine dünne Mischzone, für Abweichung zwischen den berechneten und der gemessenen Wärmebilanz verantwortlich. Die Genauigkeit kann durch eine Anpassung des Fühlerabstands erhöht werden. Die Mischzone sollte mindestens von zwei Messstellen erkannt werden, damit die S-Kurven-Form des Speichertemperaturverlaufs nachgebildet werden kann. Der Fühlerabstand muss sich demnach an der Mischzonendicke orientieren, die nach Huhn [23] mithilfe der Gradientenmethode und der 90/10 %-Methode berechnet werden kann. Die Gradientenmethode bestimmt die Mischzo-

nendicke direkt aus dem maximalen Temperaturgradienten $(\Delta T_{PS}/\Delta h_{PS})_{max}$ und die 90/10 %-Methode unterteilt den Speicher in drei Zonen. Gleichung 26 beschreibt den mathematischen Zusammenhang der Gradientenmethode und Gleichung 27 die Unterteilung der Speichertemperaturen nach der 90/10 %-Methode. Beide Methoden ermöglichen die Optimierung der Fühlerpositionen, jedoch mit ganz unterschiedlichen Ergebnissen.

$$\Delta h_{PS,Misch} = \frac{T_{PS,oben} - T_{PS,unten}}{\left(\frac{\Delta T_{PS}}{\Delta h_{PS}}\right)_{max}} \quad (26)$$

$$T_{PS,unten} + 10\% \cdot (T_{PS,oben} - T_{PS,unten}) < T_{PS} < T_{PS,unten} + 90\% \cdot (T_{PS,oben} - T_{PS,unten}) \quad (27)$$

Die auftretenden Mischzonendicken sind in **Abbildung 24** dargestellt. Hierin ist die Mischzonendicke auf der Ordinate und die relative Häufigkeit einer Mischzonendicke auf der Abszisse aufgetragen. Die blauen Balken repräsentieren die Ergebnisse der Gradientenmethode. Die Zonenunterteilung nach der 90/10 %-Methode ist durch die grünen Balken gekennzeichnet. Die Klassenbreite beträgt jeweils einen Zentimeter und Mischzonendicken größer 50 cm werden nicht betrachtet.

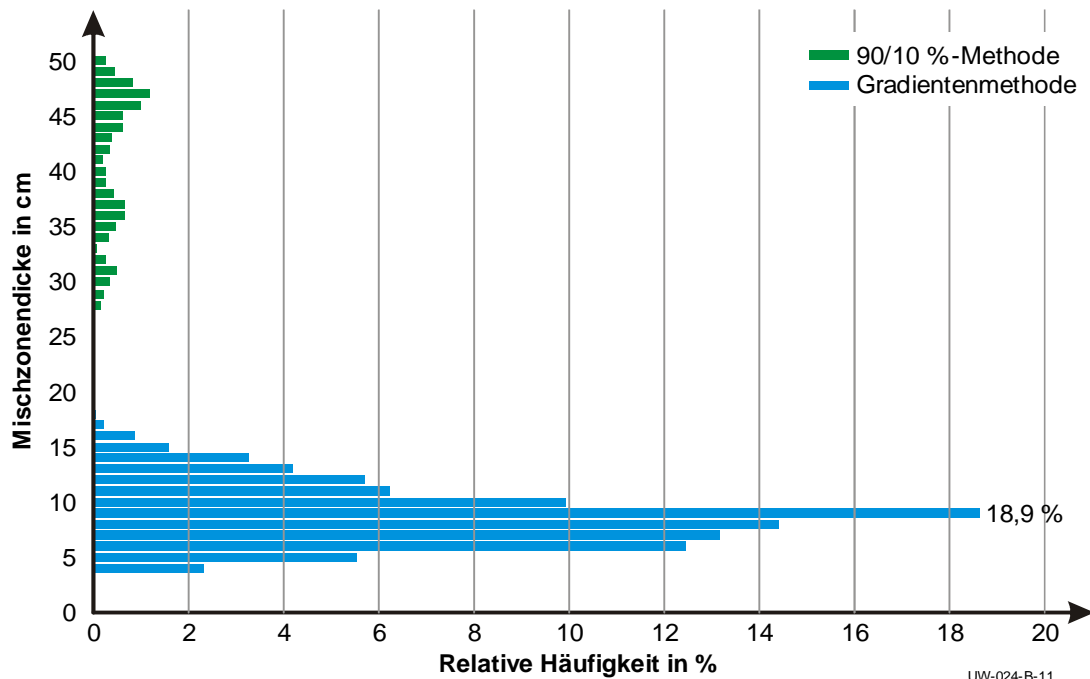


Abbildung 24: Relative Häufigkeit der Mischzonendicke

Unter Verwendung der Gradientenmethode ist die Mischzone $\Delta h_{PS,Misch}$ in keinem Fall dicker als 20 cm und zu 18,9 % der Fälle ist $\Delta h_{PS,Misch} = 9$ cm. Im Gegensatz dazu sind die Mischzonen nach der 90/10 %-Methode wesentlich dicker. Erste detektierbare Mischzonen weisen eine Stärke von 28 cm auf. Darüber hinaus sind die auftretenden Mischzonendicken wesent-

lich weiter gestreut. Beiden Methoden ist gemein, dass sie ungenaue Ergebnisse liefern, sobald die Strömungsvorgänge im Speicher nicht kontinuierlich sind, sondern thermischen Dynamiken unterliegen. Am *Übergangstag – Heiter* wechseln sich zum Teil hohe thermische Leistungen und Ruhephasen ab und bewirken die uneinheitlichen Ergebnisse in Abbildung 24.

Die berechneten Werte der Mischzonendicke aus Abbildung 24 zeigen, dass die Fühlerabstände von Pufferspeicher 2, die im ersten Ansatz zur Speicherzustandsbestimmung auf 20 cm festgelegt worden sind, folglich zu groß bzw. zu klein gewählt wurden. Der Messstellenabstand von 20 cm ergab sich aus der Gesamtanzahl der Fühler (zehn), einer äquidistanten Anordnung und der Pufferspeicherhöhe von 205 cm. Nach der Gradientenmethode sollte der Abstand zwei übereinander liegender Temperaturfühler halbiert und nach der 90/10 %-Methode verdoppelt werden. Weitergehende empirische Vergleiche zwischen den berechneten Mischzonendicken und graphischen Auswertungen von Speichertemperaturkurven haben gezeigt, dass die Gradientenmethode zu einer Unterschätzung der Mischzonendicke tendiert, aber eine wesentlich höhere Genauigkeit aufweist als die 90/10 %-Methode. Dementsprechend ist der optimierte Messstellenabstand kleiner zu wählen, als im ersten Ansatz, sollte aber die Resultate der 90/10 %-Methode nicht außer Acht lassen.

Der neue Messstellenabstand für den mittleren Speicherbereich ist ein gewichteter Mittelwert der Ergebnisse von Gradienten- und 90/10 %-Methode und wird auf 15 cm festgelegt. Um die Fühleranzahl zu beschränken, sind die Ergebnisse der empirischen Analyse zur Mischzonendicke in den Messaufbau mit eingeflossen. Des Weiteren ist die Bewegungsgeschwindigkeit der Mischzone hoch genug, so dass bei einem Zeitabstand von $\Delta t = 180 \text{ s}$ Temperaturänderungen an zwei übereinander liegenden Fühlern gemessen werden können.

Der Fühlerabstand von 15 cm ist speicherspezifisch und gilt für Pufferspeicher 2. Die Optimierung der Fühlerpositionen ist für jeden Pufferspeicher durchzuführen, um die jeweiligen Speicherzustände genauer erfassen zu können. Mithilfe der Erkenntnisse zum Mischzonenverhalten, wie Wanderung der Mischzone und die Häufigkeit verschiedener Mischzonendicken, können für alle Pufferspeicher Rückschlüsse zur Fühlerpositionierung gezogen werden. Die Reduktion der Fühleranzahl und die Optimierung der Fühlerposition sowie der resultierende, optimierte Messaufbau werden im folgenden Kapitel für den Pufferspeicher 2 erläutert.

4.9.3 Optimierter Messaufbau

Die einfache Einteilung der Pufferspeicherhöhe in die Bereiche warme Zone, Mischzone und kalte Zone hat sich durch die Untersuchung der Mischzone bestätigt. Das obere Drittel ist selten durchmischt und hält warmes Wasser für die Heizung und die Warmwasserversor-

gung vor. Im mittleren Drittel des Pufferspeichers werden die Lastschwankungen durch Über- oder Unterproduktion der Wärmeerzeuger abgefedert und ausgegletet. Die kalte Zone besteht aus dem Rücklaufwasser der Wärmeverbraucher. Dieses Verhalten wird dem Pufferspeicher durch die Standardregelung aufgeprägt. Die Standardregelung verhindert, dass die Temperatur an Fühler $T_{VF,Gesamt}$ unter den eingestellten Sollwert fällt und beschränkt somit die Wanderung der Mischzone auf das mittlere Speicherdr Drittel. Das bedeutet, dass gleichzeitig das nutzbare Speichervolumen aus Komfortgründen beschränkt wird. Dies ist zwingend notwendig, wenn der eigentliche Speicherzustand nur unzureichend bekannt ist. Auf diese Weise wird die Deckung des Wärmebedarfs garantiert.

Für die Optimierung des Messaufbaus zur Speicherzustandsbestimmung wird, ausgehend von dem Pufferspeicherverhalten bei Standardregelung, jedoch ohne Limitation des Speichervolumens, eine Fühlerpositionierung wie im rechten Pufferspeicher in **Abbildung 25** gewählt. Das mittlere Drittel von Pufferspeicher 2 wird mit einem Messstellenabstand von 15 cm genau vermessen. Die Temperaturen $T_{PS,oben}$ und $T_{PS,unten}$ werden von den Fühlern $T_{PS_1_Opt}$ und $T_{PS_7_Opt}$ erfasst.

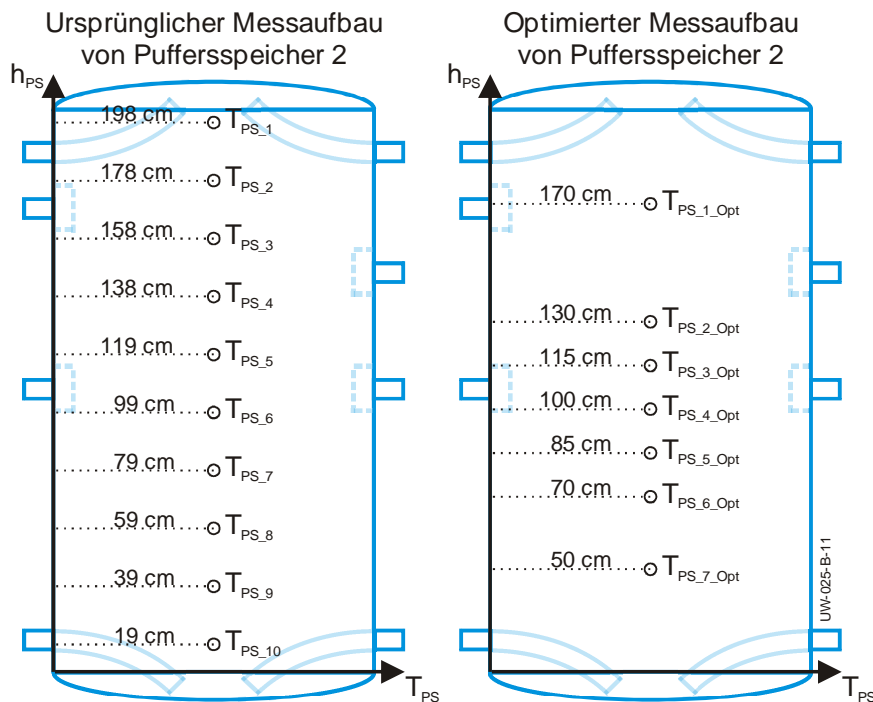


Abbildung 25: Optimierter Messaufbau zur Speicherzustandsbestimmung

Die Adaption der Messwerte als Sigmoidkurve ist mit einem Messaufbau mit sieben Temperaturmessstellen zu jedem Zeitpunkt möglich. Die experimentellen Ergebnisse des optimierten Messaufbaus werden im folgenden Kapitel beschrieben.

4.9.4 Experimenteller Vergleich und Bewertung

Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, bleibt bei der Untersuchung des optimierten Messaufbaus die experimentelle Umgebung unverändert. Wiederum wird die Speicherzustandsbestimmung am *Übergangstag – Heiter* mit Standardregelung und Pufferspeicher 2 analysiert. Zentrale Fragestellung bei der Reduktion der Messstellen und der Anpassung der Messstellenposition ist die Genauigkeit, mit der die Speichertemperaturkurve und die Veränderungen der Speichertemperaturkurve detektiert werden können. Eine Aussage über diese Genauigkeit kann über die Bewertung der Wärmebilanz erfolgen. Hierzu sind in **Abbildung 26** im oberen Diagramm die gemessene Wärmebilanz $\dot{Q}_{PS,Gemessen}$ als roter Graph und die berechnete Wärmebilanz über den bezogenen Speicherinhalt $\dot{Q}_{PS,Speicherinhalt}$ als hellblauer Graph aufgetragen und im unteren Diagramm ist die Abweichung dieser Größen nach Gleichung 25 dargestellt.

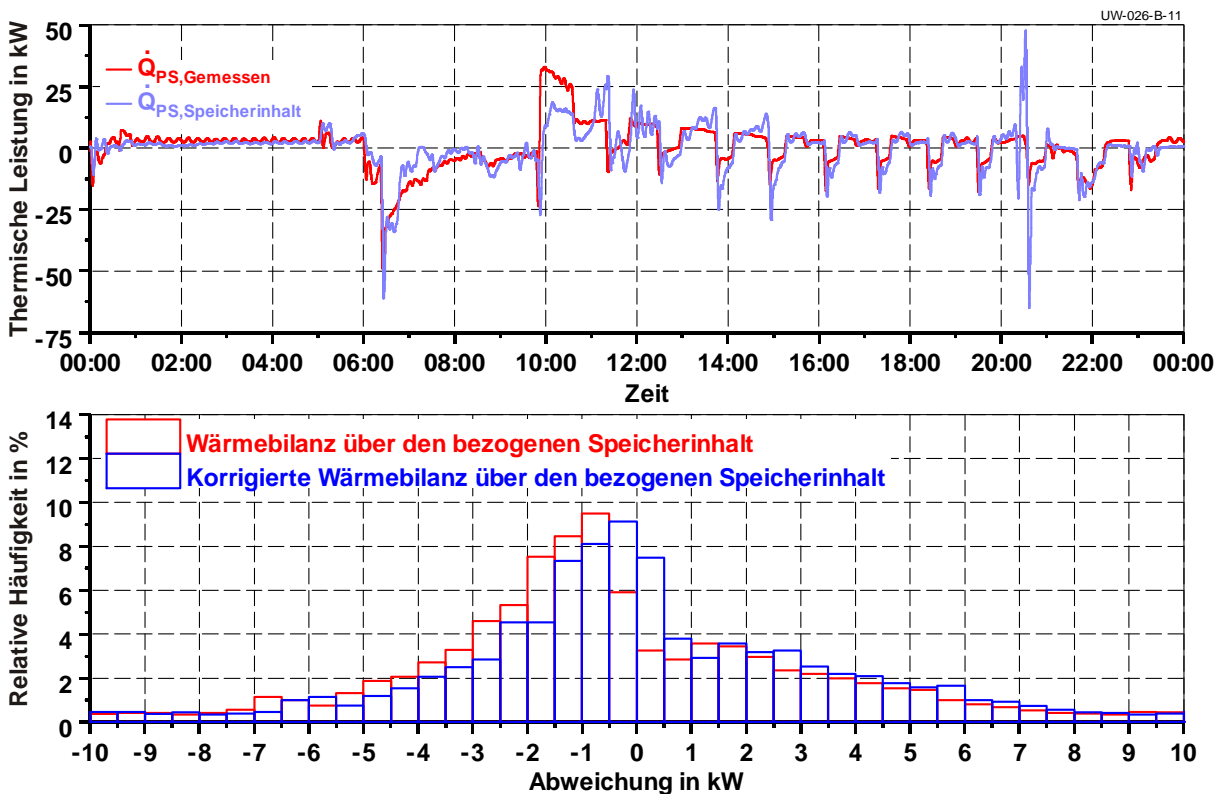


Abbildung 26: Relative Häufigkeit der Abweichung der Wärmebilanz mit sieben Temperaturfühlern am *Übergangstag – Heiter*

Der Vergleich der Wärmebilanzen (oberes Diagramm) zeigt eine deutliche Übereinstimmung von gemessener und berechneter Wärmebilanz über den gesamten Typtag. Der Messaufbau mit sieben Messstellen zeigt ähnlich gute Ergebnisse wie die Wärmebilanzbestimmung mit zehn Temperaturmessstellen. Die thermische Leistung, die Zeitpunkte der Leistungsänderung sowie die Änderungsgeschwindigkeit werden durch den optimierten Messaufbau er-

kannt. Dieser Eindruck wird durch die Berechnung der relativen Häufigkeit der Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Wärmebilanzwert bestätigt. Im unteren Diagramm in Abbildung 26 ist die relative Häufigkeit der Abweichung mit einer Klassenbreite von $500 \text{ W}_{\text{th}}$ als Säulen auf der Ordinate über der absoluten Abweichung auf der Abszisse aufgetragen. Entsprechend der Fehlerbetrachtung mit zehn äquidistanten Messstellen, zeigt die Abweichung beim optimierten Messaufbau tendenziell negative Fehler. Die Abweichung liegt in 31,4 % aller Zeitpunkte zwischen $-2 \text{ kW}_{\text{th}}$ und 0 kW_{th} und ist nur selten größer bzw. kleiner als $\pm 10 \text{ kW}_{\text{th}}$. Die maximalen Fehlerabweichungen mit sieben Messstellen liegen deutlich höher als die Abweichungen mit dem ursprünglichen Messaufbau. Die Bandbreite reicht von $-56 \text{ kW}_{\text{th}}$ bis $47 \text{ kW}_{\text{th}}$.

Des Weiteren zeigt die Messung mit sieben Speichertemperaturen das gleiche Bestimmungsverhalten wie die Messung mit dem ursprünglichen Messaufbau. Die Speicherverluste werden mitbestimmt, weil durch Wärmeverluste hervorgerufene Temperaturänderungen mitbestimmt werden. Folglich können die Pufferspeicherverluste des *Übergangstag – Heiter* von $15,9 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{d}$ als konstante Verlustleistung von $660,8 \text{ W}_{\text{th}}$ angenommen und der Wärmebilanz aufaddiert werden. Die korrigierte Wärmebilanzbestimmung ist im unteren Diagramm in Abbildung 26 als blaue Säulen dargestellt und zeigt, dass die Genauigkeit nochmals erhöht werden konnte.

5 Multikriterielle Regelung von KWK-Anlagen

Nach dem Stand der Technik werden Mini-KWK-Anlagen entweder wärmegeführt oder stromgeführt betrieben. Der jeweils komplementäre Energiebedarf bleibt somit unberücksichtigt. Diese monokriteriellen Regelungen werden in dieser Arbeit zu einer multikriteriellen Regelung vereint, indem die vormals getrennten Regelungsziele thermischer Lastgang und elektrischer Lastgang in einer Kaskadenregelung kombiniert werden. Grundlage hierfür ist die temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung von Pufferspeichern, die erstmals die thermischen Leistungen und Energien der Wärmeversorgung in ausreichender Genauigkeit bestimmt, um als Regelgröße der thermischen Regelungskaskade zu fungieren. Ergänzt um den Stromzähler-Messwert des elektrischen Lastgangs (Regelgröße der elektrischen Regelungskaskade), kann die multikriterielle Regelung das KWK-Modul in Kombination mit einem Pufferspeicher derart einsetzen, dass der Produktionsdeckungsgrad bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs maximal wird. Die multikriterielle Regelung folgt zwei unabhängigen Regelungszielen, indem sie eine temporäre Entkopplung von Wärmeerzeugung und -bedarf ermöglicht, um eine temporäre Kopplung von Stromerzeugung und -bedarf herzustellen.

In den folgenden Unterkapiteln werden die technische Umsetzung und der Regelungsalgorithmus der multikriteriellen Regelung vorgestellt. Experimentelle Untersuchungen erlauben eine Diskussion über die Funktionalität und die Sensitivitäten der entwickelten Regelung.

5.1 Regelungskonzept

Das regelungstechnische Grundprinzip der multikriteriellen Regelung entspricht einer Kaskadenregelung, die in der inneren Kaskade die elektrischen Größen und in der äußeren Kaskade die thermischen Größen ausregelt. Der innere Regelkreis besteht aus dem Stromzähler des Gebäudes und dem KWK-Modul. Der äußere Regelkreis verbindet die Komponenten KWK-Modul, Spitzenlastkessel und Pufferspeicher mit Speicherzustandsbestimmung. Verknüpft werden die Regelkreise über die sogenannte Störgröße Wärmebedarf. Hierbei handelt es sich um eine elektrische Differenzleistung, die proportional zur Regelabweichung des äußeren Regelkreises ist und den inneren Regelkreis stört. D. h. die multikriterielle Regelung priorisiert die Maximierung des Produktionsdeckungsgrades und wird durch die Störgröße

Wärmebedarf, im Folgenden nur noch Störgröße genannt, zu Abweichungen von der elektrischen Lastfolge gezwungen. Die Kaskadenregelung wird in den folgenden Unterkapiteln schrittweise erläutert.

5.1.1 Regelungskaskade zur Maximierung des Produktionsdeckungsrades

Die Führungsgröße der inneren Regelungskaskade ist der elektrische Bedarf, der dazu dient den Produktionsdeckungsgrad zu maximieren. Die resultierende Regelabweichung ist die residuale Last des Gebäudes, die mithilfe der Regelstrecke, dem KWK-Modul, minimiert wird. In **Abbildung 27** ist die innere Regelungskaskade schematisch dargestellt.

Das KWK-Modul wird netzparallel betrieben, d. h. die elektrische Leistung des KWK-Moduls wird zurückgeführt und mit der Führungsgröße, dem elektrischen Bedarf, zur Regelabweichung, der residualen Last, verrechnet. Der Stromzähler gibt ein lastabhängiges Impulssignal aus, welches vom Regler, dem Prüfstandsrechner, interpretiert werden kann.

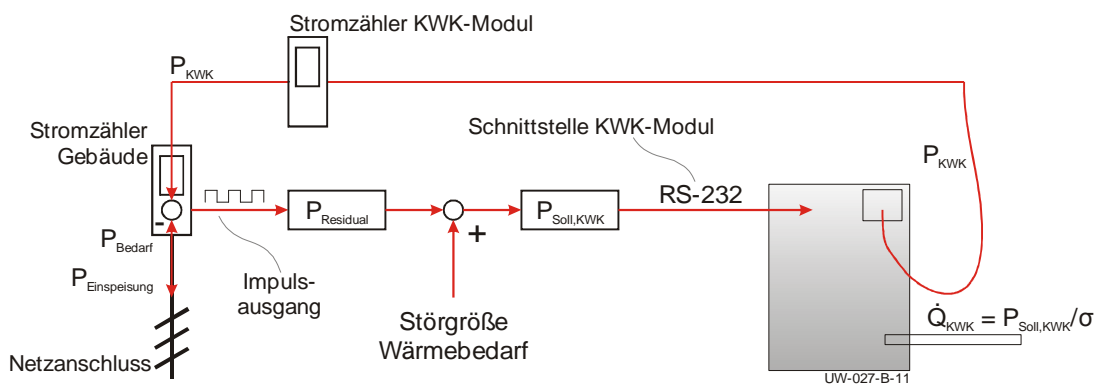


Abbildung 27: Regelkreis der elektrischen Größen der multikriteriellen Regelung

Beispielhaft sei angenommen, dass die residuale Last positiv ist. In diesem Fall erhält der Regler ein entsprechendes Impulssignal und wird dem KWK-Modul eine höhere elektrische Sollleistung $P_{Soll,KWK}$ in Form einer Drehzahlerhöhung vorgeben. Das KWK-Modul erhöht die elektrische Leistung P_{KWK} und versucht die Regelabweichung $P_{Residual}$ zu minimieren. Wird die Regelabweichung Null, so bleibt die Drehzahl des KWK-Moduls konstant. Änderungen im elektrischen Bedarf P_{Bedarf} führen wiederum zu einer Regelabweichung, die durch eine erneute Drehzahlanpassung ausgeglichen werden.

Die Sollleistung des KWK-Moduls wird nicht allein durch den elektrischen Bedarf berechnet, sondern durch die Störgröße beeinflusst. Diese Störgröße wird in der äußeren Regelungskaskade berechnet und dem elektrischen Restlastgang additiv aufgeprägt. Die thermische Regelungskaskade wird im folgenden Kapitel beschrieben. Der hinterlegte Regelalgorithmus zur Bestimmung von $P_{Soll,KWK}$ wird in **Kapitel 5.2** erläutert.

5.1.2 Regelungskaskade zur Wärmebedarfsdeckung

Der Wärmebedarf ist die Regelgröße der äußeren Kaskade. Die Regelungsstruktur gewährleistet die Deckung des Heizwärme- und des Warmwasserbedarfs. Bei Kaskadenregelungen ist der innere Regelkreis schneller als der äußere Regelkreis. Dementsprechend ist die thermische Regelungskaskade als träge Regelung außerhalb der elektrischen Regelungskaskade angeordnet. **Abbildung 28** zeigt den äußeren Regelkreis schematisch.

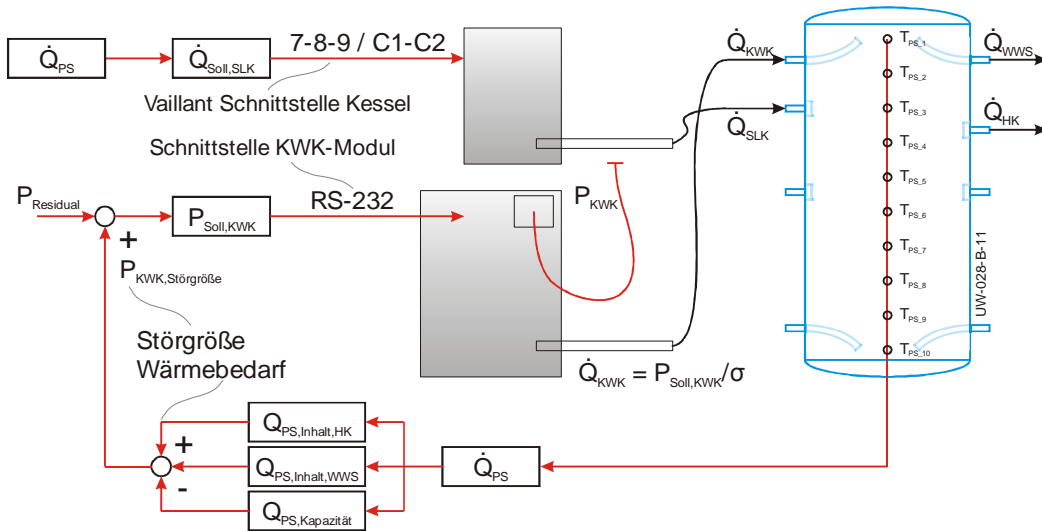


Abbildung 28: Regelkreis der thermischen Größen der multikriteriellen Regelung

Im äußeren Regelkreis wird der Speicherzustand, bestehend aus Wärmebilanz und Speicherenergien, zurückgeführt, um die thermische Regelabweichung zu berechnen. Eine Regelabweichung kennzeichnet eine Unter- oder Überversorgung des Wärmeversorgungssystems. Aufgrund der Speicherenergien hat die Regelungskaskade zur Wärmebedarfsdeckung eine ausgeprägte Zeitkonstante. Die Regelungskaskade bewertet die Unter- oder Überversorgung des Wärmeversorgungssystems unter Berücksichtigung der Pufferspeicherenergien und erlaubt temporäre Regelabweichungen. Treten jedoch thermisch kritische Zustände in der äußeren Regelungskaskade auf, so wird eine elektrische Differenzleistung, die Störgröße, berechnet. Diese elektrische Größe $P_{KWK,Störgröße}$ ist proportional zur thermischen Abweichung der äußeren Regelungskaskade und passt die thermische Leistung der Regelstrecke indirekt über die innere Regelungskaskade (mithilfe der Sollleistung des KWK-Moduls $\dot{Q}_{KWK} = P_{Soll,KWK} / \sigma$) an.

Die Definition eines thermisch kritischen Zustands, die Bestimmung der Störgröße sowie die Berechnung der Sollleistungen der Wärmeerzeuger werden zusammen mit dem Regelungsalgorithmus in Kapitel 5.2 erläutert.

5.1.3 Kaskadenregelung des KWK-Moduls

Jede Regelungskaskade für sich genommen entspricht einer monokriteriellen Regelung. Das Konzept der multikriteriellen Regelung entsteht aus der Kombination der Regelungskaskaden für den elektrischen und für den thermischen Bedarf. Die resultierende Kaskadenregelung führt einerseits die residuale Last und andererseits die Speicherzustände zurück, um sowohl thermische als auch elektrische Leistungen im Gebäude zu erfassen und auszuregeln (siehe **Abbildung 29**). Auf diese Weise kann die Gebäudeenergieversorgung im Verbund optimiert werden. [52]

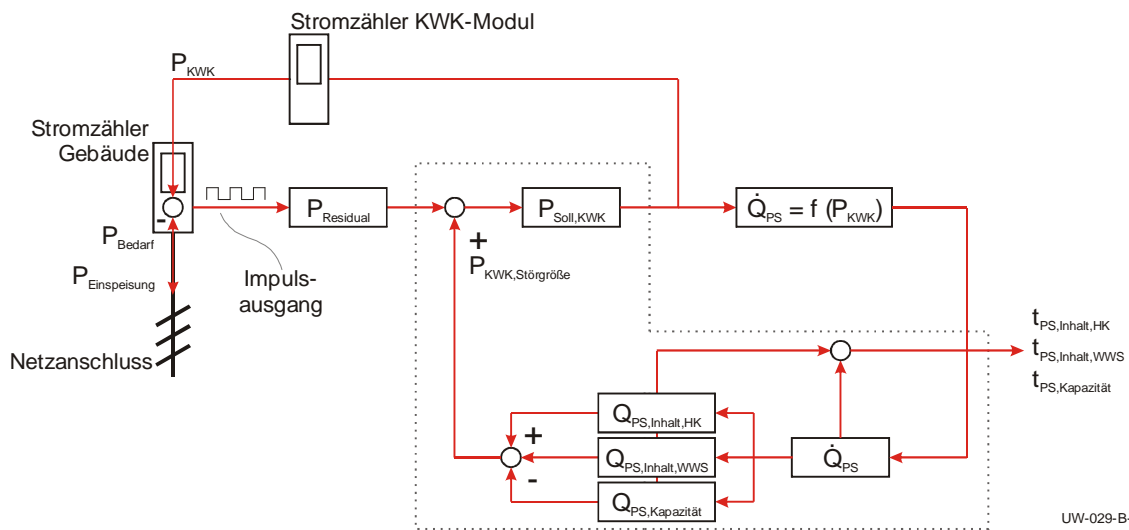


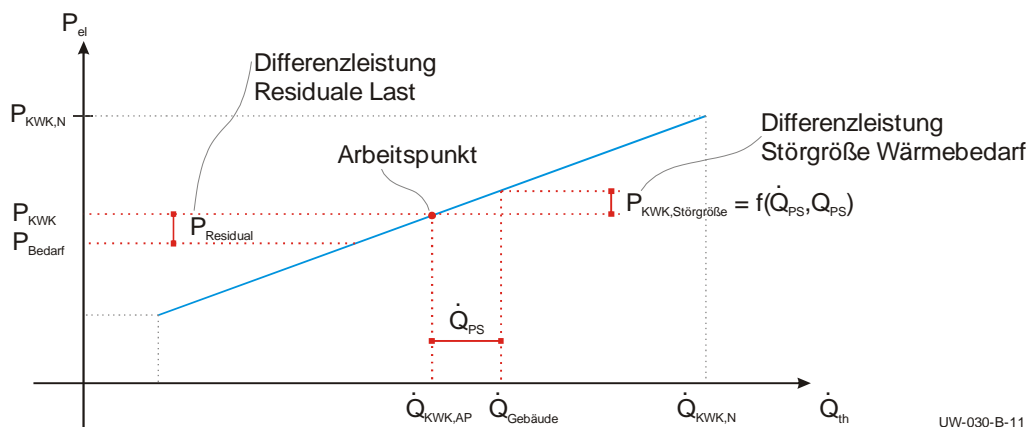
Abbildung 29: Kaskadenregelung der multikriteriellen Regelung

Die unabhängig voneinander bestimmten Regelgrößen der einzelnen Kaskaden werden zur Sollleistung des KWK-Moduls $P_{\text{Soll, KWK}}$ zusammengefasst und ergeben eine vom thermischen und elektrischen Gebäudebedarf abhängige, gemeinsame Regelgröße. Hierbei handelt es sich um einen gewichteten Sollwert, der als Eingangsgröße des KWK-Moduls die Strom- und Wärmeerzeugung multikriteriell regelt. Folgt z. B. die Stromerzeugung des KWK-Moduls einer elektrischen Bedarfsänderung, weil ein zusätzlicher Verbraucher im Mehrfamilienhaus eingeschaltet wurde, bewertet die Speicherzustandsbestimmung, inwieweit diese Lastfolge beim aktuellen Speicherzustand möglich ist. Ändert sich jedoch der thermische Bedarf, z. B. durch die Betätigung eines Thermostatventils an einem Heizkörper, so wird wiederum über den Speicherzustand entschieden, ob die elektrische Lastfolge noch möglich ist, oder ob das KWK-Modul die Wärmeerzeugung erhöhen oder verringern muss. Diese Entscheidungen werden im markierten Bereich in Abbildung 29 getroffen. Der grau umrahmte Bereich umfasst den Algorithmus der multikriteriellen Regelung, bestehend aus der Minimierung der residualen Last und der Bestimmung der Störgröße zur Deckung des Wärmebedarfs. Der Regelungsalgorithmus wird in Kapitel 5.2 detailliert beschrieben.

5.2 Multikriterieller Regelungsalgorithmus

Das Konzept der Kaskadenregelung ermöglicht die Steuerung des KWK-Moduls unter Berücksichtigung einer gewichteten Regelgröße, die sich aus den Regelabweichungen zweier unabhängiger Parameter zusammensetzt. Die Überführung der unabhängigen Regelgrößen zu einer verknüpften Steuergröße des KWK-Moduls erfolgt anhand von bedarfsabhängigen Differenzleistungen, die die Strom- und Wärmeerzeugung des KWK-Moduls anpassen. Die bedarfsabhängigen Differenzleistungen sind die residuale Last des untersuchten Mehrfamilienhauses und die Störgröße der thermischen Regelungskaskade.

Ermöglicht wird dieser Regelungsalgorithmus durch die Modulationskennlinie des verwendeten Mini-KWK-Moduls. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen Strom- und Wärmeerzeugung des KWK-Moduls. Diese starre Kopplung ist in **Abbildung 30** als Kennlinie mit exemplarischen Regelabweichungen der inneren und der äußeren Regelungskaskade skizziert. Hieraus wird ersichtlich, dass Leistungsanpassungen zur Minimierung der residualen Last direkt zu Änderungen der Wärmebilanz und des Speicherzustand führen. Die thermischen Auswirkungen der priorisierten Minimierung der residualen Last des Gebäudes werden durch die Speicherzustandsbestimmung detektiert und bewertet und gegebenenfalls nachrangig über die Anpassung der Wärmeerzeugung mithilfe der Störgröße ausgeregelt.



UW-030-B-11

Abbildung 30: Modulationskennlinie des KWK-Moduls und Regelungsparameter

Die Modulationskennlinie dient der multikriteriellen Regelung als Sollwertgeber, um sowohl die Stromerzeugung als auch die Wärmeerzeugung des KWK-Moduls über die elektrischen Differenzleistungen „Residuale Last“ und „Störgröße Wärmebedarf“ anzupassen. Die einzelnen Parameter zur Berechnung der Sollleistung des KWK-Moduls werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

5.2.1 Berechnung der Sollleistung des KWK-Moduls

Die Sollleistung des KWK-Moduls $P_{Soll,KWK}$ ist der verknüpfte Sollwert der Kaskadenregelung, der sich aus der momentanen elektrischen Leistung des KWK-Moduls P_{KWK} , der residualen Last $P_{Residual}$ und der Störgröße $P_{KWK,Störgröße}$ zusammensetzt. Die Berechnung der Sollleistung erfolgt nach Gleichung 28, die das Bindeglied der multikriteriellen Regelung darstellt.

$$P_{Soll,KWK} = P_{KWK} + P_{Residual} + P_{KWK,Störgröße} \quad (28)$$

Die Momentanleistung des KWK-Moduls wird über die Differenzleistungen „Residuale Last“ und „Störgröße Wärmebedarf“ an die Energiebedarfe des Gebäudes angepasst. Die multikriterielle Regelung gibt dem KWK-Modul lediglich eine elektrische Sollleistung vor, um den Produktionsdeckungsgrad bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs zu maximieren. Auf diese Weise erfolgt eine Einsatzoptimierung des KWK-Moduls anhand des elektrischen Lastgangs, die am thermischen Speicherzustand ausgerichtet ist.

Die Differenzleistung „Residuale Last“ ist messbar und damit einfach zu bestimmen. Dahingegen ist die Bestimmung der Störgröße nur rechnerisch möglich. Die Differenzleistung $P_{KWK,Störgröße}$ ist eine Proportionalitätsgröße, die den Speicherzustand und die thermische Regelabweichung mithilfe negativer oder positiver elektrischer Differenzleistungen darstellt und im Falle einer unkritischen thermischen Regelabweichung Null ist. Eine negative Differenzleistung beschreibt eine (kritische) thermische Überversorgung und der umgekehrte Fall, eine positive Differenzleistung, definiert eine (kritische) thermische Unterversorgung. Die Störgröße ist ein additiver Teil der Sollleistung und erzwingt somit eine höhere oder niedrigere Wärmeerzeugung des KWK-Moduls in Abhängigkeit des Speicherzustands.

Ob der Zustand einer thermischen Über- oder Unterversorgung eingetreten ist, wird über die Speicherenergien bewertet. Die Bewertung ist speichertypabhängig, d. h. die Zustände der thermischen Über- oder Unterversorgung sind nicht einheitlich definiert. Des Weiteren treten eine Über- oder eine Unterversorgung immer getrennt voneinander auf und haben deshalb auch getrennte Störgrößenanteile, die zu einer Gesamtstörgröße der elektrischen Kaskade aufsummiert werden. Die resultierende „Störgröße Wärmebedarf“ setzt sich demnach aus Anteilen der Speicherkapazität $P_{KWK,Störgröße,Kapazität}$ und der Speicherenergieinhalte zur Raumheizung $P_{KWK,Störgröße,HK}$ und zur Warmwasserversorgung $P_{KWK,Störgröße,WWS}$ zusammen (siehe Gleichung 29).

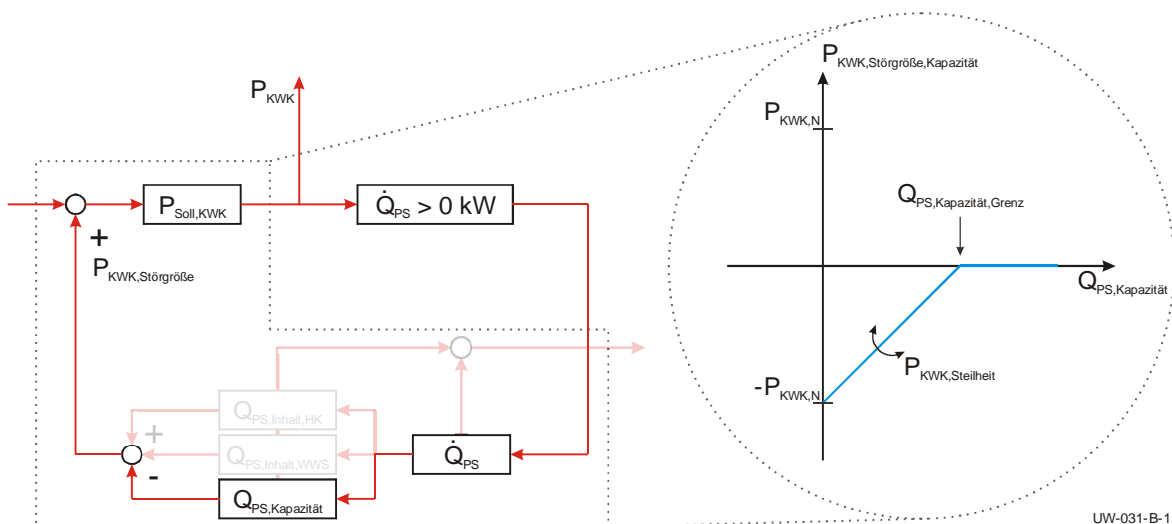
$$P_{KWK,Störgröße} = P_{KWK,Störgröße,Kapazität} + P_{KWK,Störgröße,HK} + P_{KWK,Störgröße,WWS} \quad (29)$$

Die jeweiligen Störgrößenanteile sind von der Wärmebilanz und den Speicherenergien abhängig. Die Abhängigkeiten und die Stellschrauben der Störgrößenberechnung werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Die Beschreibung der Störgröße ist in die Fälle

einer negativen und einer positiven Störgröße unterteilt. Die Fallunterscheidung wird in Abhängigkeit der Wärmebilanz durchgeführt.

5.2.2 Berechnung der Störgröße bei positiver Wärmebilanz

Das Vorzeichen der Wärmebilanz unterscheidet Pufferspeicherlade- und -entladevorgänge. Die Wärmebilanz ist positiv, wenn die Wärmeerzeugung größer als der Wärmebedarf ist und der Pufferspeicher geladen wird. In diesem Fall ist die Speicherkapazität der begrenzende Faktor einer Wärmeübersorgung. Demzufolge reduziert sich die thermische Regelungskaskade bei positiver Wärmebilanz auf die Rückkopplung der Wärmebilanz mit Bewertung über die aktuelle Speicherkapazität. In der linken Hälfte von **Abbildung 31** ist dieser aktive Regelkreis zur Verdeutlichung farblich hervorgehoben. Die inaktiven Parameter der Regelungskaskade sind transparent dargestellt. Sie bleiben im Falle einer positiven Wärmebilanz unberücksichtigt.



UW-031-B-11

Abbildung 31: Bestimmung der Störgröße bei positiver Wärmebilanz

Mithilfe einer speicherabhängigen Grenzkapazität $Q_{PS,Kapazität,Grenz}$ werden die Speicherzustände bei positiver Wärmebilanz in thermisch kritische und unkritische Zustände unterteilt. Im Falle eines kritischen Speicherzustands ist das Ausgangssignal des aktiven Regelkreises negativ. Eine negative Störgröße reduziert die Sollleistung $P_{Soll,KWK}$ um einen der Wärmeübersorgung proportionalen Anteil. Folglich moduliert das KWK-Modul herunter und erzeugt weniger Wärme. Die Wärmebilanz strebt einem ausgeglichenen Wert entgegen.

Der funktionale Zusammenhang des Störgrößeanteils der Speicherkapazität ist im rechten Teil von **Abbildung 31** schematisch dargestellt und wird durch Gleichung 30 beschrieben. Hierin ist die Differenzleistung $P_{KWK,Störgröße,Kapazität}$ der multikriteriellen Regelung das Ergebnis eines Vergleichs zwischen der momentanen Speicherkapazität $Q_{PS,Kapazität}$ mit der gewählten

Grenzkapazität $Q_{PS,Kapazität,Grenz}$ multipliziert mit der elektrischen Konstante $P_{KWK,Steilheit}$. Der Vergleich legt fest, ob sich der Speicher in einem kritischen oder unkritischen Zustand befindet und die Konstante gibt dem Speicherzustand einen elektrischen Wert. Unterhalb der Grenzkapazität hat die Störgröße einen linearen Verlauf und wird Null sobald die nutzbare Speicherkapazität ausreichend ist.

$$P_{KWK,Störgröße,Kapazität} = P_{KWK,Steilheit} \cdot \left(\frac{Q_{PS,Kapazität}}{Q_{PS,Kapazität,Grenz}} - 1 \right) \quad (30)$$

für alle $Q_{PS,Kapazität} \leq Q_{PS,Kapazität,Grenz}$

Diesem Verlauf folgend legt die gewählte Steilheit $P_{KWK,Steilheit}$ den Wert der Differenzleistung für die multikriterielle Regelung fest. Die Konstante beschreibt die Kopplung zwischen Wärme- und Strombedarf. Kleinere Werte führen zu einem weicherem Übergang zwischen der priorisierter Strom- zur nachrangig angepassten Wärmeerzeugung. Eine minimale Steilheit vom negativen Wert der Nennleistung des KWK-Moduls $-P_{KWK,N}$ würde zur Abschaltung des KWK-Moduls führen, wenn der Pufferspeicher vollständig geladen ist.

Treten Regelungseingriffe bei positiver Wärmebilanz auf, ist der Pufferspeicher in einem kritischen Zustand. Die Regelung reduziert die Stromerzeugung (und indirekt die Wärmeerzeugung) mithilfe der negativen Störgröße, so dass es zu temporärem Strombezug kommen kann. Unter der Annahme eines konstanten elektrischen Bedarfs würde ein stetiger Pufferspeicherladevorgang zu einer zunehmend negativen Differenzleistung und somit zu kontinuierlich steigendem Strombezug führen. Ändert sich jedoch der elektrische Bedarf des untersuchten Wohngebäudes bei aktivem Regelungseingriff aufgrund einer kritischen Speicherkapazität, so wird der multikriteriellen Regelung diese Änderung anhand der residualen Last ebenfalls übergeben. Dies kann zu einer weiteren Reduktion der Sollleistung führen. Die Parameter in Gleichung 28 geben Energiebedarfsänderungen direkt an das KWK-Modul weiter. Gleich- oder gegengerichtete Änderungen von Wärme- und Strombedarf können durch die Addition der Differenzleistungen gleichwertig behandelt werden.

Um ein Ausschalten des KWK-Moduls infolge eines vollständig geladenen Pufferspeichers zu verhindern, ist ein frühzeitiges Anpassen der Wärmeerzeugung und damit auch der Stromerzeugung nötig. Erfolgt der Regelungseingriff jedoch verfrüht wird unnötigerweise Strom bezogen. Die Festlegung zwischen einem thermisch kritischen und einem ausgeglichenen Speicherzustand ist speichervolumenabhängig. Kleinere Pufferspeicher haben geringere Grenzkapazitäten sowie eine steilere Abhängigkeit der Störgröße zur thermischen Regelabweichung. Grundsätzlich sollte die Maximierung des Produktionsdeckungsgrades die Steilheit der Störgröße festlegen. Jedoch ist der thermische Freiheitsgrad kleinerer Pufferspeicher wesentlich geringer und resultiert in einer stärkere Ausrichtung der

multikriteriellen Regelung am Wärmebedarf des Gebäudes. Die Sensitivität der multikriteriellen Regelung und der Regelungsparameter gegenüber dem Speichervolumen wird detailliert in **Kapitel 5.4.2** diskutiert.

5.2.3 Berechnung der Störgröße bei negativer Wärmebilanz

Reaktionen der multikriteriellen Regelung auf eine negative Wärmebilanz werden durch die Abhängigkeit eines Speicherentladevorgangs auf die Speicherinhalte hervorgerufen. Ein Regelungseingriff findet statt, wenn eine negative Wärmebilanz zu kritischen Zuständen im Pufferspeicher führt. Die thermische Regelungskaskade besteht im Falle einer negativen Wärmebilanz aus der Rückkopplung der Wärmebilanz und der Speicherinhalte. Der linke Teil von **Abbildung 32** hebt die aktiven Regelungsparameter farblich hervor und zeigt die inaktiven Regelgrößen transparent.

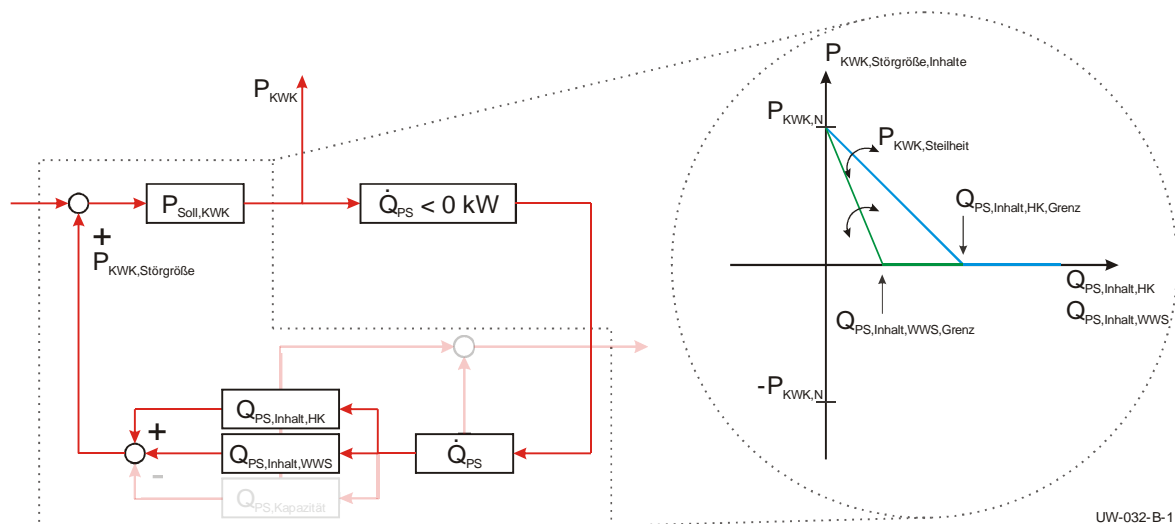


Abbildung 32: Bestimmung der Störgrößen bei negativer Wärmebilanz

Die sich ergebende Störgröße ist im Falle einer negativen Wärmebilanz und eines kritischen Speicherzustands positiv. Der momentanen elektrischen Leistung des KWK-Moduls wird ein Differenzbetrag aufaddiert, um die Wärmeversorgung des Gebäudes zu gewährleisten. Die Differenzleistung setzt sich anteilig aus der Regelabweichung der Heizwärmeversorgung und der Warmwasserversorgung zusammen. Die jeweiligen Störgrößenanteile berechnen sich nach Gleichung 31 und Gleichung 32 und die Verläufe der beiden Größen sind im rechten Teil in **Abbildung 32** skizziert.

Entsprechend dem Regelungsalgorithmus bei positiver Wärmebilanz handelt es sich hier ebenfalls um lineare mathematische Zusammenhänge zwischen den Störgrößenanteilen und dem Speicherzustand. Die experimentellen Ergebnisse der Speicherzustandsbestimmung in **Kapitel 4.7.2** haben gezeigt, dass der Speicherenergieinhalt zur Raumheizung um ein Vielfa-

ches größer ist als der Speicherenergieinhalt zur Warmwasserversorgung. Die niedrigere Bezugstemperatur des Heizkreises erhöht den Speicherinhalt und resultiert in einem wesentlich größeren Grenzinhalt $Q_{PS,Inhalt,HK,Grenz}$. Der Grenzinhalt der Warmwasserversorgung $Q_{PS,Inhalt,WWS,Grenz}$ orientiert sich am Zielenergieinhalt des externen Warmwasserspeichers, der durch die Temperaturvorgaben der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfachs [11] vorgegeben ist.

$$P_{KWK,Störgröße,HK} = P_{KWK,Steilheit} \cdot \left(1 - \frac{Q_{PS,Inhalt,HK}}{Q_{PS,Inhalt,HK,Grenz}} \right) \quad (31)$$

für alle $Q_{PS,Inhalt,HK} \leq Q_{PS,Inhalt,HK,Grenz}$

$$P_{KWK,Störgröße,WWS} = P_{KWK,Steilheit} \cdot \left(1 - \frac{Q_{PS,Inhalt,WWS}}{Q_{PS,Inhalt,WWS,Grenz}} \right) \quad (32)$$

für alle $Q_{PS,Inhalt,WWS} \leq Q_{PS,Inhalt,WWS,Grenz}$

Die Differenzleistungsanteile zur Raumheizung und zur Warmwasserversorgung erhöhen die Wärmeerzeugung des KWK-Modul bis zur Nennleistung. Bleibt bei Erreichen der KWK-Nennleistung der Pufferspeicherzustand kritisch, so wird der Spitzenlastkessel zur Lastspitzendeckung freigegeben. Der Spitzenlastkessel erhält die Wärmebilanz als Sollwert $\dot{Q}_{Soll,SLK} = \dot{Q}_{PS}$ und wird auf diese Weise bedarfsgerecht und in Abhängigkeit des Speicherzustands angesteuert.

Durch die Erhöhung der thermischen Leistung des KWK-Moduls kann es zu temporärer Stromeinspeisung kommen. Der Überschussstrom wird in das Netz eingespeist und vergütet. Eine Änderungen des elektrischen Bedarfs, die durch die Differenzleistung $P_{Residual}$ eine Sollleistung $P_{Soll,KWK}$ oberhalb der berechneten Sollleistung infolge der thermischen Regelabweichung ergibt, führt zu einer zusätzlichen Leistungserhöhung des KWK-Moduls. Die multikriterielle Regelung versucht dem elektrischen Lastgang zu folgen. Wiederum verbindet Gleichung 28 Bedarfsänderungen der thermischen Kaskade und der elektrischen Kaskade mit dem Ziel, die jeweils höchste gültige Sollleistung dem KWK-Modul vorzugeben. Es findet somit eine automatische Bedarfsanpassung der elektrischen Leistung statt, obwohl der eigentliche Regeleingriff durch thermische Größen hervorgerufen worden ist.

Die Steilheit $P_{KWK,Steilheit}$ der Kennlinien ist für alle Störgrößenanteile konstant. Die Gewichtung zwischen gesteuerter Strom- oder Wärmeerzeugung ist durch das Verhältnis des tatsächlichen Speicherzustands zu den Speichergrenzwerten gegeben. Höhere Grenzinhalte haben flachere Störgrößenkennlinien und niedrigere Grenzinhalte rufen stärkere Regelungseingriffe der multikriteriellen Regelung hervor. Wird z. B. der Grenzinhalt der Warmwasserversorgung unterschritten nimmt die Differenzleistung $P_{KWK,Störgröße,WWS}$ schnell größere positive Werte an,

um den zusätzlichen Wärmebedarf einer Warmwasserspeicherladung zu decken und den Komfortbedürfnissen der Gebäudenutzer gerecht zu werden.

5.3 Experimentelle Ergebnisse am Übergangstag – Heiter

Die Prüfstandsumgebung wurde für die Methodik der multikriteriellen Regelung umgebaut. Die Kommunikationsstruktur zwischen den einzelnen Komponenten der Regelstrecke wurde installiert. Die zentrale Kontrolle obliegt dem Prüfstandsrechner. Die Messwerte der Temperaturfühler werden über Messwandler an den Prüfstandsrechner übermittelt und dieser bestimmt den Speicherzustand. Die Berechnungs- und Regelungsmethodik ist im LabVIEW-Programm des Prüfstands implementiert und generiert die regelungstechnischen Parameter anhand des elektrischen Bedarfs und den Speicherzustandsgrößen.

Die berechnete Sollleistung wird dem KWK-Modul über eine RS-232-Schnittstelle vorgegeben. Die Freigabe und die Leistungsvorgabe des Spitzenlastkessels erfolgt über die Vaillant-Schnittstelle mithilfe eines proportionalen analogen Signals. Der KWK-Prüfstand verfügt damit über die elektrische und die thermische Regelungskaskade und ermöglicht hochgenaue experimentelle Untersuchungen der multikriteriellen Regelung.

Die eingestellten Parameter der multikriteriellen Regelung wurden empirisch ermittelt und gehen aus **Tabelle 5** hervor. Sie gewährleisten eine hohe Genauigkeit bei der Speicherzustandsbestimmung und eine hohe Flexibilität der multikriteriellen Regelung.

Tabelle 5: Parameter der multikriteriellen Regelung mit Pufferspeicher 2

Regelungsparameter	Einstellung	
Zeitabstand	$\Delta t = 180 \text{ s}$	
Messstellen	Fühleranzahl:	10
	Fühlerabstand:	20 cm
Wärmebilanz	Bestimmung über den bezogenen Speicherinhalt	
Bezugstemperaturen	Heizkreis:	$T_{\text{HK,VL}} = f(T_A)$
	Warmwasser:	$T_{\text{WWS,VL}} = 62^\circ\text{C}$
	Kapazität:	$T_{\text{WE,VL}} = 70^\circ\text{C}$
Grenzkapazität	Heizkreis:	$Q_{\text{PS,Inhalt,HK}} = 55 \text{ kWh}$
	Warmwasser:	$Q_{\text{PS,Inhalt,WWS}} = 10 \text{ kWh}$
	Kapazität:	$Q_{\text{PS,Kapazität}} = 25 \text{ kWh}$
Steilheit	KWK-Modul:	$P_{\text{KWK,Steilheit}} = 2250 \text{ W}$

Die Analyse der experimentellen Ergebnisse mit Pufferspeicher 2 am *Übergangstag – Heiter* validiert die multikriterielle Regelung und veranschaulicht die Genauigkeit und die Funktionalität des Regelungsalgorithmus. Die experimentellen Messergebnisse werden im Folgenden

graphisch aufbereitet und im ersten Schritt anhand der thermischen Größen und im zweiten Schritt anhand der elektrischen Größen diskutiert. Die Wärmebilanz und die Speicherenergien sind die Basisgrößen der multikriteriellen Regelung. Dementsprechend werden in den folgenden Unterkapiteln zuerst die Regelungseingriffe der äußeren Kaskade und anschließend die Leistungsanpassungen des KWK-Moduls durch die innere Kaskade analysiert. Eine Trennung der experimentellen Ergebnisse ist nicht möglich, so dass Querverweise zwischen den Kapiteln die Analyse vervollständigen.

5.3.1 Analyse der thermischen Größen

Die thermischen Größen der multikriteriellen Regelung mit Pufferspeicher 2 sind in **Abbildung 33** dargestellt. Im Diagramm 1 sind die thermischen Leistungen am *Übergangstag – Heiter* zu sehen. Das Diagramm 2 zeigt den Vergleich der gemessenen mit der berechneten Wärmebilanz über den bezogenen Speicherinhalt und im Diagramm 3 sind die Verläufe der Speicherenergien aufgetragen. Die charakteristischen Regelungseingriffe und die wesentlichen Veränderungen der multikriteriellen Regelung gegenüber der Standardregelung sind im Diagramm 3 an den Verläufen der Speicherenergien nummeriert. Die Analyse der thermischen Größen der multikriteriellen Regelung folgt der Nummerierung für eine schrittweise Erläuterung der entwickelten Regelung.

1. Die Heizkreisvorlauftemperatur ist abgesenkt und der Warmwasserbedarf ist Null. Der Pufferspeicher 2 wird kontinuierlich mit geringer Leistung geladen. Die Wärmebilanz ist positiv und die Speicherkapazität geht im Laufe des Ladevorgangs gegen Null. Die Störgröße ist negativ und zwingt das KWK-Modul auf Minimallast. Das gespeicherte Wasser hat eine Temperatur gleich der Vorlauftemperatur der Wärmeerzeuger. Bei diesem Speicherzustand ähnelt die multikriterielle Regelung der Standardregelung.
2. Um 06:00 Uhr beginnt der Heiztag und die Bezugstemperatur des Heizungssystems springt auf den Sollwert des Tagbetriebs. Die Wärmebilanz ist deutlich negativ. Das KWK-Modul startet und die multikriterielle Regelung folgt dem elektrischen Lastgang (siehe Abbildung 34). Der Produktionsdeckungsrad wird maximiert, eine temporäre thermische Unterversorgung wird aufgrund der ausreichenden Speicherinhalte zugelassen. Im Vergleich zur Standardregelung wird kein Strom eingespeist und es findet kein verzögerter Start des KWK-Moduls statt.
3. Um 07:00 Uhr ist der Pufferspeicher 2 so weit entladen, dass der kritische Bereich der Speicherinhalte erreicht ist. Die Störgröße ist deutlich positiv und das KWK-Modul erhöht die thermische Leistung bis zur Nennleistung. Die Ladung des Warmwasserspeichers erfordert zusätzliche thermische Energie. Der Grenzinhalt zur Warmwasserversorgung wird erheblich unterschritten. Der Spitzenlastkessel wird freigegeben

und gleicht die verbleibende negative Wärmebilanz aus. Der Spitzenlastkessel wird anteilig weniger eingesetzt als bei der Standardregelung.

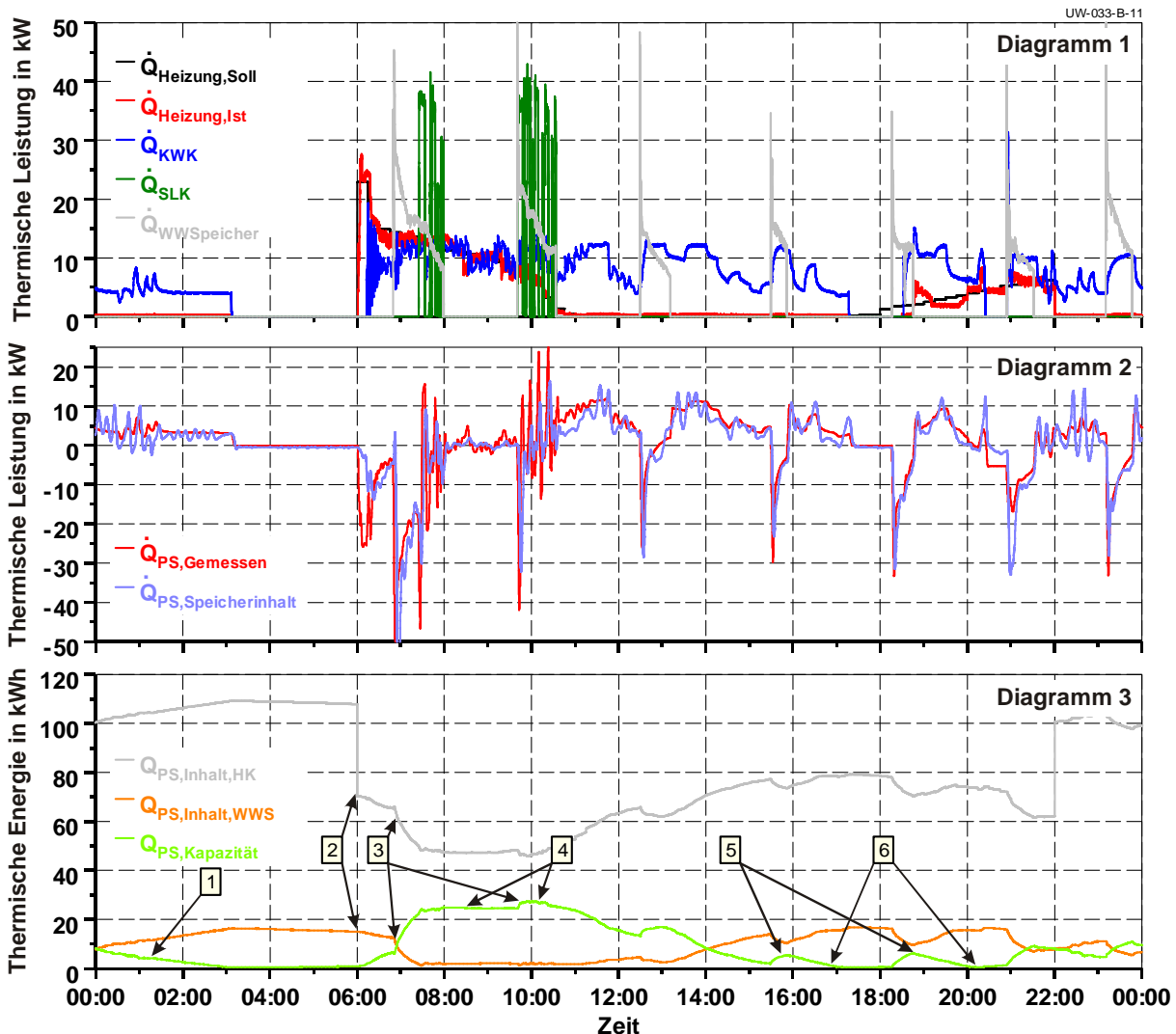


Abbildung 33: Thermische Größen der multikriteriellen Regelung

4. Zu den Zeitpunkten 4 ist die Wärmebilanz ausgeglichen und der Pufferspeicher befindet sich in keinem kritischen Zustand. Die multikriterielle Regelung steuert das KWK-Modul nach dem elektrischen Lastgang und die residuale Last wird minimal (siehe Abbildung 34). Im gleichen Fall würde die Standardregelung die vorhandene Speicherkapazität nutzen und eine thermische Überproduktion erzwingen, die den Pufferspeicher lädt. Dieser Regelungseingriff kann bei Kenntnis des Speicherzustands und der Wärmebilanz ausgeschlossen werden und führt zur Maximierung des Produktionsdeckungsgrades.
5. Der Pufferspeicher 2 wird in den nachmittäglichen Stunden geladen. Die Speicherkapazität ist regelmäßig im kritischen Bereich und reduziert die Wärmeerzeugung um

den Betrag der Differenzleistung der Störgröße, damit das KWK-Modul nicht vorzeitig ausschaltet. Die Reduktion der Wärmeerzeugung verlängert die KWK-Laufzeit, vergleichbar mit der Standardregelung, wobei die multikriterielle Regelung die Leistungsreduzierung unter Berücksichtigung des elektrischen Lastgangs durchführt. Elektrische Lastspitzen werden detektiert und durch das KWK-Modul abgefahren (siehe Abbildung 34).

6. Die Speicherkapazität von Pufferspeicher 2 ist Null, das KWK-Modul muss herunterfahren. Strom wird aus dem Netz bezogen. Das Peak-Shaving-Verhalten der multikriteriellen Regelung führt am Abend zu einem vollständig geladenen Speicher. Regelungsparameteranpassungen könnten die gezielte Stromerzeugung bei Lastspitzen reduzieren, um die KWK-Laufzeit bei thermischer Überproduktion zu verlängern.

Die Analyse der thermischen Größen zeigt, dass die entwickelte Regelung den Wärmebedarf problemlos deckt und zu einer höheren Auslastung des KWK-Moduls führt. Der Spitzenlastkessel wird selten und gezielt eingesetzt. Damit wird gewährleistet, dass der Pufferspeicher 2 dem KWK-Modul zur Strombedarfsdeckung zur Verfügung steht.

5.3.2 Analyse der elektrischen Größen

Durch eine Analyse der elektrischen Größen können die multikriteriellen Regelungseingriffe infolge des Speicherzustands weiter spezifiziert werden. Die Einflüsse der äußeren Regelungskaskade werden durch die Einflüsse der inneren Regelungskaskade ergänzt. Insbesondere einzelne Zeitabschnitte gezielter Stromerzeugung am *Übergangstag – Heiter* erlauben genaue Aussagen zu den Eingriffen der multikriteriellen Regelung. Die experimentellen Ergebnisse sind in **Abbildung 34** dargestellt und im Diagramm 1 sind zu Vergleichszwecken die thermischen Leistungen über der Uhrzeit aufgetragen.

Das Diagramm 2 zeigt die elektrische Last und die Stromerzeugung und Diagramm 3 vergleicht die residuale Last des untersuchten Mehrfamilienhauses mit multikriterieller Regelung und mit Standardregelung. Die Sollleistungsanpassungen des KWK-Moduls durch die multikriterielle Regelung werden über die nummerierten Zeitpunkte aus Abbildung 33, die ebenfalls im Diagramm 2 in Abbildung 34 gekennzeichnet sind, separat diskutiert.

1. Während der Nachtabsenkung läuft das KWK-Modul bei Minimallast, um die verbleibende Speicherkapazität des Pufferspeichers 2 zur Laufzeitverlängerung und zur Eigenstromerzeugung zu nutzen. Berechnet die Wärmebilanzbestimmung einen Wert nahe Null, dann erscheint die Restkapazität für die multikriterielle Regelung ausreichend, um die Stromerzeugung dem Lastgang anzupassen. Drei kurze Zeitpunkte einer erhöhten Stromerzeugung zwischen 00:45 Uhr und 01:30 Uhr zeugen davon,

dass die Wärmebilanz ungenau bestimmt (siehe Abbildung 33) und eine zu hohe Sollleistung für das KWK-Modul berechnet wurde.

2. Am Beginn des Heztages startet das KWK-Modul und minimiert die residuale Last. Die Stromerzeugung und die elektrische Last sind bis 07:00 Uhr näherungsweise deckungsgleich. Das multikriteriell geregelte KWK-Modul folgt dem elektrischen Bedarf zur Minimierung der residualen Last des Mehrfamilienhauses. Die Speicherzustandsbestimmung ermöglicht diesen Betrieb. Im Vergleich dazu würde das KWK-Modul mit Standardregelung im selben Zeitraum elektrische Energie einspeisen. Um 07:00 Uhr sind die Speicherinhalte nicht mehr ausreichend, um die thermische Last zu decken und der Pufferspeicherzustand ist kritisch.
3. Die multikriterielle Regelung zwingt das KWK-Modul bei kritischem Speicherzustand und hoher thermischer Last mithilfe der Störgröße zur Erhöhung der Wärmeerzeugung (siehe Abbildung 33). Der Überschussstrom wird ins Netz eingespeist und die residuale Last ist negativ. Die Zeitpunkte 3 sind durch Warmwasserspeicherladungen und Spitzenlastkesselseinsatz gekennzeichnet, die zwischenzeitlich zu einer ausgeglichenen Wärmebilanz führen und daher zu mehrmaliger, kurzer Leistungsabsenkung des KWK-Moduls, um den Produktionsdeckungsgrad zu maximieren.
4. Die Speicherzustände lassen um 08:30 Uhr für ca. eine Stunde und ab 10:30 Uhr (Zeitpunkte 4) einen gesteuerten KWK-Einsatz zur Maximierung des Produktionsdeckungsgrades zu. Auf jede Lastdynamik des Gebäudes wird augenblicklich reagiert. Die residuale Last ist zu diesen Zeitpunkten minimal. Ab 11:15 Uhr wird der Strombedarf größer als die elektrische Nennleistung des KWK-Moduls und das Gebäude bezieht elektrische Energie. Durch die Maximierung des Produktionsdeckungsgrades bei positiver Wärmebilanz wird der Pufferspeicher 2 geladen. Ab 11:45 Uhr wird regelmäßig der kritische Zustand der Speicherkapazität erreicht und die multikriterielle Regelung erzwingt eine Absenkung der Wärmeerzeugung durch eine negative Störgröße.
5. Die verbleibende Speicherkapazität erlaubt Lastspitzenreduktionen, insbesondere in Zeiten von Warmwasserspeicherladungen. Die multikriterielle Regelung setzt die verbleibende Speicherkapazität strombedarfsorientiert ein, um den residualen Lastgang des Gebäudes zu begrenzen und den Strombezug zu minimieren.
6. Die Speicherzustände um 17:15 Uhr und um 20:15 Uhr resultieren in Abschaltungen des KWK-Moduls. Der gesamte elektrische Bedarf wird aus dem Netz gezogen. Insbesondere die zweite Abschaltung um 20:15 Uhr könnte durch eine veränderte Rege-

lungsparemeterwahl verhindert werden, hätte jedoch voraussichtlich eine Strombezugsspitze zwischen 19:15 Uhr und 19:30 Uhr zur Folge.

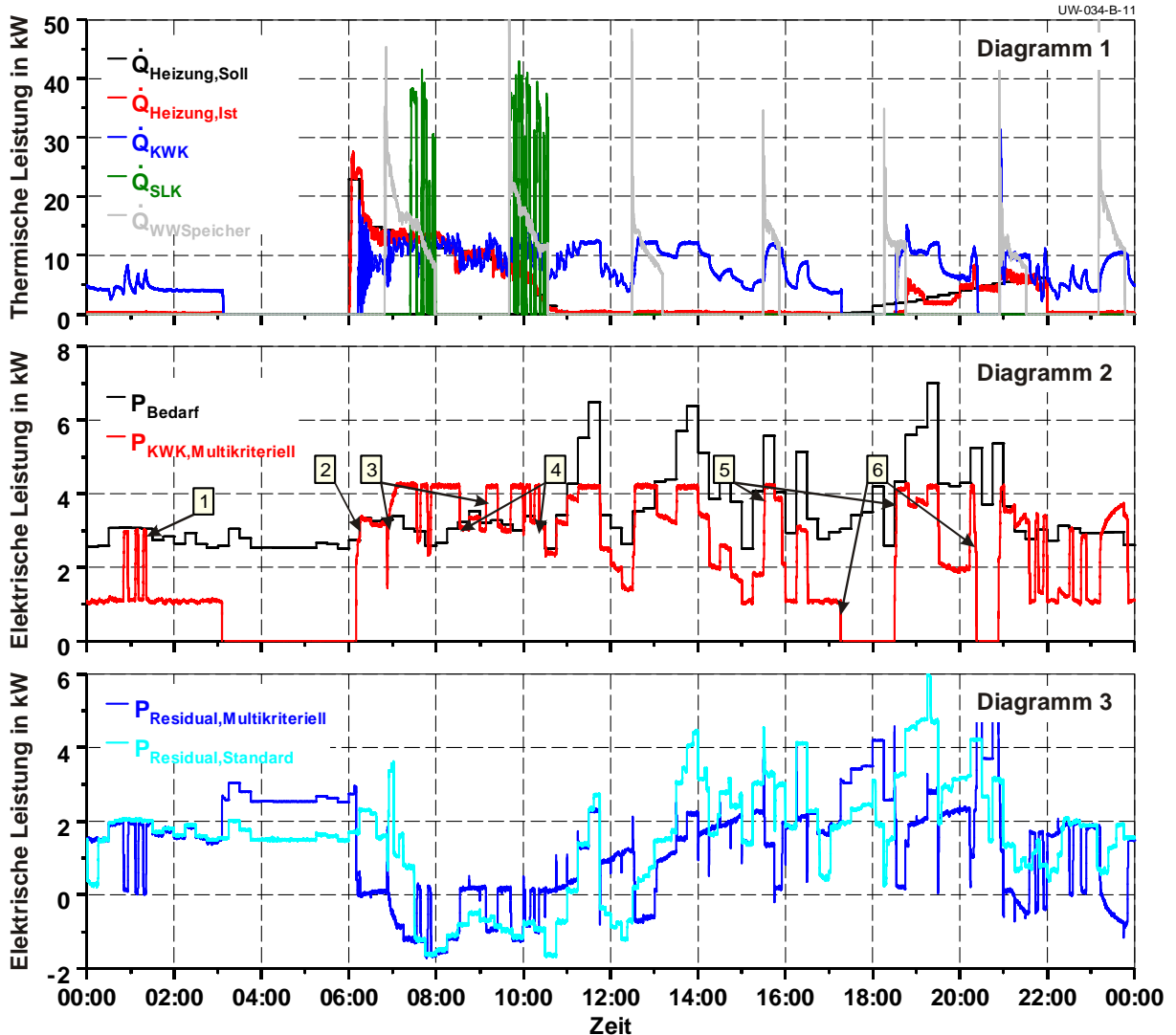


Abbildung 34: Elektrische Größen der multikriteriellen Regelung und der Standardregelung

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass die multikriterielle Kaskadenregelung gleichzeitig die Wärmeerzeugung und die Stromerzeugung des KWK-Moduls optimiert. Die thermischen Auswirkungen der Maximierung des Produktionsdeckungsgrades werden stetig über die Speicherzustandsbestimmung bewertet. Die doppelte Rückkopplung von elektrischer und thermischer Regelabweichung führt zu einem KWK-Einsatz in elektrischen Hochlastzeiten. Die Tageslaufzeit am *Übergangstag – Heiter* verkürzt sich gegenüber der Standardregelung um ca. 4,5 h, aber der Produktionsdeckungsgrad steigt und beträgt mit der multikriteriellen Regelung 92,7 %, anstatt 90,7 % mit der Standardregelung. Die generierte Nettostrommenge steigt von 47,1 kWh bei der Standardregelung auf 48,3 kWh bei der multikriteriellen Regelung.

5.4 Sensitivitäten der multikriteriellen Regelung

Die Funktionalität der multikriteriellen Regelung ist durch die experimentellen Untersuchungen am *Übergangstag – Heiter* mit Pufferspeicher 2 belegt. Die Ergebnisse der Prüfstandsversuche zeigen, dass die empirisch ermittelten Regelungsparameter für Pufferspeicher 2 zweckmäßig sind. Das KWK-Modul und der Pufferspeicher werden gesteuert eingesetzt, der Produktionsdeckungsgrad wird bei gleichzeitiger Deckung des Wärmebedarfs maximiert. Die ausgewählten Regelungsparameter sind jedoch nicht allgemeingültig, sondern abhängig von den Einsatzbedingungen Heizkreisvorlauftemperatur, Pufferspeichervolumen und Pufferspeichertyp (Schichtungseigenschaften). Diese Bedingungen beeinflussen die multikriterielle Regelung durch die Änderung der Speicherkapazität und der Speicherinhalte. D. h. das Heizungssystem mit den installierten Komponenten, sowie die Konfiguration der Heizungssteuerung, sind bei der Regelungsparameterwahl zu berücksichtigen.

Die einzelnen Sensitivitäten der multikriteriellen Regelung gegenüber den genannten Einsatzbedingungen sind unterschiedlich stark ausgeprägt und werden daher separat untersucht. Basierend auf dem *Übergangstag – Heiter* wird eine der genannten Größe variiert, um über eine vergleichende Analyse die Sensitivität dieser Größe zu bewerten. Die Vergleiche erfolgen mittels der Ergebnisse der Speicherinhalte zur Raumheizung und zur Warmwasserversorgung und der Verläufe der Wärme- und Stromerzeugung des KWK-Moduls. Die experimentellen Ergebnisse werden in zweigeteilten Abbildungen graphisch dargestellt. Im oberen Diagramm werden jeweils die Speicherinhalte und im unteren Diagramm die Verläufe der Energien des KWK-Moduls verglichen. Die Analyse zeigt die nötigen Regelungsparameteranpassungen für die einzelnen Einsatzbedingungen auf und ermöglicht damit die Übertragbarkeit der multikriteriellen Regelung auf verschiedenartige und unterschiedlich konfigurierte Heizungssysteme.

5.4.1 Einfluss der Heizkreisvorlauftemperatur

Der Heizkreisvorlauftemperatursollwert $T_{HK,VL,Soll}$ ändert sich zeitlich und außentemperaturabhängig. Die zeitliche Änderung ergibt sich aus dem Wechsel zwischen Tag- und Nachtbetrieb. Im Nachtbetrieb ist die Vorlauftemperatur zwischen 22:00 Uhr und 06:00 Uhr des Folgetages abgesenkt. Dies führt zu einem Abschalten der Heizung und zu einem Auskühlen des Mehrfamilienhauses. Im Tagbetrieb ist der Heizkreisvorlauftemperatursollwert außentemperaturabhängig und wird durch eine lineare Heizkurve festgelegt. Die übliche Einstellung der Heizkreissteuerung passt den Sollwert der Heizkreisvorlauftemperatur zwischen 35°C bei einer Außentemperatur von 15°C und 55°C bei einer Außentemperatur von -15°C

linear der Außentemperatur an. Der Vorlauftemperatursollwert bleibt konstant für Außentemperaturen ober- und unterhalb der Grenzwerte. Für die Untersuchung der Sensitivität der multikriteriellen Regelung gegenüber der Heizkreisvorlauftemperatur wird der Heizkurve im Tagbetrieb eine Konstante von 10 K aufaddiert. Der Sollwert der Heizkreisvorlauftemperatur im Tagbetrieb beträgt demnach minimal 45°C und maximal 65°C und wird dazwischen mit einer Steigung von 2 K/3°C in Abhängigkeit der Außentemperatur angepasst.

Die Ergebnisse der vergleichenden Analyse zur Heizkreisvorlauftemperatur sind in **Abbildung 35** dargestellt. Die experimentellen Untersuchungen sind mit Pufferspeicher 2 am *Übergangstag – Heiter* durchgeführt worden.

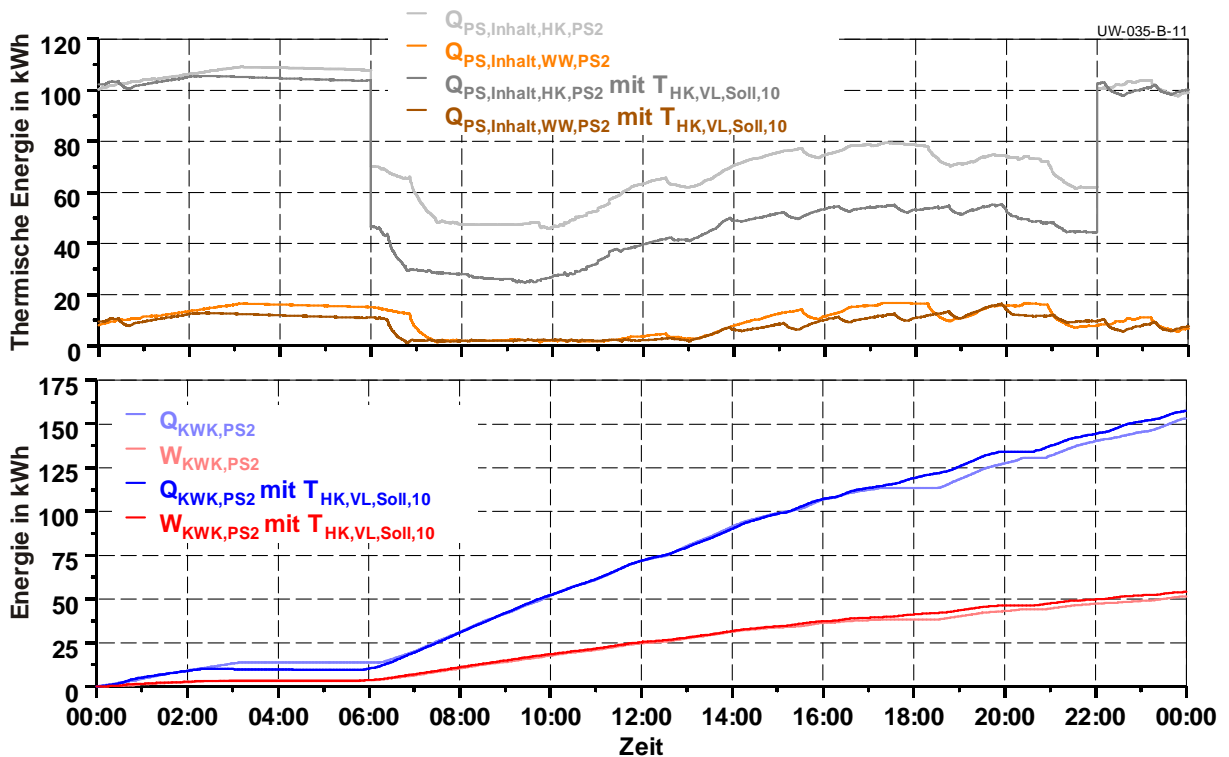


Abbildung 35: Einfluss der Heizkreisvorlauftemperatur

Die Speicherinhalte zur Warmwasserversorgung $Q_{PS,Inhalt,WW}$ sind unabhängig vom Heizkreisvorlauftemperatursollwert und daher weitestgehend deckungsgleich, wohingegen die Speicherinhalte zur Raumheizung deutlich unterschiedliche Verläufe zeigen. Im Tagbetrieb zeigt der Speicherinhalt zur Raumheizung $Q_{PS,Inhalt,HK,PS2}$ mit erhöhtem Sollwert $T_{HK,VL,Soll,10}$ wesentlich geringere Speicherinhalte. Die nutzbare Temperaturdifferenz ist 10 K geringer und dies führt nach Gleichung 19 zu geringeren Speicherinhalten zur Raumheizung. Der Vergleich der thermischen Energien $Q_{KWK,PS2}$ und elektrischen Energien $W_{KWK,PS2}$ des KWK-Moduls zeigt jedoch, dass die Auswirkungen des reduzierten Speicherinhalts zur Raumheizung im Falle einer Sollwertanhebung von 10 K vernachlässigbar sind. Der Speicherinhalt zur Raumheizung mit erhöhter Heizkreisvorlauftemperatur bewegt sich zwischen 25 kWh_{th} und 55 kWh_{th}.

und ist ausreichend für einen Einsatz der multikriteriellen Regelung. Die Laufzeit und die Laufzeitpunkte des KWK-Modul sind für beide Konfigurationen der Heizkreissteuerung näherungsweise gleich. Darüber hinaus sind die Steigungen der Energieverläufe zeitweise übereinstimmend, d. h. das KWK-Modul läuft in beiden Untersuchungsfällen mit gleicher Leistung.

Die vergleichende Analyse belegt, dass die multikriterielle Regelung mit Pufferspeicher 2 durch Heizkreisvorlauftemperaturen bis 65°C nicht eingeschränkt wird. Somit gelten die Regelungsparameter nach Tabelle 5 in Heizungssystemen mit unterschiedlichen Heizkurven und maximalen Vorlauftemperaturen bis $T_{HK,VL} = 65^{\circ}\text{C}$. Höhere Heizkreisvorlauftemperaturen würden den nutzbaren Speicherinhalt zur Raumheizung weiter verringern und könnten die multikriterielle Regelung durch Speicherinhaltswerte $Q_{PS,Inhalt,HK} < 25 \text{ kWh}_{th}$ einschränken. Einen Hinweis über die resultierenden Einschränkungen der Regelung zeigen die Untersuchungen hinsichtlich des Speichervolumens im folgenden Unterkapitel.

5.4.2 Einfluss des Speichervolumens

Die Veränderung des Speichervolumens ist bereits bei der Dimensionierung und der Auswahl der Pufferspeicher im Kapitel 2.3.2 und Kapitel 2.3.3 analysiert worden. Die Speicherdimensionierung hat gezeigt, dass das Speichervolumen einen signifikanten Einfluss auf das KWK-Modul hat, und dass ein Speichervolumen von 2149,5 l nötig ist, um den Produktionsdeckungsgrad für das untersuchte Mehrfamilienhaus zu maximieren. Die tatsächliche Sensitivität der multikriteriellen Regelung gegenüber dem Speichervolumen wird in diesem Kapitel durch den Vergleich der experimentellen Ergebnisse am *Übergangstag – Heiter* zwischen Pufferspeicher 1 und Pufferspeicher 2 analysiert. Die Regelungsparameter sind für beide Prüfstandsversuche konstant. Sie sind nicht dem Pufferspeicher angepasst, um ausschließlich den Einfluss des Speichervolumens zu bewerten. Die vergleichende Analyse basiert auf den Regelungsparametern für Pufferspeicher 2 aus Tabelle 5. Die experimentellen Ergebnisse sind in **Abbildung 36** dargestellt.

Die Speicherinhalte zur Raumheizung $Q_{PS,Inhalt,HK,PS1}$ und zur Warmwasserversorgung $Q_{PS,Inhalt,WW,PS1}$ von Pufferspeicher 1 sind deutlich geringer als die Speicherinhalte $Q_{PS,Inhalt,HK,PS2}$ und $Q_{PS,Inhalt,WW,PS2}$ von Pufferspeicher 2. Das Speichervolumen von Pufferspeicher 1 resultiert in Speicherinhalten, die die Grenzinhalte für Raumheizung und Warmwasserversorgung kontinuierlich unterschreiten. Der Speicherinhalt zur Raumheizung geht bis auf Werte von 21 kWh_{th} zurück und damit befindet sich Pufferspeicher 1 unter den angenommenen Regelungsparametern kontinuierlich in einem thermisch kritischen Zustand. Diesem Speicherzustand sind die Verläufe der Wärmeerzeugung $Q_{KWK,PS1}$ und der Stromerzeugung $W_{KWK,PS1}$ des KWK-Moduls geschuldet. Der Spitzenlastkessel wird durch die kritischen Zustände von Puf-

Tabelle 6: Parameter der multikriteriellen Regelung mit Pufferspeicher 1

Regelungsparameter	Einstellung	
Zeitabstand	$\Delta t = 180 \text{ s}$	
Messstellen	Fühleranzahl:	10
	Fühlerabstand:	15,5 cm
Wärmebilanz	Bestimmung über den bezogenen Speicherinhalt	
Bezugstemperaturen	Heizkreis:	$T_{\text{HK,VL}} = f(T_A)$
	Warmwasser:	$T_{\text{WWS,VL}} = 62^\circ\text{C}$
	Kapazität:	$T_{\text{WE,VL}} = 70^\circ\text{C}$
Grenzkapazität	Heizkreis:	$Q_{\text{PS,Inhalt,HK}} = 27,5 \text{ kWh}$
	Warmwasser:	$Q_{\text{PS,Inhalt,WWS}} = 2 \text{ kWh}$
	Kapazität:	$Q_{\text{PS,Kapazität}} = 12,5 \text{ kWh}$
Steilheit	KWK-Modul:	$P_{\text{KWK,Steilheit}} = 4500 \text{ W}$

5.4.3 Einfluss des Speichertyps

Der Einfluss des Speichertyps beschränkt sich auf das Speichertemperaturprofil und folglich auf die Genauigkeit, auftretende Speichertemperaturänderungen im Pufferspeicher detektieren zu können. Die Analyse dieser Sensitivität erfolgt durch Vergleiche zwischen den experimentellen Ergebnissen der multikriteriellen Regelung mit Pufferspeicher 2 und mit Pufferspeicher 3 unter Verwendung der Regelungsparameter nach Tabelle 5. Die Pufferspeicher unterscheiden sich lediglich im Speicherverhalten, womit der Einfluss der Schichtungseigenschaften der Pufferspeicher auf die multikriterielle Regelung analysiert werden kann.

Die Darstellung und die Farbgebung der experimentellen Ergebnisse entsprechen den Abbildungen der vorangegangenen Kapitel. **Abbildung 37** zeigt, dass die Speicherinhalte zur Raumheizung und zur Warmwasserversorgung für Pufferspeicher 2, $Q_{\text{PS,Inhalt,HK,PS2}}$ und $Q_{\text{PS,Inhalt,WWS,PS2}}$, und für Pufferspeicher 3, $Q_{\text{PS,Inhalt,HK,PS3}}$ und $Q_{\text{PS,Inhalt,WWS,PS3}}$, keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Die Speicherinhalte werden nicht durch das Schichtungsverhalten beeinflusst.

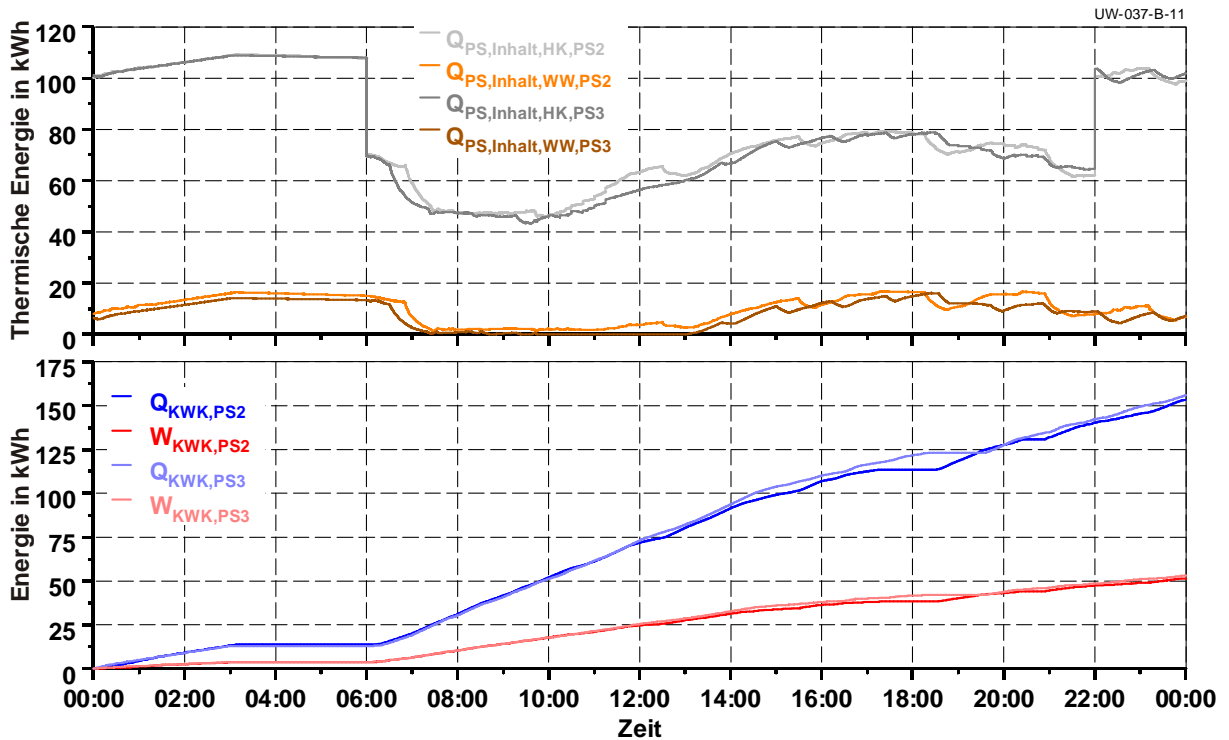


Abbildung 37: Einfluss des Speichertyps

Der Vergleich der Wärme- und Stromerzeugung des KWK-Moduls mit Pufferspeicher 2 und mit Pufferspeicher 3 bestätigt, dass die multikriterielle Regelung unabhängig vom Schichtungsverhalten nahezu identisch funktioniert. Die Verläufe der Energien des KWK-Moduls mit Pufferspeicher 2, $Q_{KWK,PS2}$ und $W_{KWK,PS2}$, und mit Pufferspeicher 3, $Q_{KWK,PS3}$ und $W_{KWK,PS3}$, sind zeitlich übereinstimmend. Die Steigungen der Wärme- und Stromerzeugungsverläufe zeigen, dass Unterschiede im Speicherverhalten keine veränderten Regelungseingriffe hervorrufen. Die Regelung und die Regelungsparameter sind damit auf Speichertypen gleichen Volumens übertragbar. Die Parameter für Pufferspeicher 2 aus Tabelle 5 gelten unverändert auch für Pufferspeicher 3.

Die vergleichende Analyse in Abbildung 37 zeigt, dass ein möglicher Einfluss der Schichtungseinbauten auf die multikriterielle Regelung nicht über die Auswirkungen der Regelungseingriffe beschrieben werden kann. Eine Betrachtung der Regelgrößen zeigt aber, dass die Schichtungseinbauten sehr wohl einen Einfluss auf den Regelungsalgorithmus haben. Die Wärmebilanz hat aufgrund der Berechnung über dem Speichertemperaturverlauf eine direkte Abhängigkeit zum Schichtungsverhalten. Der Vergleich der relativen Häufigkeiten der Wärmebilanzabweichungen (nach Gleichung 25) zwischen Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3 in **Abbildung 38** zeigt, dass die Wärmebilanzbestimmung (über den bezogenen Speicherenergieinhalt) mit Pufferspeicher 3 wesentlich genauer ist als mit Pufferspeicher 2. In 25,9 % der Zeit des *Übergangstag – Heiter* weicht die berechnete Wärmebilanz mit Pufferspeicher 3 nur um $-500 W_{th}$ von der gemessenen Wärmebilanz ab. Die Schichtungseinbau-

ten von Pufferspeicher 3 erzeugen eine stabile und gleichmäßige Temperaturschichtung im Pufferspeicher. Dies hat eine weiche Speichertemperaturkurve mit relativ breiter Mischzone zur Folge. Kleinste Temperaturänderungen werden von einer ausreichend hohen Anzahl an Messfühlern erkannt. Die Schichtungseinbauten verhindern den Effekt der Leistungsschwankungen bei der Wärmebilanzberechnung und bewirken damit die hohe Genauigkeit.

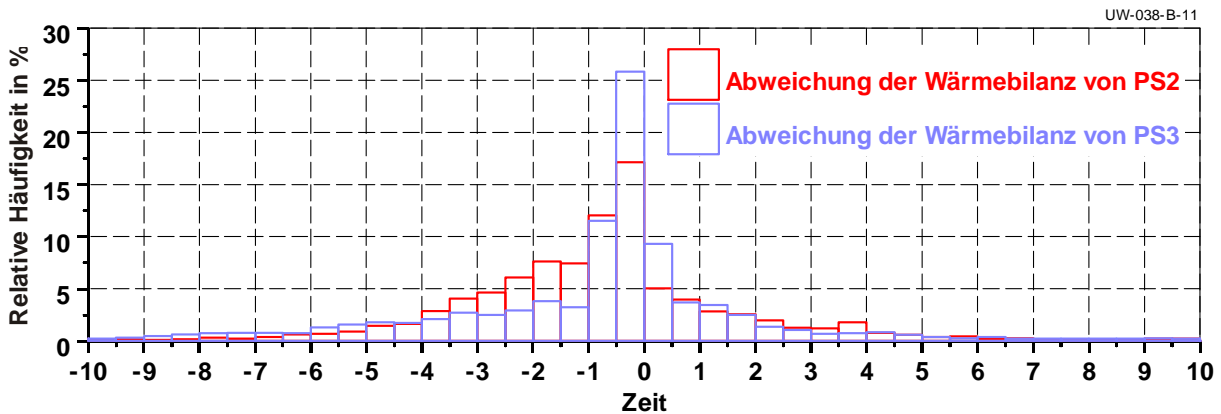


Abbildung 38: Genauigkeit der Wärmebilanzbestimmung mit Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3

6 Energiewirtschaftliche Bewertung der multikriteriellen Regelung

Multikriteriell geregelte KWK-Module verändern die Gebäudeenergieversorgung des untersuchten Mehrfamilienhauses. Diese Veränderungen haben energiewirtschaftliche Auswirkungen, die anhand von Tages- und Jahresendenergiebilanzen sowie Tages- und Jahresenergiekosten bewertet werden. Der erste Bewertungsschritt bereitet die experimentellen Prüfstandsergebnisse als Tages- und Jahresendenergiebilanzen auf. Die Messergebnisse der Typtage werden um die Prüfstandsverluste bereinigt und zu Tagesendenergiebilanzen kumuliert. Darauf aufbauend können die Tagesendenergiebilanzen mithilfe der theoretischen und simulatorischen Vorarbeiten zum Gebäudeenergiebedarf auf Jahresendenergiebilanzen hochgerechnet werden. Die Tages- und die Jahresendenergiebilanzen bilden die Datengrundlage für den zweiten Schritt der energiewirtschaftlichen Bewertung, der Berechnung der Tages- und Jahresenergiekosten über spezifische Energiepreise und Vergütungen.

Die bereinigten und extrapolierten Endenergiebilanzen und die daraus berechneten Energiekosten erlauben Vergleiche zwischen verschiedenen Gebäudeenergieversorgungsvarianten des Mehrfamilienhauses. Als Vergleichsmaßstab der Gebäudeenergieversorgung ist ein Referenzheizungssystem messtechnisch untersucht worden, welches aus einem Netzanschluss für die Stromversorgung sowie der Vaillant ecoTEC exklusiv VC 466 Erdgas-Brennwerttherme aus Kapitel 2.3.1 mit einem Warmwasserspeicher für die Wärmeversorgung besteht. Die Endenergiebilanzen und die Energiekosten des Referenzheizungssystems dienen als Vergleichsbasis für die Heizungssysteme mit KWK-Modul. Die Gebäudeenergieversorgungsvarianten mit KWK-Modul sind Kombinationen der drei Pufferspeicher mit den beiden Regelungen. Die sechs resultierenden Heizungssysteme mit KWK-Modul zeigen die Einflüsse des KWK-Moduls, der Pufferspeicher und der Regelungen auf. Auf diese Weise können die einzelnen Komponenten separat anhand von Endenergiebilanzen und Energiekosten verglichen und diskutiert werden.

Die Regelungen werden mit speicherspezifischer Auslegung untersucht. Die Regelungsparameter für Pufferspeicher 1 sind Tabelle 6 entnommen und die Regelungsparameter für Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3 sind in Tabelle 5 aufgelistet. Die im Folgenden graphisch aufbereiteten Ergebnisse der energiewirtschaftlichen Bewertung der multikriteriellen Regelung sind in Anhang A.3 und in Anhang A.4 in tabellarischer Form dargestellt.

6.1 Tages- und Jahresendenergiebilanzen

Die Quantifizierung der energetischen Auswirkungen der multikriteriellen Regelung auf die Gebäudeenergieversorgung erfolgt über vergleichende Analysen von Endenergiebilanzen. Die Einflussmöglichkeiten der entwickelten Regelung auf die Wärme- und Stromerzeugung des KWK-Moduls sind vom Wärmebedarf abhängig. Folglich vergleicht die energetische Bewertung einerseits die Endenergiebilanzen am *Übergangstag – Heiter* und andererseits die Endenergiebilanzen auf Basis des Testreferenzjahres.

Die Datengrundlage für die Endenergiebilanzen sind die Prüfstandsergebnisse der Typtage. Die Prüfstandsmesstechnik bestimmt kontinuierlich die Energiemengen aller Bilanzkreise. Diese Rohdatensätze der Typtage sind jedoch durch die Wärmeverluste des Prüfstands verfälscht und müssen zur korrekten Bestimmung der Energiebilanzen bereinigt werden. Hierzu werden die mitbilanzierten Prüfstandsverluste von den gemessenen Energiebilanzen subtrahiert. Die bereinigten Energiebilanzen ergeben einen ausgeglichenen Bilanzkreis der Gebäudeenergieversorgung. Dieser beschreibt die Energiemengen von KWK-Modul und Spitzenlastkessel, die den Heizwärme- und den Warmwasserbedarf sowie die Verluste des Pufferspeichers und des Warmwasserspeichers decken.

Mithilfe der bereinigten Datensätze können die Tagesendenergiebilanzen auf Jahresendenergiebilanzen hochgerechnet werden. Die Hochrechnung folgt der Außentemperaturabhängigkeit des Wärmebedarfs. Diese ist im Rahmen der theoretischen Vorarbeiten in Kapitel 2.2.2 in TRNSYS simuliert [40] und mit dem Brauchwarmwasserbedarf ergänzt worden.

Abbildung 39 zeigt die thermischen Energien der Rohdaten, die Prüfstandsverluste, den Wärmebedarfsverlauf mit und ohne Pufferspeicherverluste sowie die extrapolierten Anteile der Wärmeerzeugung von KWK-Modul und Spitzenlastkessel für das Heizungssystem mit Standardregelung und Pufferspeicher 2 und skizziert die einzelnen Verfahrensschritte zur Bestimmung der Jahresendenergiebilanz.

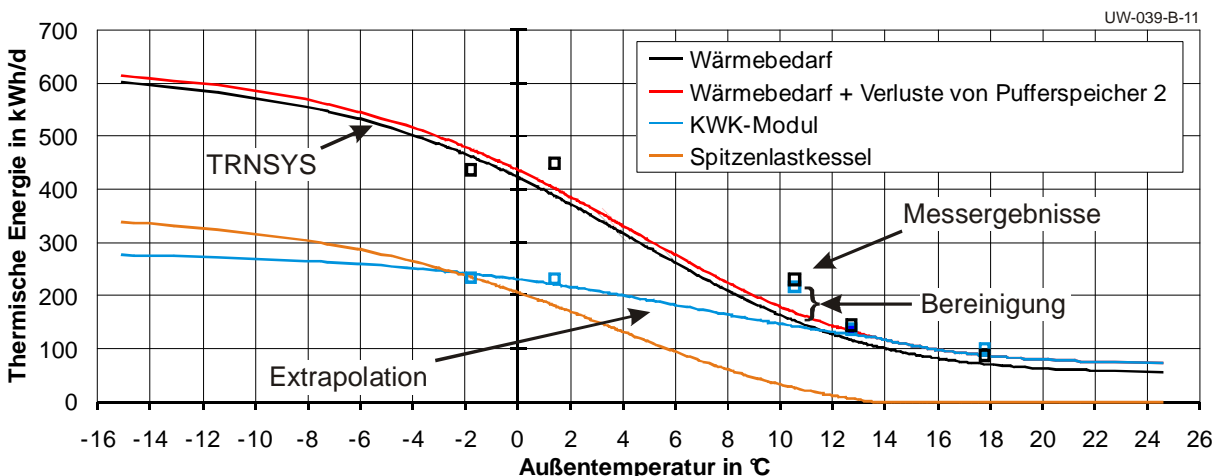


Abbildung 39: Methodik zur Bestimmung der Tages- und Jahresendenergiebilanzen

Die bereinigten Prüfstandsmessungen werden der ursprünglichen Abhängigkeit von Wärmebedarf und Außentemperatur zugeordnet. Die Energiebilanzen der Typtage liegen als Punkte auf der Wärmebedarfskurve. Die Kenntnis des Kurvenverhaltens in den Zwischenbereichen erlaubt eine realitätsnahe Approximation und Hochrechnung der Tagesendenergiebilanzen zum Jahresendenergiebedarf im Testreferenzjahr. Ausführliche Beschreibungen der Bereinigungsverfahren und des Hochrechnungsverfahrens sind in [29] und in [37] zu finden.

6.1.1 Vergleich der Regelungen am *Übergangstag – Heiter*

Die Tagesendenergiebilanzen summieren die Endenergiemengen der Wärme- und Stromversorgung des untersuchten Mehrfamilienhauses am *Übergangstag – Heiter* auf. Vergleichsbasis ist der Endenergiebedarf des Referenzheizungssystems. Dieser setzt sich aus der bezogenen elektrischen Energie und der verbrauchten Erdgasmenge zusammen. Die Tagesendenergiebilanzen der sechs verschiedenen Heizungssysteme mit KWK-Modul sind unterteilt in die Anteile für den Strombezug, die Erdgasmengen von Spitzenlastkessel und KWK-Modul sowie die Stromeinspeisung und Eigenstromnutzung. Die Bilanzanteile für Stromeinspeisung und Eigenstromnutzung werden negativ dargestellt, weil diese Anteile Gewinne erwirtschaften. Die bereinigten Tagesenergiebilanzen der sieben Versorgungsvarianten sind in **Abbildung 40** als Säulendiagramme dargestellt.

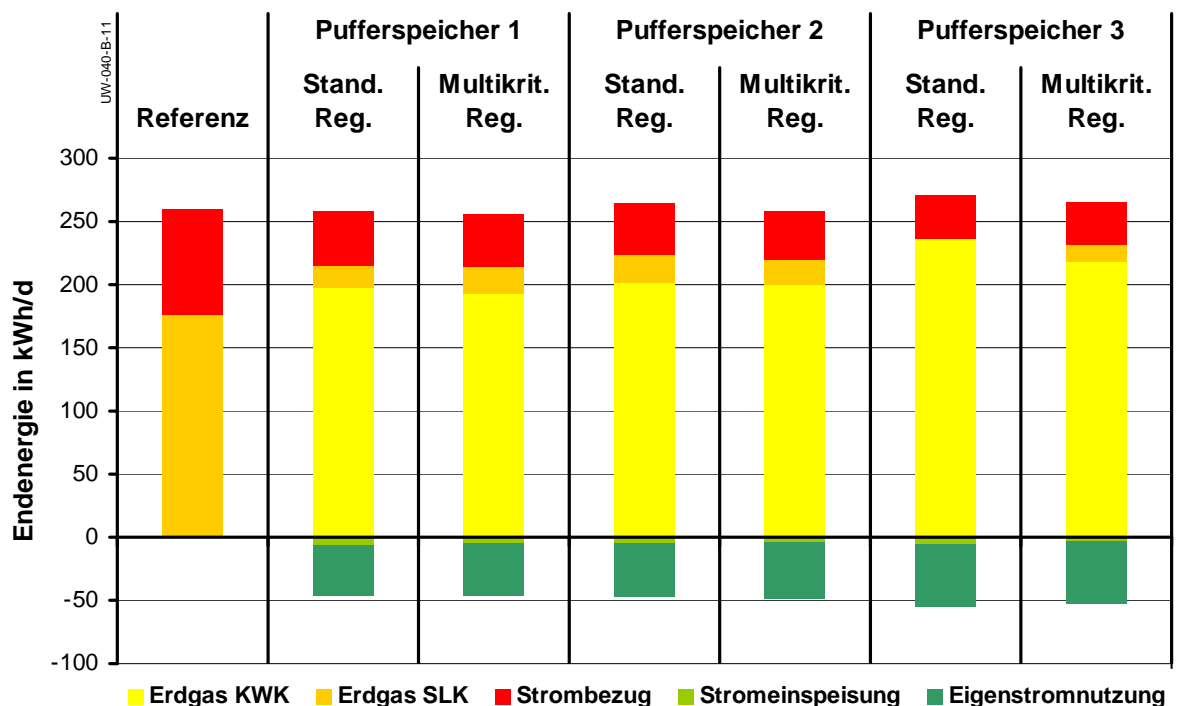


Abbildung 40: Tagesendenergiebilanzen der Gebäudeenergieversorgungsvarianten

Der Vergleich der Tagesendenergiebilanzen zeigt, dass die Summen der bezogenen Endenergien für alle Gebäudeenergieversorgungsvarianten in der gleichen Größenordnung liegen, und dass sich die einzelnen Bilanzanteile durch den Einsatz eines KWK-Moduls verändern. Bezieht das Referenzheizungssystem am *Übergangstag – Heiter* noch 83,4 kWh_{el} elektrische Energie und 176,4 kWh Erdgas, so verändert die Installation eines KWK-Moduls diese Bilanzanteile deutlich. Der Strombezug wird für alle Heizungssysteme mit KWK-Modul mehr als halbiert. Gleichzeitig steigt der Erdgasbezug des untersuchten Mehrfamilienhauses durch das KWK-Modul um bis zu 37 %, weil das KWK-Modul zwischen 85 % und 100 % (bei Pufferspeicher 3 mit Standardregelung) des Wärmebedarfs deckt.

Der Einfluss des KWK-Moduls auf die Tagesendenergiebilanzen wird durch die multikriterielle Regelung verstärkt. Obwohl sich der Erdgasverbrauch der Wärmeerzeuger und die Stromerzeugung des KWK-Moduls für die Standardregelung und für die multikriterielle Regelung lediglich minimal aufgrund der Wärmeverluste von Puffer- und Warmwasserspeicher unterscheiden, zeigen die Tagesendenergiebilanzen der Heizungssysteme mit Pufferspeicher 1 und Pufferspeicher 2, dass der Strombezug des Mehrfamilienhauses bei multikriteriell geregelten KWK-Modulen stärker zurückgeht als bei KWK-Modulen mit Standardregelung. Die multikriterielle Regelung maximiert den Produktionsdeckungsgrad und erzwingt eine zeitliche Verschiebung der Stromerzeugung. Sowohl für Pufferspeicher 1 als auch für Pufferspeicher 2 verändern sich nur die Energiemengen der Bilanzanteile Strombezug, Stromeinspeisung und Eigenstromnutzung. Im Falle von Pufferspeicher 1 steigt der Produktionsdeckungsgrad um drei Prozentpunkte auf 90,0 %. Damit wird der Strombezug um 3,2 % und die Stromeinspeisung um 24,4 % reduziert. Die Eigenstromnutzung wird um 3,3 % gesteigert. Noch deutlicher wird der Einfluss der multikriteriellen Regelung im Heizungssystem mit Pufferspeicher 2. Die zeitliche Verschiebung der Stromerzeugung führt zu einem Produktionsdeckungsgrad von 92,7 %, der aus der Reduktion der Stromeinspeisung und des Strombezugs um 19,1 % bzw. um 5,2 % resultiert. Die Eigenstromnutzung steigt um 5,0 % auf 44,8 kWh_{el}. Das größere Volumen von Pufferspeicher 2 unterstützt somit die multikriterielle Regelung.

Die Tagesendenergiebilanzen des Heizungssystems mit Pufferspeicher 3 beschreiben einen Sonderfall. Das Schichtungsverhalten und die geringsten Wärmeverluste aller Pufferspeicher haben mit der Standardregelung zu einer monovalenten Wärmedeckung geführt. Die Freigabe des Spitzenlastkessels erfolgt bei der Standardregelung über die Unterschreitung eines Sollwerts am Messfühler $T_{SP2,mittle}$. Dieser Sollwert wird durch die weiche Schichtung von Pufferspeicher 3 nicht unterschritten und der Spitzenlastkessel bleibt gesperrt. Die multikriterielle Regelung gibt den Kessel auf Basis der Speicherzustände im gesamten Speichervolumen und nicht aufgrund eines Sollwertes frei. Die Schichtung von Pufferspeicher 3

führt somit zu erheblichen Unterschieden zwischen den Tagesendenergiebilanzen von Standardregelung und multikriterieller Regelung. Das KWK-Modul mit Standardregelung läuft 24 h und zeigt damit die längste Laufzeit aller Energieversorgungsvarianten. Es wird jedoch wärmegeführt geregelt und speist 10,7 % der erzeugten elektrischen Energie ins öffentliche Netz ein. Im Vergleich dazu bedeutet der Einsatz der multikriteriellen Regelung, dass der Spitzenlastkessel eingesetzt und die KWK-Laufzeit um zwei Stunden reduziert wird. Die Regelung orientiert die verbleibende KWK-Laufzeit an der elektrischen Last wodurch die Eigenstromnutzung auf 49,7 kWh_{el} steigt. Die Stromeinspeisung wird mehr als halbiert und es werden lediglich 5,5 % der erzeugten elektrischen Energie eingespeist.

6.1.2 Vergleich der Regelungen im Testreferenzjahr

Die Jahresendenergiebilanzen des Testreferenzjahres sind die Summe der Energiemengen der untersuchten Gebäudeenergieversorgungsvarianten des Mehrfamilienhauses, die mithilfe des beschriebenen Hochrechnungsverfahrens aus den Tagesendenergiebilanzen der fünf Typtage extrapoliert wurden. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 41** dargestellt und wiederum ist das Referenzheizungssystem der Vergleichsmaßstab für die Heizungssysteme mit KWK-Modul. Die Jahresendenergiebilanzen sind in Strombezug, Stromeinspeisung und Eigenstromnutzung sowie den Erdgasbezug beider Wärmeerzeuger unterteilt. Sie zeigen, dass die Installation eines KWK-Moduls die Jahresendenergiebilanz des untersuchten Mehrfamilienhauses signifikant verändert. Das KWK-Modul deckt zwischen 61,1 % (Pufferspeicher 3 und multikriterielle Regelung) und 65,1 % (Pufferspeicher 1 und Standardregelung) des Jahreswärmebedarfs und zwischen 56,6 % (Pufferspeicher 3 und Standardregelung) und 61,5 % (Pufferspeicher 2 und multikriterielle Regelung) des Jahresstrombedarfs. Der Erdgasbezug steigt um bis zu 23 MWh/a (Pufferspeicher 2 und Standardregelung) und der Strombezug geht um bis zu 18,6 MWh_{el}/a zurück (Pufferspeicher 2 und multikriterielle Regelung).

Darüber hinaus ist in **Abbildung 41** zu sehen, dass die multikriterielle Regelung unabhängig vom gewählten Pufferspeicher einen ähnlichen Einfluss auf die Jahresendenergiebilanz hat. Durch die Verwendung der multikriteriellen Regelung werden der Jahresendenergieverbrauch und die Stromeinspeisung verringert. Das KWK-Modul wird insgesamt seltener, dafür aber gezielt für die Eigenstromerzeugung eingesetzt. Die Stromerzeugung des multikriteriell geregelten KWK-Moduls ist zwischen 2,7 % und 6,7 % geringer als die des KWK-Moduls mit Standardregelung, jedoch bei gleichzeitiger Steigerung der Eigenstromnutzung. Die Eigenstromnutzung steigt zwischen 0,3 % bei Pufferspeicher 1 und 4,4 % bei Pufferspeicher 2. Folglich geht die Stromeinspeisung zurück, welche bei wärmegeführten KWK-Anlagen bis zu 10,7 % der erzeugten elektrischen Energie ausmacht. Die Gebäudeenergieversorgungsvari-

anten mit multikriterieller Regelung speisen zwischen 46,4 % (Pufferspeicher 3) und 48,5 % (Pufferspeicher 2) weniger elektrische Energie in das öffentliche Stromnetz ein.

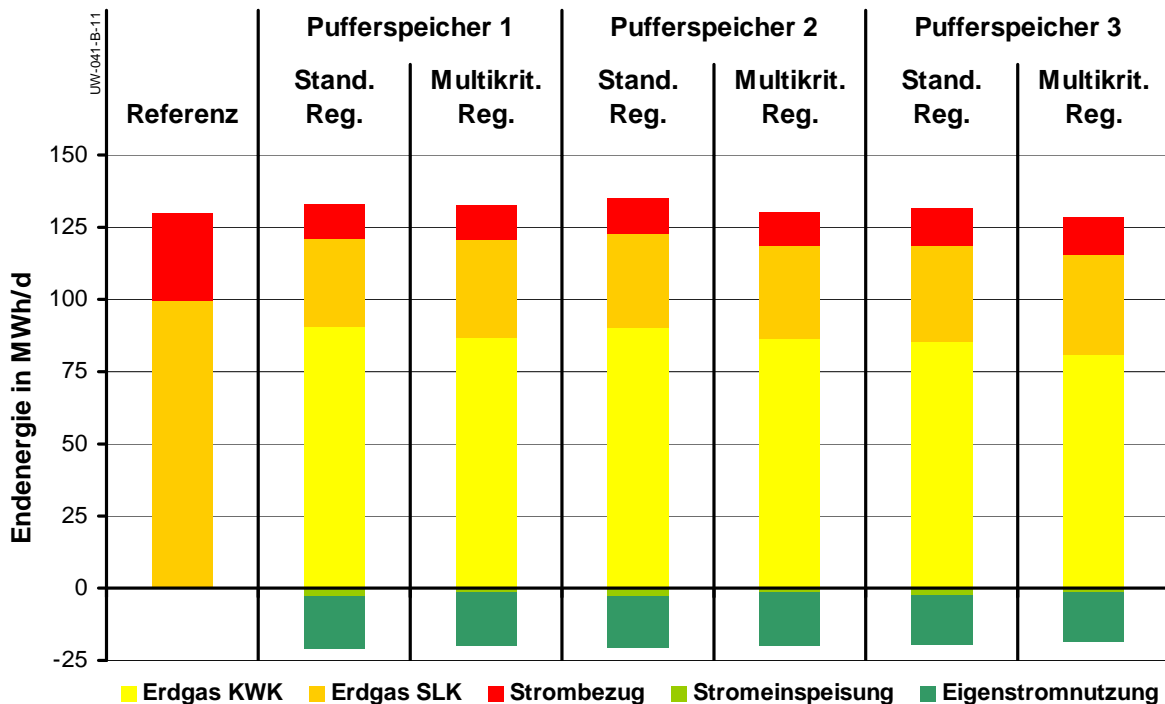


Abbildung 41: Jahresendenergiebilanzen der Gebäudeenergieversorgungsvarianten

Das Mehrfamilienhaus mit KWK-Modul zur Heizungsunterstützung tritt durch die multikriterielle Regelung nicht mehr als ungesteuerter Stromerzeuger im Netz auf, sondern bleibt im wesentlichen ein Verbraucher, jedoch mit verringertem Strombezug und vergleichmäßigtem Bezugsprofil (siehe Kapitel 7). Darüber hinaus zeigen die Endenergiebilanzen, dass die Steuerbarkeit des KWK-Moduls mit dem Speichervolumen zunimmt. Die zweckmäßige Dimensionierung des Heizungssystems ist somit Grundvoraussetzung für die nötige Flexibilität von zukünftigen KWK-Anwendungen in der Gebäudeenergieversorgung.

6.2 Tages- und Jahresenergiekosten

Die Datensätze der Tages- und Jahresendenergiebilanzen erlauben die energiewirtschaftliche Analyse der multikriteriellen Regelung unter Verwendung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen aus Kapitel 2.1.3. Die wirtschaftliche Bewertung basiert auf der Analyse der verbrauchsgebundenen Kosten, jenem Kostenanteil, der durch die Regelung beeinflusst wird. Hierzu werden die einzelnen Bilanzanteile der Tages- und Jahresendenergiebilanzen mit den entsprechenden spezifischen Energiepreisen oder Vergütungen nach Tabelle 2 multipliziert. Wiederum ist das Referenzsystem der Maßstab für die Heizungssysteme mit KWK-Modul

und Pufferspeicher. Die Energiekosten der sieben Energieversorgungsvarianten werden im Folgenden nach den einzelnen Kosten für die Endenergiemengen aufgeschlüsselt und durch eine Säule der Gesamttages- bzw. Gesamtjahresenergiekosten ergänzt. Auf diese Weise können die Einflüsse der multikriteriellen Regelung auf verschiedene Energiekostenanteile diskutiert und gleichzeitig der wirtschaftliche Nutzen der Regelung quantifiziert werden.

6.2.1 Vergleich der Regelungen am *Übergangstag – Heiter*

Die Energiepreisstruktur der Endenergieträger Erdgas und Strom führt zu einer Dominanz der Stromkosten. Obwohl die Tagesendenergiebilanz des Referenzsystems am *Übergangstag – Heiter* einen Erdgasanteil von 67,9 % aufweist, zeigt **Abbildung 42**, dass die Tagesenergiekosten zu 63,5 % von den Stromkosten hervorgerufen werden und in Summe 30,76 €/d betragen. Den Energiekosten der Referenz stehen keine Gewinne gegenüber. Gewinne werden durch das KWK-Modul mit Pufferspeicher erzielt. Sie setzen sich aus dem KWK-Bonus für den erzeugten Strom und dem Baseload-Preis sowie den vermiedenen Netznutzungsentgelten für den eingespeisten Strom zusammen. Darüber hinaus senkt das KWK-Modul die Energiekosten durch Eigenstromerzeugung. Der Strombezug wird deutlich gemindert und in Summe sind die Tagesenergiekosten der Heizungssysteme mit KWK-Modul und Pufferspeicher deutlich niedriger als die Energiekosten des Referenzsystems. Im Falle der Heizungssystemvariante mit Pufferspeicher 3 gehen die Tagesenergiekosten um 39,7 % zurück.

Die energiewirtschaftlichen Auswirkungen der dezentralen Stromerzeugung werden durch die multikriterielle Regelung verstärkt. Die Tagesenergiekosten werden durch die gesteuerte Stromerzeugung bzw. Strombezugsminderung zusätzlich reduziert. Am deutlichsten geht die zeitliche verschobene Stromerzeugung aus den Ergebnissen mit Pufferspeicher 2 hervor. Im Vergleich zur Standardregelung senkt das multikriteriell geregelte KWK-Modul die Tagesenergiekosten mit Pufferspeicher 2 um 3,8 % auf 18,01 €/d und die Stromkosten um 5,2 % auf 9,05 €/d. Die Tagesenergiekostenreduktion mit Pufferspeicher 1 fällt etwas geringer aus, die täglichen Energiekosten gehen um 1,4 % und die Stromkosten um 3,2 % zurück.

Die Ergebnisse der Kostenanalyse von Pufferspeicher 3 zeigen keinen Kostenvorteil durch die multikriterielle Regelung. Der monovalente Betrieb der Standardregelung ist durch die hohe Laufzeit und hohe Stromerzeugung kosteneffizient. Die Tagesenergiekosten der beiden Regelungsvarianten sind nahezu gleich und ergeben sich trotz verkürzter KWK-Laufzeit mit multikriterieller Regelung durch die Verschiebung der Stromerzeugung, weil die verbleibende KWK-Laufzeit kostenoptimal eingesetzt wird.

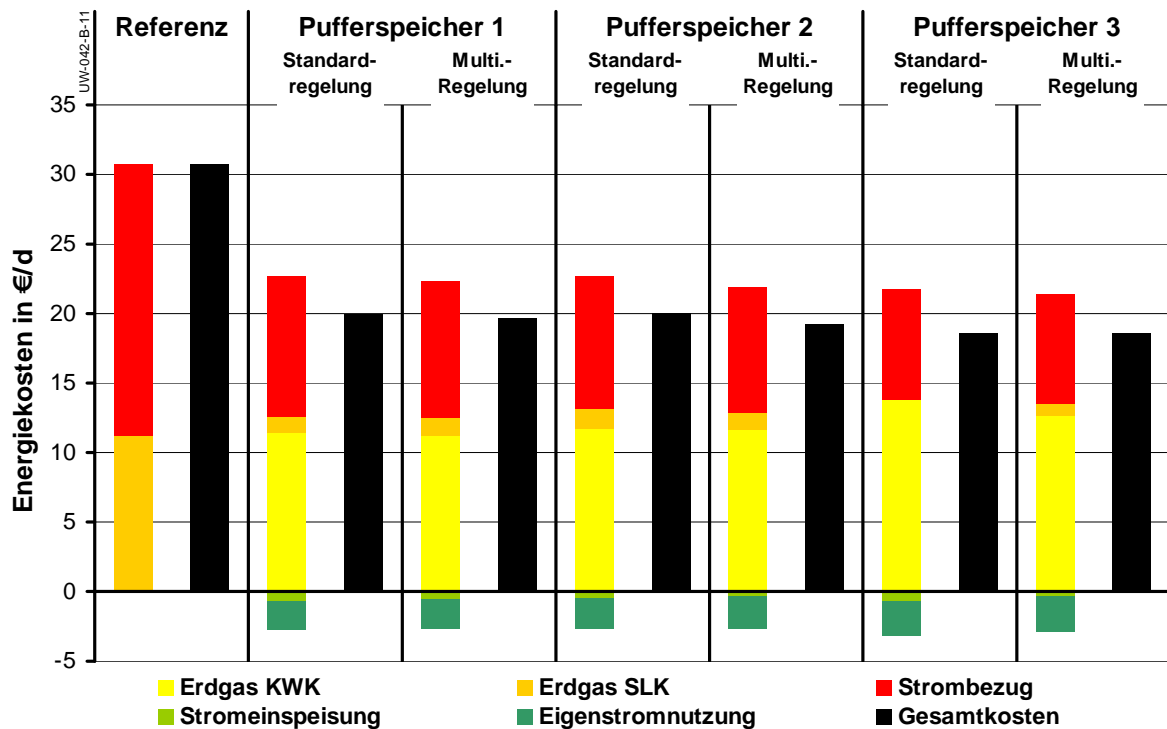


Abbildung 42: Tagesenergiekosten der Regelungen und der Pufferspeicher

Diese Stromkostenreduktionen basieren auf einem Eintariffsystem. Unter der Annahme eines Zweitariffsystems für den Strombezug des Mehrfamilienhauses wird der Kostenreduktionseffekt durch die zeitliche Verschiebung der Stromerzeugung verstärkt. Die multikriterielle Regelung setzt das KWK-Modul bevorzugt in Hochlastzeiten, also in Hochtarifzeiten (zwischen 06:00 Uhr und 21:00 Uhr) ein. Die Stromkosten des Mehrfamilienhauses mit einem Heizungssystem, bestehend aus KWK-Modul, Pufferspeicher 2 und Standardregelung, würden durch ein multikriteriell geregeltes KWK-Modul um 7,7 % gesenkt werden. Die resultierenden Tagesenergiekosten würden in einem Zweitariffsystem um 4,9 % zurückgehen und 17,03 €/d betragen (siehe Anhang A.4).

6.2.2 Vergleich der Regelungen im Testreferenzjahr

Die Jahresenergiekosten sind entsprechend den Tagesenergiekosten als gestapelte Säulen, bestehend aus den Kostenanteilen, sowie als Jahresgesamtenergiekosten in **Abbildung 43** dargestellt. Hieraus wird deutlich, dass die jährlichen Kosten des Referenzheizungssystems lediglich zu 47,2 % durch Stromkosten entstehen. D. h. die Jahresenergiekosten werden zum größeren Teil durch den Wärmebedarf hervorgerufen. Dennoch ist allen Gebäudeenergieversorgungsvarianten mit KWK-Modul gemein, dass die jährlichen Energiekosten durch die Eigenstromerzeugung zurückgehen. Die Kostenreduktion fällt jedoch geringer aus als am *Übergangstag – Heiter*. Könnten die täglichen Energiekosten noch um bis zu 39,7 % redu-

ziert werden, so gehen die jährlichen Energiekosten lediglich bis zu 31,7 % zurück. Das verwendete KWK-Modul ist als Grundlastwärmeerzeuger dimensioniert und somit in der Winterperiode regelungstechnisch limitiert. Die Erdgasbezugskosten des Spitzenlastkessels machen in der Übergangszeit einen Bruchteil der Tagesenergiekosten aus, sind aber für über 20 % der jährlichen Kosten verantwortlich.

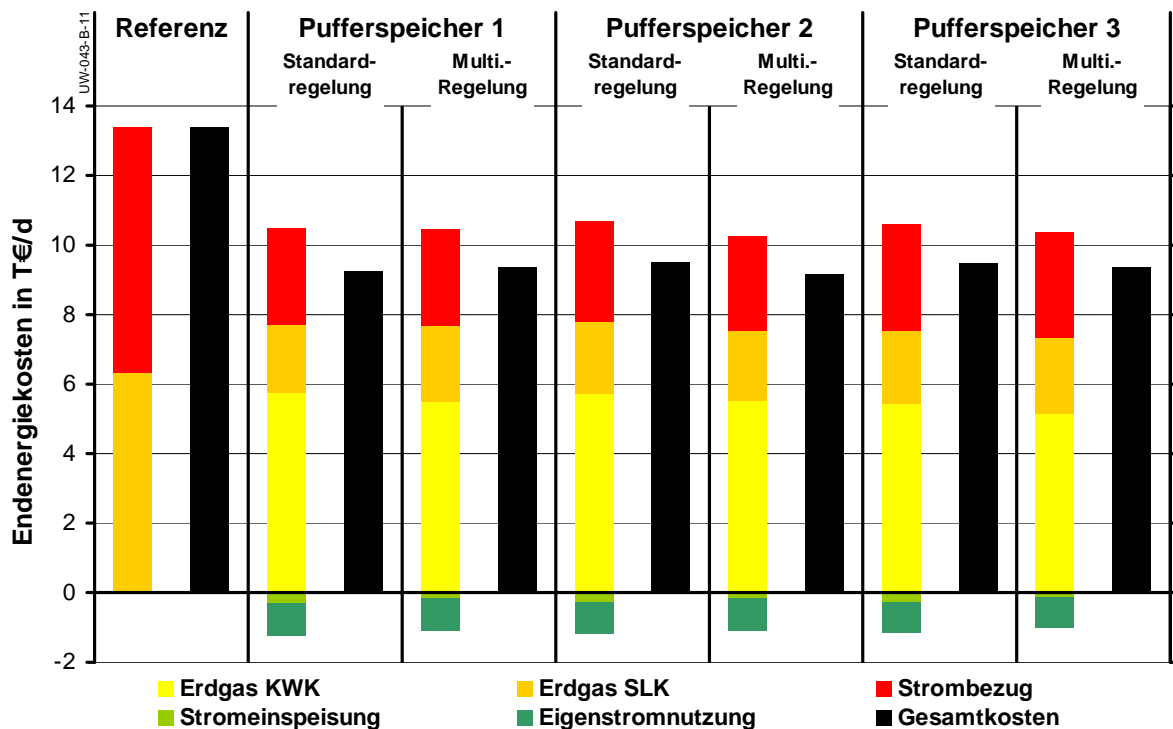


Abbildung 43: Jahresenergiekosten der Regelungen und der Pufferspeicher

Die Limitation des KWK-Moduls wirkt sich ebenfalls auf die multikriterielle Regelung aus. Wintertage sind durch eine KWK-Laufzeit von näherungsweise 24 h und Sommertage durch eine Laufzeit von wenigen Stunden gekennzeichnet, so dass die gezielte und zeitlich verschobene Stromerzeugung in diesen Zeiten nur eingeschränkt möglich ist. Multikriteriell geregelte KWK-Module haben in der Übergangszeit die größten Auswirkungen auf die Energiebilanz sowie die Energiekosten. Der Heizwärmebedarf der Übergangszeit macht jedoch nur ca. ein Viertel des Jahresheizwärmebedarfs aus und damit ist die Übergangszeit auch nur zu einem geringen Anteil an den Jahresenergiekosten beteiligt. Die Ergebnisse in Abbildung 43 bestätigen den relativ kleinen Einfluss der multikriteriellen Regelung auf die Jahresenergiekosten. Im Falle von Pufferspeicher 1 führt die multikriterielle Regelung sogar zu einer Erhöhung der Energiekosten um 1,1 %. Das Speichervolumen von Pufferspeicher 1 limitiert die Regelung bereits in der Übergangszeit und verhindert damit jede Entkopplung von Wärmeerzeugung und -bedarf in den übrigen Jahreszeiten. Die Heizungssystemvarianten mit Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3 zeigen durch die multikriteriellen Regelung Kos-

tenreduktionen von 3,6 % bzw. 1,2 % gegenüber der Standardregelung. Das wesentlich größere Speichervolumen gibt den multikriteriell geregelten KWK-Modulen auch bei hohem Wärmebedarf den nötigen Freiheitsgrad, um die Stromerzeugung an den elektrischen Bedarf anzupassen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Dimensionierung heutiger KWK-Systeme (Pufferspeichervolumen von 1000 l und Deckung von 25 % der thermischen Maximallast) die gesteuerte Stromerzeugung stark limitiert. Zukünftige KWK-Anlagen zur Heizungsunterstützung sollten größer dimensioniert und mit größeren Pufferspeichern ausgerüstet werden. Eine größere Dimensionierung von KWK-Anlage und Pufferspeicher verlängert den jährlichen Zeitraum, indem die Wärmeerzeugung vom -bedarf entkoppelt werden kann. Die jährliche Summe der Vollbenutzungsstunden sollte sich aus der gesteuerten Stromerzeugung ergeben und nicht über den Volllastbetrieb in der Winterzeit.

7 Analyse der Netzurückwirkungen der multikriteriellen Regelung

Die Schnittstellen eines Wohngebäudes zur öffentlichen Energieversorgung können üblicherweise über Verbrauchswerte von Erdgas und elektrischer Energie definiert werden. Die zunehmende Verwendung von KWK-Modulen zur Heizungsunterstützung verändert dieses gängige Verständnis von Wohngebäuden als Energieverbraucher. Die dezentrale Stromerzeugung durch KWK-Module resultiert in komplexeren und dynamischeren Leistungs- und Energieflüssen des Wohngebäudes mit Rückwirkungen auf die Stromversorgung. Leistungsunterschiede zwischen der Erzeugungscharakteristik des KWK-Moduls und dem Lastprofil des Versorgungsobjektes sind möglich und rufen z. B. eine temporäre Lastumkehr hervor. Diese Leistungsdifferenzen entstehen, sobald die Erzeugung und die Last nicht deckungsgleich sind und müssen vom Stromnetz ausgeregelt werden. Sie sind die Basis für die Analyse der Netzurückwirkungen. Je größer die Abweichung zwischen dem elektrischen Bedarf und der Stromerzeugung des KWK-Moduls ist, desto stärker wirkt sie sich auf das Stromnetz aus.

In den folgenden Unterkapiteln wird die Netzurückwirkung der bereits definierten Heizungssystemvarianten mit und ohne KWK-Modul analysiert. Vergleiche zwischen den experimentellen Ergebnissen der Regelungen am *Übergangstag – Heiter* zeigen die Rückwirkungen von KWK-Modulen auf das Stromnetz und beschreiben die Verbesserungen durch die multikriteriellen Regelung.

7.1 Eigenstromerzeugung

Für die Analyse der Netzurückwirkungen gibt die Auswertung der Eigenstromerzeugung erste Hinweise über die Gleichartigkeit von Stromerzeugung und elektrischer Last. Eine gesteuerte Eigenstromerzeugung begrenzt die Leistungsdifferenzen zwischen elektrischer Last und Stromerzeugung, indem der vom KWK-Modul erzeugte Strom im Versorgungsobjekt verbraucht wird. Die Eigenstromerzeugung wird maximal, wenn das Versorgungsobjekt autark ist. In diesem Fall wären die elektrische Last und die Stromerzeugung zu jedem Zeitpunkt gleich.

Die Analyse der Ähnlichkeit der Charakteristiken von Eigenstromerzeugung $P_{Eigenstrom}$ und elektrischer Last P_{Bedarf} des untersuchten Mehrfamilienhauses ist in **Abbildung 44** über sogenannte Boxplots dargestellt. Boxplots setzen sich aus den Größen Maximal- und Minimalwert, Unteres und Oberes Quartil und Median zusammen. Der Maximal- und der Minimalwert geben die gesamte Spannweite der untersuchten Daten an. Die Box wird durch die Quartile begrenzt und umfasst die mittleren 50 % aller Datenwerte. Der Median halbiert die gesamte Datenmenge. Dementsprechend sind 50 % der Datenwerte kleiner und 50 % der Datenwerte größer als der Median.

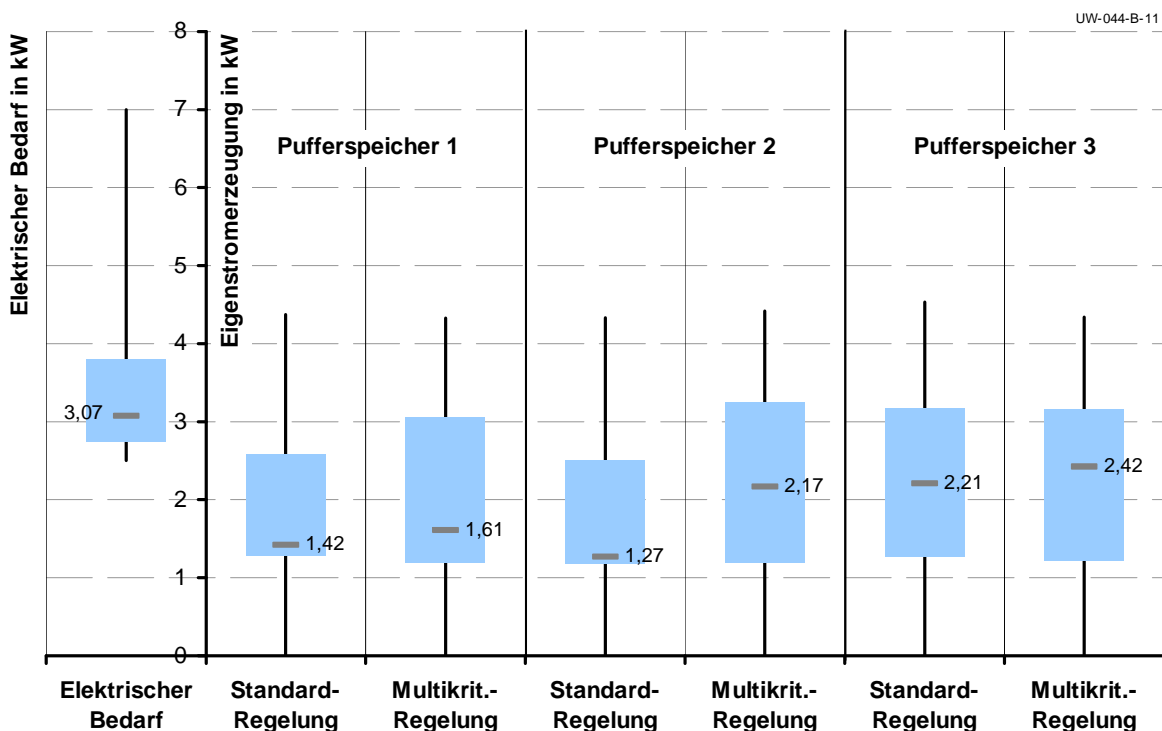


Abbildung 44: Boxplots der Eigenstromerzeugung am Übergangstag – Heiter

Mithilfe der Boxplots können Bereiche und Häufigkeiten komprimiert verglichen und analysiert werden. Die Boxplots in Abbildung 44 vergleichen die Leistungsbereiche und Leistungshäufigkeiten des untersuchten Mehrfamilienhauses mit dem elektrischen Bedarf als Vergleichsmaßstab (links von der Ordinate). Der Boxplot des elektrischen Bedarfs entspricht dem Lastprofil des Referenzheizungssystems im untersuchten Mehrfamilienhaus. Das Gebäude bezieht zu jedem Zeitpunkt elektrische Energie und zeigt das typische Verhalten eines Verbrauchers im Stromnetz. Der geringe Quartilsabstand des Strombedarfs macht deutlich, dass das Mehrfamilienhaus ein relativ gleichmäßiges Bezugsprofil aufweist. Der Maximalwert der residualen Last mit ca. 7 kW_{el} ist ein viertelstündlicher Ausreißer. Die Grundlast beträgt $2,5 \text{ kW}_{el}$.

Die Boxplots der Heizungssysteme mit KWK-Modul und Pufferspeicher befinden sich rechts von der Ordinate und beschreiben die Eigenstromerzeugung dieser Energieversorgungsvarianten. Der Vergleich der Boxplots entspricht der Analyse der Ähnlichkeit von Eigenstromerzeugung und elektrischem Bedarf. Identische Boxplots würden eine autarke Stromversorgung am *Übergangstag – Heiter* kennzeichnen, jedoch ist temporärer Strombezug zwingend nötig, weil die Nennleistung des KWK-Moduls kleiner ist als die maximale elektrische Last. Die Maximalwerte der Boxplots der Eigenstromerzeugung aller Energieversorgungsvarianten sind näherungsweise gleich und zeigen die KWK-Nennleistung von ca. $4,5 \text{ kW}_{\text{el}}$. Darüber hinaus ist der elektrische Bedarf des Mehrfamilienhauses zu jedem Zeitpunkt größer Null. Der Wärmebedarf am *Übergangstag - Heiter* begrenzt die KWK-Laufzeit und es kommt zu Abschaltungen des KWK-Moduls mit allen Pufferspeichern. Der Minimalwert der Eigenstromerzeugung ist folglich Null.

Die vergleichende Analyse der Boxen gibt Aufschluss über die Leistungsbereiche von elektrischem Bedarf und Eigenstromerzeugung der verschiedenen Energieversorgungsvarianten. Das Mehrfamilienhaus hat am *Übergangstag – Heiter* zu 50 % der Zeit einen elektrischen Bedarf zwischen $2,7 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $3,8 \text{ kW}_{\text{el}}$. Der Quartilsabstand ist mit $1,1 \text{ kW}_{\text{el}}$ verhältnismäßig gering. Die Lage des Medians in der Box zeigt an, dass der elektrische Bedarf häufig ca. 3 kW_{el} beträgt. Die Boxen der Energieversorgungsvarianten mit KWK-Modul unterscheiden sich zum Teil deutlich von diesen Werten. Die Eigenstromerzeugung grenzt deutlich kleinere elektrische Leistungen ein und zeigt einen größeren Quartilsabstand. Die thermische Last und die Speicherzustände begrenzen die Eigenstromerzeugung, wobei die Begrenzung des KWK-Moduls von der eingesetzten Regelung abhängig ist. Der Vergleich der Regelungen zeigt, dass KWK-Module mit multikriterieller Regelung höhere Mediane und höhere obere Quartilswerte aufweisen als KWK-Module mit Standardregelung. Multikriteriell geregelte KWK-Module passen die Stromerzeugung dem elektrischen Bedarf an, wodurch sich die Boxen von Eigenstromerzeugung und Strombedarf annähern. Die Erhöhung der Mediane verdeutlicht, dass die multikriterielle Regelung die KWK-Anlagen mit höherer elektrischer Leistung betreibt. Diese Leistungserhöhung wird in **Abbildung 45** exemplarisch für Pufferspeicher 2 durch die Darstellung der relativen Häufigkeiten der Eigenstromerzeugung über der absoluten Eigenstromerzeugung verdeutlicht. **Abbildung 45** setzt sich aus den Häufigkeitsverteilungen der beiden Regelungen mit einer Klassenbreite von $250 \text{ W}_{\text{el}}$ zusammen. Das Säulendiagramm zeigt, dass die Standardregelung dem KWK-Modul in 47,9 % der Zeit die Minimallast $P_{\text{Soll,KWK}} = 1,25 \text{ kW}_{\text{el}}$ vorgibt, weil der Regelung der Speicherzustand nur ungenügend bekannt ist. Die Absenkung der elektrischen Leistung auf den Minimalwert dient lediglich der Verlängerung der KWK-Laufzeit. Diese Betriebsweise gewährleistet in den häu-

figsten Fällen eine Eigenstromerzeugung, weil die elektrische Grundlast größer als die Minimallast des KWK-Modul ist. Dieser Fall gilt auch für das untersuchte Mehrfamilienhaus.

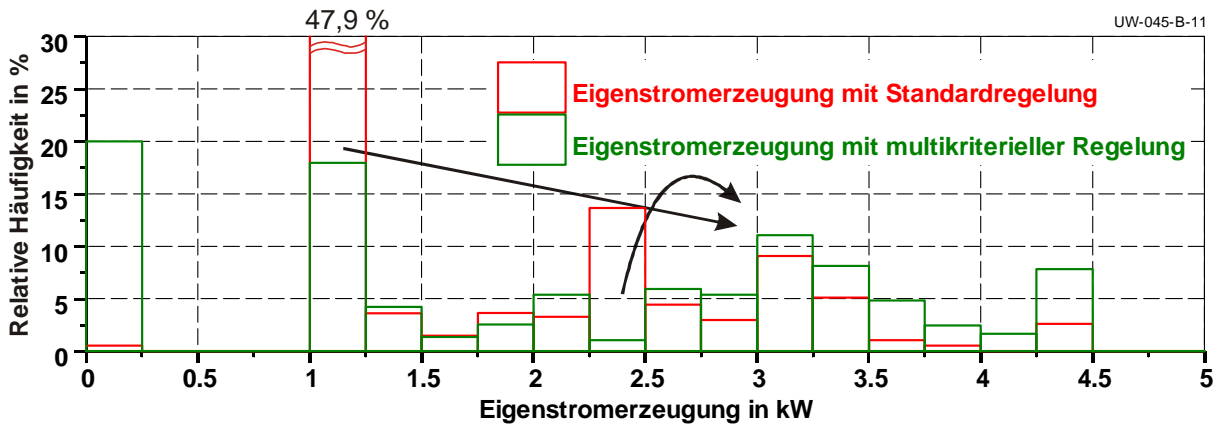


Abbildung 45: Relative Häufigkeit der Eigenstromerzeugung am Übergangstag – Heiter

Die multikriterielle Regelung steuert das KWK-Modul mit Kenntnis des Speicherzustands und setzt es dem elektrischen Lastprofil angepasst ein. Lastspitzen werden gezielt reduziert. Der Betriebspunkt „Minimallast“ wird nur im Falle eines kritischen Pufferspeicherzustands verwendet. Dieser Betriebspunkt tritt regelmäßig auf, wird dem KWK-Modul aber deutlich seltener von der multikriteriellen Regelung vorgegeben. Die Regelung erzwingt höhere elektrische Leistungen des KWK-Moduls. Die relativen Häufigkeiten der Eigenstromerzeugung werden deutlich in Richtung höherer Leistungswerte verschoben. Die Stromerzeugungszeitpunkte mit Pufferspeicher 2 sind trotz energetisch nahezu identischer Prüfstandsuntersuchungen signifikant verschieden. Die multikriterielle Regelung betreibt das KWK-Modul anstatt im Minimallastbetrieb mit Leistungen größer $2,5 \text{ kW}_{el}$. Die Leistungserhöhung führt zu Abschaltungen des KWK-Moduls in elektrischen Schwachlastzeiten (in der Nacht) und resultiert in der Häufigkeitssäule bei $P_{Eigenstrom} = 0 \text{ kW}_{el}$.

7.2 Residuale Last

Die zentrale Größe zur Bewertung und Quantifizierung der Netzurückwirkungen ist die residuale Last des Versorgungsobjektes. Der Restlastgang am Netzanschlusspunkt des Versorgungsobjektes wird über das öffentliche Netz ausgeregelt. Bei positiver residueller Last wird elektrische Energie für die Gebäudeenergieversorgung bereitgestellt. Bei negativer residueller Last nimmt das Netz den Überschussstrom auf. Ein autarkes Versorgungsobjekt würde nicht im Austausch mit dem Stromnetz stehen. Es hätte keine residuale Last und keine Netzurückwirkungen. Autarkie ist mit den hier untersuchten Gebäudeenergieversorgungsvarianten

am *Übergangstag – Heiter* nicht erreichbar. Für die Minimierung der Netzurückwirkungen durch das KWK-Modul ist jedoch eine autarkieähnliche Stromversorgung anzustreben. Je kleiner die elektrischen Leistungen und geringer die Energiemengen sind, die das Versorgungsobjekt mit dem öffentlichen Netz austauscht, desto geringer sind Rückwirkungen und desto seltener werden Ausregelungsvorgänge nötig.

Das Restlastgangprofil der verschiedenen Energieversorgungsvarianten kann wiederum über Boxplots analysiert werden. Mit dieser Darstellungsmethode können Gleichmäßigkeit und Leistung der residualen Last nach Häufigkeiten bewertet werden. **Abbildung 46** zeigt die Boxplots der residualen Last der verschiedenen Gebäudeenergieversorgungsvarianten des untersuchten Mehrfamilienhauses. Hierin sind links von der Ordinate der elektrische Bedarf und rechts die residuale Last der Heizungssysteme mit KWK-Modul, unterteilt nach Pufferspeicher und Regelung, dargestellt.

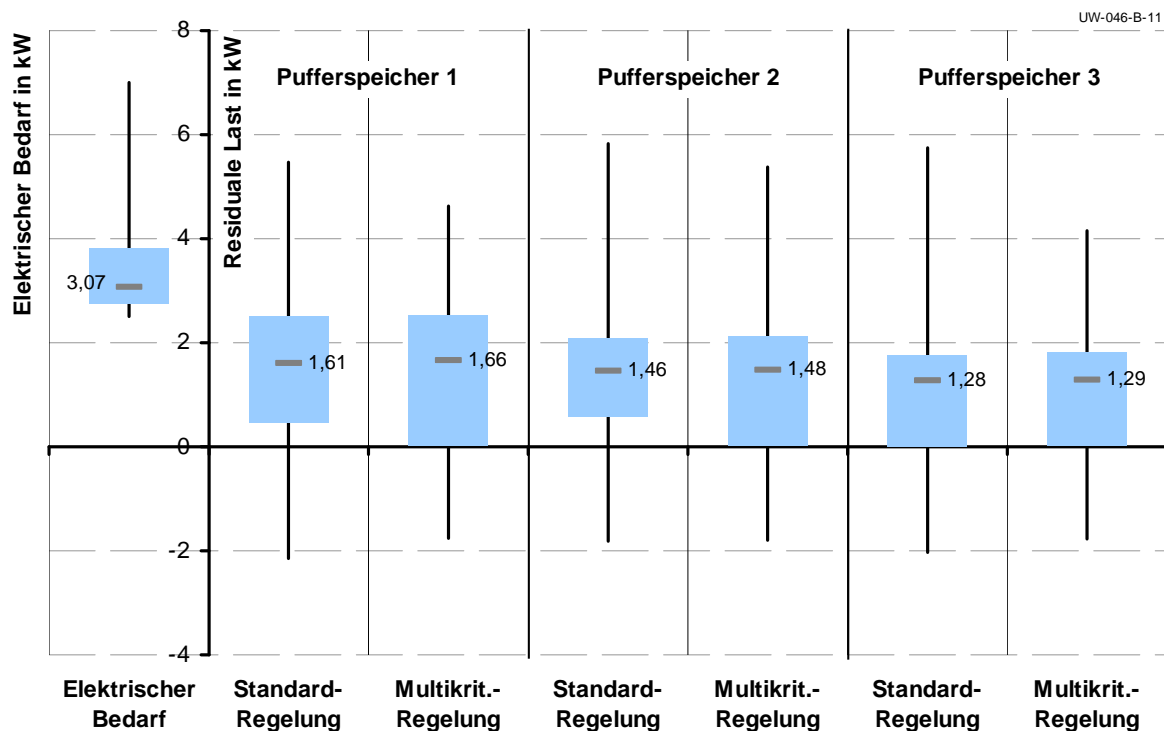


Abbildung 46: Residuale Last am *Übergangstag – Heiter*

Der Boxplot des elektrischen Bedarfs entspricht der residualen Last des untersuchten Mehrfamilienhauses ohne KWK-Modul. Die Boxplots der residualen Lasten der Gebäudeenergieversorgungsvarianten mit KWK-Modul unterscheiden sich deutlich vom Boxplot des elektrischen Bedarfs. Die Eigenstromerzeugung des KWK-Moduls resultiert nach Abbildung 46 in Boxen mit größerem Quartilsabstand, die aber Leistungsbereiche kleiner des elektrischen Bedarfs eingrenzen. Folglich verringert sich der Median und sinkt von ca. 3 kW_{el} auf Werte zwischen ca. $1,7 \text{ kW}_{\text{el}}$ bei Pufferspeicher 1 und ca. $1,3 \text{ kW}_{\text{el}}$ bei Pufferspeicher 3. D. h. die

bezogenen Leistungen des Gebäude gehen durch die Stromerzeugung des KWK-Moduls zurück. Das zeigt sich auch an der Spitzenlast des Mehrfamilienhauses, die für alle Varianten von Pufferspeicher und Regelung reduziert ist. Die Stromerzeugung des KWK-Moduls verringert den mittleren Bezug und den Spitzenbezug, führt aber gleichzeitig zu einer negativen Einspeisespitze.

Das KWK-Modul hat somit erheblichen Einfluss auf die residuale Last des Mehrfamilienhauses, der je nach verwendeter Regelung unterschiedlich ausgeprägt ist. So ist die elektrische Leistung des KWK-Moduls zur Spitzenlastzeit bei der multikriteriellen Regelung höher als bei der Standardregelung. Die Maximalwerte der Boxplots zeigen, dass das KWK-Modul für jede Versorgungsvariante bei maximalem elektrischen Bedarf läuft, aber die Spitzenlastreduktion unterschiedlich ausfällt. Die Standardregelung reduziert die Spitzenlast auf Leistungen zwischen $5,8 \text{ kW}_{el}$ bei Pufferspeicher 2 und $5,5 \text{ kW}_{el}$ bei Pufferspeicher 1. Die Spitzenlast mit multikriterieller Regelung geht bis auf $4,1 \text{ kW}_{el}$ bei Pufferspeicher 3 zurück. Das gleiche Bild zeigt die maximale Einspeiseleistung. Eine Einspeisung von elektrischer Energie tritt bei allen Versorgungsvarianten mit KWK-Modul auf, die Einspeiseleistung wird aber durch die Regelung beeinflusst. Multikriteriell geregelte KWK-Module speisen mit geringerer Leistung ein. Zusammenfassend zeigen die Maximal- und Minimalwerte, dass die multikriterielle Regelung die Spannweite der residualen Last mit allen drei Pufferspeichern verkleinert. Im Falle von Pufferspeicher 3 geht sie um 23,9 % zurück.

Deutlich wird der Unterschied der Regelungen v. a. durch den Vergleich der Boxen der residualen Last. Die multikriterielle Regelung maximiert den Produktionsdeckungsgrad und folgt zeitweise der elektrischen Last. Dieses Regelungsverhalten resultiert in unteren Quartilswerten von $P_{Residual} = 0 \text{ kW}_{el}$. Pufferspeicher 2 zeigt den stärksten Regelungseffekt. Die Box wird bei gleichem Median durch die multikriterielle Regelung nach unten verlängert. Eine Restlast von Null ist wesentlich häufiger als bei der Standardregelung.

Die relativen Häufigkeiten der Restlast sind in **Abbildung 47** exemplarisch für Pufferspeicher 2 mit beiden Regelungen in einer Klassenbreite von 250 W_{el} dargestellt. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, wie sich die Charakteristik der residualen Last durch die multikriterielle Regelung verändert. Die grünen Säulen zeigen die relativen Häufigkeiten der multikriteriellen Regelung und die roten Säulen geben das Restlastprofil der Standardregelung wieder. Die Verteilung der relativen Häufigkeiten der beiden Regelungen unterscheidet sich über den gesamten Lastbereich, aber v. a. in zwei signifikanten Leistungsbereichen, bei $P_{Residual} = 2,5 \text{ kW}_{el}$ und bei $P_{Residual} = \pm 0,25 \text{ kW}_{el}$. Hierbei handelt es sich einmal um den nächtlichen Stillstand mit Häufigkeiten von 12,5 %, der aus Abschaltungen des KWK-Moduls in Schwachlastzeiten (in der Nacht) resultiert und um die Lastfolge der dezentralen Stromerzeugung des KWK-Moduls mit relativen Häufigkeiten von 15,7 %. Die multikriterielle Rege-

lung nutzt die Speicherzustandsbestimmung, um die Stromerzeugung zeitlich zu verschieben. Der Regelungsalgorithmus minimiert die residuale Last und unterdrückt den Betriebspunkt „Minimallast“, wodurch die relative Häufigkeit bei $P_{Residual} = 1,25 \text{ kW}_{el}$ um über zehn Prozentpunkte reduziert wird. Das KWK-Modul wird strombedarfsorientiert und folglich effektiver eingesetzt.

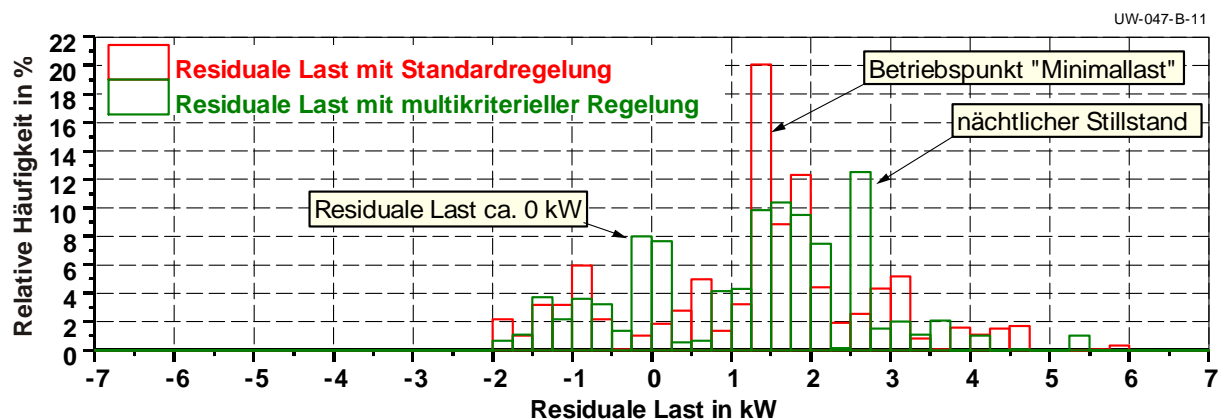


Abbildung 47: Relative Häufigkeit der residualen Last am *Übergangstag – Heiter*

Die Netzurückwirkungen eines Versorgungsobjektes unterscheiden sich je nach verwendeter Regelung des KWK-Moduls. Heizungssysteme mit KWK-Modul und Standardregelung, die im wärmegeführten Betrieb der thermischen Last des Versorgungsobjektes folgen, bewirken eine ungesteuerte Lastumkehr. Wärmegeführte KWK-Module erzeugen elektrische Energie in Abhängigkeit des Wärmebedarfs. Die Lastumkehr ist somit von den Umgebungsbedingungen Außentemperatur und solarer Einstrahlung abhängig und kann als fluktuierend bezeichnet werden. Die Stromerzeugung eines multikriteriell geregelten KWK-Moduls unterscheidet sich dagegen deutlich von der Erzeugungscharakteristik eines KWK-Moduls mit Standardregelung. Durch gesteuerte Pufferspeicherlade- und -entladevorgänge wird die Stromerzeugung zeitlich verschoben und der elektrischen Last angepasst. Die multikriterielle Regelung maximiert die Eigenstromerzeugung und minimiert die residuale Last und folglich die Netzurückwirkungen.

7.3 Lastwechsel

Neben den Häufigkeiten verschiedener Lastzustände wirken sich Lastwechsel und deren Lastwechselgeschwindigkeiten auf das Stromnetz aus. Schnelle und hohe Lastsprünge müssen durch das öffentliche Netz abgedeckt werden. Die Lastwechsel des Mehrfamilienhauses sind in **Abbildung 48** als Laständerung in Kilowatt pro Minute dargestellt und zeigen

den Einfluss der Heizungssystemvarianten mit KWK-Modul. Die Säulen geben die Lastwechselrichtung über das Vorzeichen und die Höhe eines Lastsprungs an. Als Vergleichsgröße sind links von der Ordinate die positiven und negativen Lastwechsel des elektrischen Bedarfs des Mehrfamilienhauses aufgetragen und rechts von der Ordinate sind die Ergebnisse der untersuchten Energieversorgungsvarianten mit KWK-Modul dargestellt.

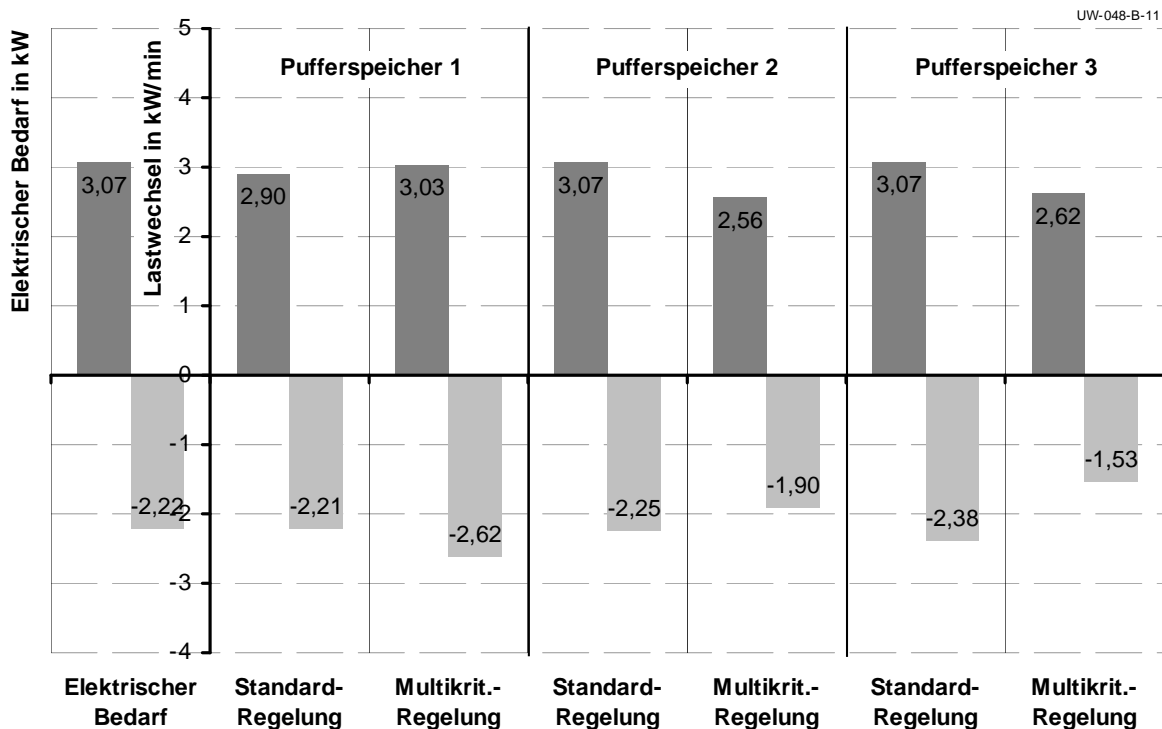


Abbildung 48: Lastwechsel im Stromnetz am Übergangstag – Heiter

Die Standardregelung des KWK-Moduls führt unabhängig vom Pufferspeicher zu keiner signifikanten Verkleinerung der Lastsprünge, wobei die multikriterielle Regelung keine reduzierten Lastwechsel garantiert. Die Speicherkapazität von Pufferspeicher 1 schränkt die Funktionen der multikriteriellen Regelung ein und mindert die Möglichkeit einer Lastspitzenreduktion. Das Speichervolumen von Pufferspeicher 2 und Pufferspeicher 3 ermöglicht eine engere Kopplung der dezentralen Stromerzeugung am elektrischen Bedarf und gewährleistet damit eine Lastspitzen- bzw. eine Lastwechselkontrollfunktion. Die positiven Lastwechsel fallen um 510 W/min (Pufferspeicher 2) bzw. um 450 W/min (Pufferspeicher 3) und die negativen Lastwechsel fallen um 350 W/min (Pufferspeicher 2) bzw. um 850 W/min (Pufferspeicher 3) niedriger aus.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird eine multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen entwickelt und validiert, die die Stromerzeugung eines KWK-Moduls zur dezentralen Gebäudeenergieversorgung durch gesteuerte Pufferspeicherladezyklen wirtschaftlich optimiert und netzfreundlich gestaltet. Motiviert wird diese Arbeit durch den politisch geförderten und unabhängig prognostizierten Ausbau dezentraler Mini-KWK-Anlagen und den daraus resultierenden Herausforderungen für die Stromversorgungsstruktur.

Der Ausbau der Mini-KWK-Anlagen wird voraussichtlich nur unter bestimmten wirtschaftlichen und technischen Voraussetzungen im prognostizierten Umfang eintreten. In Kombination mit den Investitionskosten ist die heute übliche Betriebsweise von Mini-KWK-Anlagen eine der wesentlichen wirtschaftlichen Ausbauhürden. Wärmegeführte KWK-Anlagen zur Heizungsunterstützung können nur als Grundlastwärmeerzeuger wirtschaftlich dargestellt werden. Die Dimensionierung von KWK-Anlagen strebt eine Maximierung der dezentralen Stromerzeugung an und geht davon aus, dass ein Großteil der erzeugten Energie lokal verbraucht wird. Diese Annahme resultiert in den technischen Ausbauhürden. Wärmegeführte KWK-Anlagen erzeugen elektrische Energie in Abhängigkeit von äußeren Witterungsbedingungen und gänzlich unabhängig von der elektrischen Last des betrachteten Versorgungsobjektes. Ein hoher Produktionsdeckungsgrad ist eher zufällig als das er technisch angestrebt wird. Der wärmegeführte Betrieb führt somit zu ungesteuerter Stromerzeugung, aber da es sich bei den dezentralen Mini-KWK-Anlagen derzeit um eine Nischentechnologie handelt, sind die Rückwirkungen der ungesteuerten Stromerzeugung auf das öffentliche Stromnetz noch vernachlässigbar. Unter der Annahme des prognostizierten Ausbaus ist davon auszugehen, dass sich die Rahmenbedingungen für den Betrieb von Mini-KWK-Anlagen verändern werden. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit eine multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung entwickelt und validiert, die den KWK-Anlagen das Rüstwerkzeug für die Herausforderungen der Zukunft liefert.

Das Methodenkonzept der vorliegenden Arbeit ist ein Zusammenspiel aus theoretischen Vor- und Nachbereitungen von messtechnischen Untersuchungen. Ausgangsbasis der Entwicklungsarbeiten sowie der Ergebnisanalyse sind die im Rahmen von theoretischen Vorarbeiten

bestimmten thermischen und elektrischen Lastgänge eines Mehrfamilienhauses mit zehn Wohneinheiten in München. Das Mehrfamilienhaus wird über einen Stromnetzanschluss und ein Heizungssystem mit KWK-Modul, Spitzenlastkessel, Pufferspeicher, Warmwasserspeicher und hydraulischem Verteilnetz mit Strom und Wärme versorgt. Diese energietechnischen Rahmenbedingungen sind die Grundlage für die messtechnischen Untersuchungen in dieser Arbeit.

Die experimentelle Analyse des wärmegeführten Betriebs eines Mini-KWK-Moduls hat gezeigt, dass es sich hierbei um eine monokriterielle und im Grunde genommen diskrete Regelung handelt, die anhand von Solltemperaturen die Pufferspeicherzustände „Geladen“ und „Nicht Geladen“ bzw. die Heizungssystemzustände „Wärmebedarf vorhanden“ und „Wärmebedarf nicht vorhanden“ detektiert. Die Zustände von Pufferspeicher und Heizungssystem können nicht in Verbindung gebracht werden, weil die dafür nötigen thermischen Energien und Leistungen nicht bekannt sind. Dementsprechend wird der Pufferspeicher im wärmegeführten Betrieb als passives Ausgleichselement bei thermischen Lastschwankungen und zur Speicherung von Überschusswärme verwendet. Der Pufferspeicher wird zur Vergleichmäßigung des KWK-Betriebs verwendet. Die technische Möglichkeit der Entkopplung von Wärmebedarf und Wärmeerzeugung bleibt unberücksichtigt, obwohl mithilfe des Pufferspeichers der Betrieb des KWK-Moduls flexibilisiert werden kann. Die Flexibilisierung entsteht mit der Entkopplungsfähigkeit von Pufferspeichern und wird durch die Kenntnis der thermischen Energien und Leistungen im Heizungssystem umsetzbar. Hierzu ist die temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung entwickelt worden, die mithilfe der Temperaturschichtung in Pufferspeichern die Leistungsbilanz des Mehrfamilienhauses und die Energiebilanzen der Pufferspeicher berechnet. Diese Größen geben Auskunft über die thermische Situation im Heizungssystem und im Pufferspeicher und entkoppeln Wärmebedarf und -erzeugung.

Die temperaturbasierte Speicherzustandsbestimmung macht den Freiheitsgrad des Pufferspeichers für aktive Regelungsaufgaben nutzbar und ist damit die technische Basis für die Entwicklung der multikriteriellen Regelung von Mini-KWK-Anlagen. Multikriteriell wird die Regelung durch die Optimierung der teils gegenteiligen Zielgrößen Wärme- und Strombedarfsdeckung. Durch gesteuerte Pufferspeicherlade- und -entladevorgänge wird die Wärmeerzeugung vom thermischen Bedarf entkoppelt und die Stromerzeugung dem elektrischen Bedarf angepasst. Die Regelung maximiert die Eigenstromerzeugung und den Produktionsdeckungsgrad und vergleichmäßigt die residuale Last. Der Produktionsdeckungsgrad steigt bis auf 92,7 %, wodurch die Einspeisung auf ein Minimum reduziert wird. Dieser strombedarfsorientierte Betrieb des KWK-Moduls reduziert die Tagesenergiekosten um bis zu 3,8 % und

die Jahresenergiekosten um bis zu 3,6 %, indem die Stromkosten um 5,2 % bzw. um 6,8 % verringert werden.

Die Funktionalität der multikriteriellen Regelung ist abhängig von der Dimensionierung des Heizungssystems. Nach dem Stand der Technik wird ein KWK-Modul auf ca. 25 % der thermischen Spitzenlast ausgelegt. Dieser Erfahrungswert gewährleistet eine hohe Anzahl an Vollbenutzungsstunden im wärmegeführten Betrieb, resultiert aber in einer starken Einschränkung der multikriteriellen Regelung. Zukünftige Heizungssysteme sollten derart dimensioniert sein, dass die Zyklisierfähigkeit des Pufferspeichers erhalten bleibt. Die Zyklisierung des Pufferspeichers entspricht dem regelungstechnischen Freiheitsgrad, d. h. eine geeignete Kombination aus Speichervolumen, thermischer und elektrischer Leistung des KWK-Moduls und Wärmebedarf ist gegeben, wenn die Regelung die Freiheit zur Verschiebung der Stromerzeugung hat. Die multikriterielle Regelung spielt ihre Stärken aus, wenn die Möglichkeit existiert den Pufferspeicher zu zyklisieren. Im Falle eines vergleichsweise hohen oder niedrigen Wärmebedarfs findet entweder ein stetiger Entlade- oder ein stetiger Ladevorgang des Pufferspeichers statt. Die Regelung ist somit eingeschränkt. Für die Zeit der Übergangstage, jene Zeit, in der das KWK-Modul (monovalent) ausreichend für die Wärmeerzeugung ist, kann die multikriterielle Regelung mithilfe von Pufferspeicherlade- und -entladevorgängen die Stromerzeugung an den Gebäudelastgang anpassen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstützen somit die Forderung der Ethikkommission, dass KWK-Module in Zukunft mit größeren Wärmespeichern ausgelegt werden sollten, wobei diese Arbeit eine größere Dimensionierung der KWK-Module als ergänzende Maßnahme für eine bedarfsgerechte dezentrale Stromerzeugung vorschlägt. Unter diesen veränderten Rahmenbedingungen könnte ein erheblicher Ausbau der dezentralen Stromerzeugung mit Mini-KWK-Anlagen ermöglicht werden, der jedoch die Unterstützung durch eine verbesserte Regelung benötigt. Die in dieser Arbeit entwickelte und validierte multikriterielle Regelung ist die Basis für die zukünftigen Aufgaben der dezentralen Stromerzeugung, die von einer strommarktorientierten Betriebsweise, über die Ausregelung dargebotsabhängiger Einspeiser bis hin zur Integration in ein Virtuelles Kraftwerk reichen.

Die multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung ist unter dynamischen Lastbedingungen messtechnisch analysiert worden. Die Ergebnisse sind damit weitestgehend übertragbar, jedoch versprechen sogenannte Feldtest einen wesentlichen Erfahrungszugewinn. Die Prüfstandsuntersuchungen liefern realitätsnahe Ergebnisse, doch basiert der zugrundeliegende Lastgang auf modellierten Gebäudestandards und Gebäudenutzerverhalten. Eine Bewährung der multikriteriellen Regelung mit temperaturbasierter

Speicherzustandsbestimmung unter realen Einsatzbedingungen sollte eine zukünftige Aufgabe für die Weiterentwicklung der Regelung sein.

Darüber hinaus ist die Gebäudeenergieversorgung von Mehrfamilienhäusern mit KWK-Modul selten, weil Gebäudenutzer und KWK-Anlagenbetreiber in der Regel nicht dieselbe Person sind. Nur durch eine Verständigung der beiden Parteien ließe sich ein wirtschaftlicher Betrieb des KWK-Moduls für beide Parteien realisieren. Anders liegt der Fall in einem Einfamilienhaus. Hier sind Gebäudenutzer und KWK-Anlagenbetreiber häufig dieselbe Person. Eine Adaption des Regelungsalgorithmus auf Heizungssysteme von Einfamilienhäusern würde die Anwendungsfelder der multikriteriell geregelten KWK-Anlagen vervielfältigen.

Literatur

- [1] Ahrens, K.: MPW - Rechtliche Aspekte beim Betrieb einer KWK-Anlage, München 27.07.2010
- [2] AMETEK Calibration Instruments: JOFRA Modell ATC-125
- [3] Arndt, U.: Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandsgestützter Simulation, Dissertation TU München, 2008
- [4] Bartenwerfer, M.: Messtechnische Untersuchung und Simulation einer Erdgas-Brennwerttherme, TU München 2010
- [5] BERNDT-CONTEC: Bedienungs- und Einbauanleitungen - LTR15
- [6] Bundesministerium der Justiz: Energiesteuergesetz, Berlin 2006
- [7] Bundesministerium der Justiz: Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz), Berlin 2009
- [8] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Zuschuss für Mini-KWK-Anlagen - Liste der förderfähigen Mini-KWK-Anlagen - Gültig für Anträge ab Eingangsdatum 01.2.2009
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Entwicklung von Energiepreisen und Preisindizes – Deutschland, Berlin 2011
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Verordnung über den energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV), Berlin 2001
- [11] Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.; Entwurf zum Arbeitsblatt W 551/W 552, Trinkwassererwärmungs- und Leitungsanlagen, technische Massnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums, DVGW Regelwerk, Bonn 2002
- [12] Deutscher Wetterdienst: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY von Jürgen Christoffer, Thomas Deutschländer, Monika Webs, Offenbach a. Main, 2004
- [13] Destatis – Statistisches Bundesamt Deutschland: Bevölkerungsstand am

31.12.2007; Wiesbaden 2009

- [14] Elster Gastechnic GmbH: Datenblatt Experimentiergaszähler Trockene Bauart, Wien
- [15] Endres+Hauser Messtechnik GmbH & Co. KG, Technische Information – Proline Promag, Weil am Rhein 2008
- [16] Energie & Management: BHKW-Ranking 2009: Absatzdelle fast ausgebügelt, Herrsching 2010
- [17] Ethikkommission Sichere Energieversorgung: Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft. Berlin, 30. Mai 2011
- [18] European Energy Exchange, <http://www.eex.com/de/>, KWK-Index (Deutschland), September 2011
- [19] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung - Messtechnische Untersuchung, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Systemvergleich und Optimierung. München, 2007
- [20] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Verbundprojekt ISOTEG - Wärmeerzeuger für die Raumheizung und Warmwasserbereitung, München, 2002
- [21] Fritsch, I.: Theoretische Untersuchung der optimalen Größe von Heizungspufferspeichern, TU München 2010
- [22] FuehlerSysteme eNET International GmbH: Kabeltemperaturfühler mit Silikon-Leitung
- [23] Huhn, R.: Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserpufferspeichern in Energieumwandlungsketten, Dissertation TU Dresden 2007
- [24] Institut Wohnen und Umwelt: Basisdaten für Hochrechnungen mit der deutschen Gebäudetypologie des IWU, Darmstadt 2007
- [25] Institut Wohnen und Umwelt: Deutsche Gebäudetypologie, Darmstadt 2003
- [26] Jungwirth, J.: Gesteuerter Betrieb eines KWK-Prüfstands mit LabVIEW, TU München 2009
- [27] Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik: Aufteilung des Endenergieverbrauchs auf Verbrauchssektoren und Bedarfsarten in Deutschland 2007, München 2008
- [28] Meißner, H.: Kraft-Wärme-Kopplung: Technologische Trends und Rahmenbedingungen, Berliner Energietage Berlin 2010
- [29] Mühlbacher, H.: et al.: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung – Endbericht der messtechnischen Untersuchungen, TU München 2007
- [30] Mühlbacher, H.: Verbrauchsverhalten von Wärmeerzeugern bei dynamisch variierten Lasten und Übertragungskomponenten, Dissertation TU München, 2007

-
- [31] Müller+Ziegler GmbH & Co. KG: Technische Daten Energiezähler für Drehstrom der Type EZD, Gunzenhausen
 - [32] National Instruments Germany GmbH: Getting started with DIAdem, Austin 2007
 - [33] National Instruments Germany GmbH: Getting started with LabVIEW, Austin 2007
 - [34] Pielke, M.: Technisch-wirtschaftliche Systembetrachtung zur netzorientierten Integration von Mini-Blockheizkraftwerken. Dissertation TU Braunschweig 2010
 - [35] ratiotherm Heizung + Solartechnik GmbH & Co. KG: Technische Unterlagen mit Montage- und Betriebsanleitungen, ratiotherm Heizung + Solartechnik GmbH & Co.KG, Germany, Dollenstein 2009.
 - [36] Reinfelder, A.: Messtechnische Untersuchung des Schichtungsverhaltens von Heizungspufferspeichern, TU München 2010
 - [37] Samweber, F.: Energiewirtschaftliche Bewertung von Heizungspufferspeichern, TU München 2010
 - [38] Sänger, F.: Theoretische und messtechnische Untersuchung geeigneter Zustandsgrößen zur Pufferspeicherregelung, TU München 2010
 - [39] Schulz, C.: Systembetrachtung zur Integration von Mini-Blockheizkraftwerken in das elektrische Versorgungsnetz, Dissertation TU Braunschweig 2007
 - [40] Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison: TRNSYS – Getting Started, Wisconsin 2007
 - [41] SWM Service GmbH: Erdgasqualität im Verteilungsnetz des Großraums München, München 01.2011
 - [42] trend:research GmbH: Mikro-KWK - Anwenderanforderungen, Technologien, Chancen und Risiken in Deutschland, Österreich und der Schweiz, Bremen 2010
 - [43] Umweltbundesamt: Anteil KWK-Strom an der Gesamtstromerzeugung für Industriekraftwerke und Kraftwerke der allgemeinen Versorgung. Dessau-Roßlau 2011
 - [44] Universität Heidelberg, Institut für Umweltphysik, Werner Aeschbach-Hertig: Physik aquatischer System I, Heidelberg 2005
 - [45] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG: Bedienungsanleitung ecoTEC exclusive und classic, Remscheid 2004
 - [46] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG: ecoPOWER Service-Ordner – Mit der Heizung Strom erzeugen, Gera 2002
 - [47] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG: ecoisland – Sichere Energie auch ohne Netz, Gera 2002
 - [48] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG: <http://www.vaillant.de/ecopower/>

- [49] VDI 2067 – Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, September 2000
- [50] VDI 4608: Energiesysteme - Kraft-Wärme-Kopplung - Begriffe, Definitionen, Beispiele, März 2005
- [51] VDI 4655: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, Mai 2006
- [52] Wehmhörner, U. et al.: Innovative Heat Storage Management by Object Oriented Control, CIRED 2011, Frankfurt 2011
- [53] Wehmhörner, U. et al.: Optimization of Multifunctional Heating Systems, MICRoGEN II, Glasgow 2011
- [54] Wehmhörner, U. et al.: Wärme- und Strommanagement von Mikro-KWK-Anlagen mit Pufferspeichern, VDE SmartCities, Leipzig 2010
- [55] Zeeh: Zeeh – Heiztechnik und Behälterbau, Germany, Bockau 2010.

A Anhang

A.1 Pufferspeichermaße

Tabelle 7: Pufferspeichermaße

	Pufferspeicher 1	Pufferspeicher 2	Pufferspeicher 3
Höhe	1840 mm	2050 mm	1940 mm
Querschnittsfläche	850 mm	1100 mm	1200 mm
Volumen	1000 l	2000 l	2000 l
Wärmedämmstärke	110 mm	110 mm	110 mm

A.2 Fühlerhöhen

Tabelle 8: Fühlerhöhen

	Pufferspeicher 1	Pufferspeicher 2		Pufferspeicher 3
		Üblich	Opt.	
T _{PS_1}	164,5 cm	199 cm		188 cm
T _{PS_2}	148 cm	178 cm	170 cm	171 cm
T _{PS_3}	132,5 cm	158 cm		154 cm
T _{PS_4}	117 cm	138 cm	130 cm	137 cm
T _{PS_5}	101,5 cm	119 cm	115 cm	120 cm
T _{PS_6}	86 cm	99 cm	100 cm	103 cm
T _{PS_7}	70,5 cm	79 cm	85 cm	87 cm
T _{PS_8}	55 cm	59 cm	70 cm	70 cm
T _{PS_9}	39,5 cm	39 cm	50 cm	53 cm
T _{PS_10}	24 cm	19 cm		36 cm

A.3 Tages- und Jahresendenergiebilanzen

Tabelle 9: Tagesendenergiebilanzen

	Referenz	Pufferspeicher1		Pufferspeicher2		Pufferspeicher3	
		Stand.-Reg.	Multi.-Reg.	Stand.-Reg.	Multi.-Reg.	Stand.-Reg.	Multi.-Reg.
	[kWh/d]	[kWh/d]	[kWh/d]	[kWh/d]	[kWh/d]	[kWh/d]	[kWh/d]
Erdgas							
KWK-Modul	0	197,2	193,1	201,3	200,3	236,5	218,0
SL-Kessel	176,4	17,9	20,71	22,7	19,6	0	13,8
El. Energie							
Bezug	83,4	43,2	41,8	40,8	38,6	34,1	33,7
Einspeisung	0	6,1	4,6	4,4	3,6	5,9	2,9
Eigennutzung	0	40,2	41,6	42,7	44,8	49,3	49,7
Bezug HT	-	-	-	26,9	21,91	-	-
Bezug NT	-	-	-	13,8	16,73	-	-

Tabelle 10: Jahresendenergiebilanzen

	Referenz	Pufferspeicher1		Pufferspeicher2		Pufferspeicher3	
		Stand.-Reg.	Multi.-Reg.	Stand.-Reg.	Multi.-Reg.	Stand.-Reg.	Multi.-Reg.
	[MWh/a]	[MWh/a]	[MWh/a]	[MWh/a]	[MWh/a]	[MWh/a]	[MWh/a]
Erdgas							
KWK-Modul	0	90,4	86,6	90,0	86,6	85,3	80,7
SL-Kessel	99,6	30,8	34,0	32,6	32,0	33,2	34,7
El. Energie							
Bezug	30,2	11,9	11,9	12,4	11,6	13,1	13,0
Einspeisung	0	2,8	1,5	2,8	1,4	2,5	1,3
Eigennutzung	0	18,3	18,3	17,8	18,6	17,1	17,2

A.4 Tages- und Jahresenergiekosten

Tabelle 11: Tagesenergiekosten

	Referenz	Pufferspeicher1		Pufferspeicher2		Pufferspeicher3	
		Stand.-Reg.	Multi.-Reg	Stand.-Reg.	Multi.-Reg	Stand.-Reg.	Multi.-Reg
	[€/d]	[€/d]	[€/d]	[€/d]	[€/d]	[€/d]	[€/d]
Erdgas							
KWK-Modul	0	11,45	11,22	11,69	11,64	13,74	12,67
SL-Kessel	11,22	1,14	1,32	1,44	1,24	0	0,87
EI. Energie							
Bezug	19,54	10,12	9,8	9,55	9,05	7,99	7,89
Einspeisung	0	0,67	0,51	0,48	0,39	0,65	0,32
Eigennutzung	0	2,06	2,12	2,18	2,29	2,52	2,54
Bezug HT	-	-	-	6,31	5,13	-	-
Bezug NT	-	-	-	2,43	2,94	-	-

Tabelle 12: Jahresenergiekosten

	Referenz	Pufferspeicher1		Pufferspeicher2		Pufferspeicher3	
		Stand.-Reg.	Multi.-Reg	Stand.-Reg.	Multi.-Reg	Stand.-Reg.	Multi.-Reg
	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]	[€/a]
Erdgas							
KWK-Modul	0	5749,41	5509,12	5723,65	5507,49	5425,44	5133,99
SL-Kessel	6333,94	1955,57	2166,83	2070,31	2032,42	2113,81	2208,01
EI. Energie							
Bezug	7071,77	2788,72	2776,44	2905,25	2720,55	3069,45	3041,24
Einspeisung	0	298,42	154,51	288,51	148,61	261,23	140,04
Eigennutzung	0	934,52	937,20	909,09	949,39	873,27	879,42