



**Abschlussbericht**

# KWK plus Speicher

Anlagen- und Betriebsoptimierung zur Flexibilisierung des KWK-Betriebs mit  
innovativen Speichertechnologien

Förderkennzeichen: PRO 0067A

Datum: 31.07.2021

Laufzeit: 15.07.2017 – 31.01.2021

**Gefördert durch:**

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Diese Veröffentlichung ist wie folgt zu zitieren:

M. Wenzel, F. Burmeister, R. Albus (Hrsg.): *KWK plus Speicher – Anlagen- und Betriebsoptimierung zur Flexibilisierung des KWK-Betriebs mit innovativen Speichertechnologien*; Abschlussbericht; Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Institut Energiesysteme und Energiewirtschaft der Hochschule Ruhr West, Innovation City Management GmbH, Fachhochschule Dortmund, Westfälische Wilhelms-Universität Münster (2021).

Die Inhalte der Teilkapitel beziehen sich auf den Sachstand von Mai 2021 sofern nicht anders gekennzeichnet.

#### **Autoren:**

##### **Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI)**

Maren Wenzel  
Juri Scholten  
Frederic Frankenhoff  
Mustafa Flayyih  
Annika Heyer  
Miriam Bäuerle  
Dr. Frank Burmeister  
Dr. Rolf Albus  
Prof. Dr. Klaus Görner

Unter Mitwirken von:

André van Haaren, Steffen Kubik, Yvonne Kannenberg, Ilias Rahmouni, Markus Heckschen, Louis Scholten

##### **Innovation City Management GmbH (ICM)**

Henning Stemmer  
Ulrich Kaak  
Martina Schillings  
Michelle Kwyas

##### **Hochschule Ruhr West (HRW)**

Prof. Dr. Viktor Grinewitschus  
Michael Grimmelt

##### **Westfälische Wilhelms-Universität Münster (MEET)**

Olga Fromm  
Anna Weichert  
Dr. Markus Börner  
Prof. Dr. Martin Winter

##### **Fachhochschule Dortmund (FH Do)**

Prof. Dr. Marcel Hunecke  
Martina Nies  
Holger Heppner

# Management Summary

## Motivation und Hintergrund

Die nordrhein-westfälische Landesregierung will mit dem Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) die Energiewende im „EnergieLand“ NRW weiter vorantreiben. Die Steigerung der Energieeffizienz mittels innovativer KWK-Systeme ist ein wichtiger Eckpfeiler bei der Dekarbonisierung der häuslichen Wärme- und Stromversorgung. Das Projekt „KWK plus Speicher“ ist eine konsequente Weiterführung des Projektes „100 KWK-Anlagen in Bottrop“. Vor dem Hintergrund steigender Strompreise und fallender Preise für Batteriespeichersysteme stellt sich die Frage, ob und wie der Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen durch den Einsatz von Stromspeichern optimiert werden kann. Zielgrößen für die Optimierung sind die Primärenergieeinsparung, der CO<sub>2</sub>-Ausstoß, der Selbstversorgungsgrad sowie daraus resultierende monetäre Einsparungen.

Durch die Umsetzung von Innovationen sowohl in der Betriebsführung als auch im Energiespeichermanagement soll eine Flexibilisierung des KWK-Betriebs erreicht werden. Dabei wird auf eine umfassende Demonstrations- und Versuchsinfrastruktur mit vorhandener Hardware (Prüfstände, 100 installierte KWK-Systeme inkl. Messtechnik in der InnovationCity Ruhr | Modellstadt Bottrop), intensive Zusammenarbeit mit dem Handwerk und den Endnutzern, Kontakte zum Energieversorger und Netzbetreiber sowie bereits etablierte Kommunikationsstrukturen zurückgegriffen. Durch die Weiterführung des Anlagen-Monitorings über weitere Heizperioden im 100-KWK-Projektgebiet wird die Nachhaltigkeit der Vorprojekte sichergestellt. Im Projekt „demoKWK3.0“ stand die fortlaufende Messdatenerfassung, die Evaluation des Rechtsrahmens von KWK-Anlagen und mögliche Mieterstromkonzepte im Vordergrund. Abbildung I stellt die Entwicklung der Forschungsschwerpunkte im Themenkomplex Mikro-KWK-Anlagen am GWI dar.

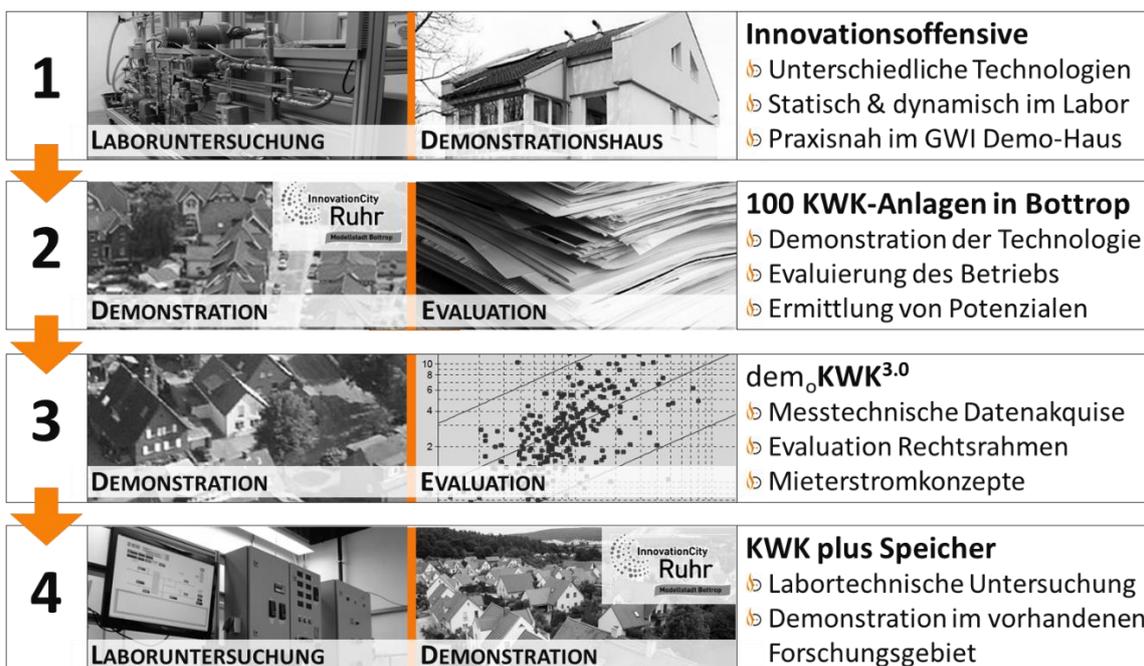


Abbildung I: Strategische Forschungsplanung zur KWK-Demonstration des GWI

## Ziel des Projektes

Die Projektergebnisse dienen dazu, die Effizienz und Flexibilität von Mikro-KWK-Systemen in einem erhöhten Maße aktiv zu nutzen und die Potenziale der Technologie aufzuzeigen. Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorprojekte, werden ausgewählte KWK-Anlagen um einen Stromspeicher erweitert. Anhand der Bewertung der elektrischen Energieströme sowie der Objekt- und KWK-bezogenen Bilanzgrenzen sollen Aussagen über die Stromeigennutzungs- und -deckungsanteile getroffen werden. Die Erweiterung wird unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und der Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergie beleuchtet. Die aufeinander abgestimmte Dimensionierung der KWK-Systeme und der Wärme- sowie Stromspeichersysteme im Zusammenhang mit der Betriebsweise der Anlagen ist als komplex zu bewerten und wird in diesem Projekt als zentrales Ziel adressiert. Im Rahmen des Projektes werden lithium- und bleibasierte Stromspeichersysteme unterschiedlicher Kapazitäten in Referenzobjekte integriert. Die Weiterführung des wissenschaftlich begleiteten Anlagenbetriebes der 100 KWK-Systeme in der Demonstration, mit dem Vorhaben eine höhere Belastbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, ist weiterhin essenzieller Untersuchungsgegenstand. Als weitere Möglichkeit zur Flexibilisierung des KWK-Betriebs wird ein Konzept zur stromgeführten Betriebsweise erarbeitet. Das ökonomische und ökologische Potenzial wird bewertet. Weiterhin werden die aktuell vorliegenden rechtlichen Rahmenbedingungen, wie das KWKG, sowie die Möglichkeiten zur Bezuschussung von Mikro-KWK-Anlagen analysiert. Neben der Erprobung der Technologiekombination auf dem Prüfstand des GWI und im Feld wird die Zellchemie von Batteriespeichern weiterentwickelt und an den Betrieb mit KWK-Anlagen angepasst.

Auf Basis der Kommunikation mit den AnlagenbetreiberInnen werden Herausforderungen und Hemmnisse aus Anwendersicht identifiziert. In diesem Bereich werden resultierende Handlungsempfehlungen herausgearbeitet, die zukünftig den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen und Batteriespeichern begünstigen können. Grundsätzlich besteht dabei der Anspruch, dass die erreichten Ziele des Projekts auf andere Regionen übertragbar sind.

Hierzu ist es besonders wichtig, neben der technoökonomischen Analyse von Mikro-KWK-Anlagen und der Erweiterung um einen Batteriespeicher, die sozialwissenschaftlichen Aspekten zu untersuchen. Das gesteckte Ziel ist, Vor- und Nachteile der Anlagen aus der Perspektive der NutzerInnen empirisch zu erfassen. Des Weiteren sollen die Motivationen der Teilnehmenden herausgearbeitet werden.

## Methodisches Vorgehen

In 20 der 100 Objekten werden die KWK-Anlagen um einen Stromspeicher ergänzt und deren Akquise, Inbetriebnahme sowie Betrieb dokumentiert und analysiert. Dabei werden sowohl technische als auch administrative Anforderungen betrachtet. Anhand der erfassten Daten werden CO<sub>2</sub>- und Primärenergiebilanzierungen der Objekte für die installierten Versorgungssysteme sowie vergleichbare Versorgungstechnologien erstellt. Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt in Anlehnung an das Berechnungsverfahren der Richtlinie VDI 2067. Die Auswertungs-

ergebnisse werden genutzt, um eine Übertragung der Ergebnisse auf weitere Gebiete durchzuführen. Neben der Analyse der Felddaten erfolgt die Vermessung unterschiedlicher Anlage auf den Prüfständen des GWI. Hierbei werden Batteriespeicher auf ihre Be- und Entladewirkungsgrade hin vermessen. Weiterhin erfolgt die Analyse des Verhaltens der Mikro-KWK-Anlagen in Hinblick auf Lastgradienten, Start-/Stop-Verhalten und dem Folgen eines elektrischen Lastgangs durch die HRW. Die Messung wird am HRW-Labor der Leistungsklasse 4.7 kW durchgeführt. Darauf basierend wird eine Regelung entwickelt, welche zum Ziel hat, den beheizten Raum selbst als zusätzlichen thermischen Speicher zu verwenden und so eine zusätzliche Flexibilität im Lastgang zu erschließen, ohne hohe Investitionen zu tätigen.

Darüber hinaus wurden die bestehenden Modelle zur Simulation der Gebäude und Anlagentechnik erweitert. Die entwickelten Modelle werden in Jahressimulationen überführt, um allgemeingültige Aussagen ableiten zu können. Hierbei liegt der Fokus auf dem Vergleich unterschiedlicher KWK-Technologien und Betriebsweisen für ausgewählte Lastprofile aus dem Feld. In erweiterten Analysen wird der Netzeinfluss der KWK-Systeme auf Quartiersebene bewertet. Hierfür wird eine Regelung der KWK-Anlagen aus Perspektive des Netzes entwickelt, wobei die Potenziale zur Reduktion positiver und negativer Residuallasten ermittelt werden.

Für die Weiterentwicklung der Batterien wird vom MEET eine Zellchemie erarbeitet, die den Anforderungen von stationären Speichern in Kombination mit Mikro-KWK-Systemen gerecht wird. Es wird der Einsatz von Lithiumeisenphosphat mit einem Basiselektrolyt vorgeschlagen. Nachdem eine Anpassung von Elektrodenrezeptur und -design erfolgte, werden die LFP-Zellen mit Standard-NMC111 Zellen im 5Ah-Format Alterungsuntersuchungen unterzogen. Schlussendlich findet eine kritische Bewertung der eingesetzten Zellchemie statt.

Die von der FH Dortmund durchgeführte Datenerhebung baut methodisch auf der NutzerInnenbefragung des vorangegangenen Projektes „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ auf. Es werden problemzentrierte qualitative Interviews sowohl vor als auch nach dem Einbau der Batteriespeicher mit den teilnehmenden Personen geführt. Neben der Betrachtung der direkten Interaktion zwischen Anlage und Nutzendem werden auch die administrativen Prozesse beobachtet.

Die ICM kommuniziert im gesamten Projektzeitraum die Forschungsergebnisse nach Außen und fungiert als Bindeglied zwischen Forschung und direkter Anwendung im Projektgebiet.

### **Ergebnisse und Kernaussagen**

Das Projekt „KWK plus Speicher“ trägt durch die Demonstration elektrischer Speicher zur Flexibilisierung von KWK-Anlagen und deren technologischer Weiterentwicklung bei. Der Beitrag zur Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie Primärenergie durch den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern konnte quantifiziert werden. Die Einsparungen sind in hohem Maße abhängig von den vorliegenden Rahmenbedingungen, wie z.B. dem thermischen Deckungsgrad der KWK-Anlage, der Eigenverbrauchsquote, dem Betriebsverhalten sowie auftretenden thermischen und elektrischen Verlusten. Im Mittel konnte eine CO<sub>2</sub>-Ein-

sparung von ca. 38 % sowie eine Einsparung von ca. 24 % an Primärenergie im Feld nachgewiesen werden, wobei sich die Einsparungen auf die Emissionen und Primärenergiebedarfe der zuvor verbauten Heizungssysteme beziehen. Der Einsatz von Stromspeichern in der häuslichen und gewerblichen Energieversorgung befindet sich derzeit in einer frühen Phase der kommerziellen Nutzung, sodass im Rahmen des Projektes grundlegende Erkenntnisse und weiterer Forschungsbedarfe identifiziert werden konnten. So konnte das hohe Potenzial der Technologiekombination zur Senkung der Strombezugskosten quantifiziert werden, wodurch im Feld eine maximale Reduktion von bis zu 75 % erreicht wurde. Erweitert man das System aus KWK-Anlage und Batterie um eine PV-Anlage können die Strombezugskosten noch weiter gesenkt werden. Wird die Wirtschaftlichkeit nach VDI 2067 bewertet, welche alle Kosten und Erlöse einander gegenüberstellt, sind weitere Senkungen der Investitionskosten nötig, um Batteriespeicher in Kombination mit Mikro-KWK-Anlagen flächendeckend wirtschaftlich einsetzen zu können, auch wenn keine optimalen Einsatzbedingungen vorliegen. Es konnten Fälle aufgezeigt werden, die unter heutigen Bedingungen nah an der Konkurrenzfähigkeit zu klassischen Versorgungssystemen sind. Hierbei ist nach wie vor die Maximierung der Eigenverbrauchsquote, neben dem zuverlässigen Betrieb und den Wartungs- und Instandhaltungskosten der Anlagen, als zentraler Parameter zu sehen. Dies ist damit zu begründen, dass unter den aktuell vorliegenden Rahmenbedingungen die vermiedenen Kosten für den Netzbezug die größte Erlösposition darstellen. Um Mikro-KWK-Anlagen mit Batteriespeichern unter heutigen Rahmenbedingungen bestmöglich aufzustellen, ist eine Kombination mit einer PV-Anlage empfehlenswert, wenn ein ausreichend hoher elektrischer Verbrauch vorliegt, um hohe Eigenverbrauchsquote zu gewährleisten. So konnten im Projekt die sich sehr gut ergänzenden Erzeugungsprofile der beiden Systeme nachgewiesen werden, die in einer hohen Batterieauslastung resultieren. Weiterhin wurden im Projekt die energetischen und ökologischen Potenziale eines netzdienlichen Betriebs von Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern in einem fiktiven Quartier aufgezeigt. Dies schließt ein, dass die Anlagen nicht ausschließlich nach dem Wärmebedarf des Objektes gefahren werden, sondern von einer übergeordneten Steuerung ein- und ausgeschaltet werden können, um positive oder negative Residuallasten im Quartier zu decken.

Aus den durchgeführten Messungen zur Analyse des dynamischen Verhaltens ist ersichtlich, dass die betrachtete KWK-Anlage eine ausreichende Dynamik aufweist, um einem Lastgang zu folgen. Dabei schwankt das Verhältnis zwischen der thermischen und elektrischen Erzeugungsleistung, was bei einer Drehzahlregelung der KWK-Anlage Einschränkungen bzgl. der Präzision der Regelung zur Folge hat. Für die Bewertung wurde eine hardware-in-the-loop Emulation durchgeführt, die gezeigt hat, dass die daraus resultierenden Einschränkungen im realen Einsatz beherrschbar sind. Die entwickelte Regelung nutzt den Wohnraum, durch eine Anhebung der Wohnraumtemperatur innerhalb wählbarer Grenzen, als thermischen Speicher, um die Laufzeit der KWK-Anlage, die damit verbundene Eigenverbrauchsquote und die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. In den durchgeführten Simulationen ist auffällig, dass die Re-

gelung dazu neigt, die mittlere Raumtemperatur abhängig vom Strom-/Wärmebedarfsverhältnis näher an die erlaubten Grenzen (obere/untere Raumtemperatur) zu verschieben. Im Falle einer höheren mittleren Temperatur wird so zwar die Wirtschaftlichkeit verbessert, aber die CO<sub>2</sub>-Emissionen steigen ebenso.

In der Kommunikationsanalyse mit den Privathaushalten konnten insbesondere Hemmnisse administrativer, technischer, rechtlicher und steuerrechtlicher Art festgestellt werden. Um die KWK-Technologie in Privathaushalten zu etablieren, wurden entsprechende Handlungsempfehlungen abgeleitet. Dem entsprechend sind KWK-Anlagen erforderlich, die regulär vom Fachhandwerker installiert und gewartet werden können, deren Anschaffungs- und Wartungskosten sich innerhalb der Lebenszeit amortisieren und die einfach und mit weniger Meldepflichten angeschlossen werden können. Des Weiteren sollte ihr Betrieb nicht als unternehmerische Tätigkeit gewertet werden und eine Vergütung für eingespeisten Strom ohne steuerliche Pflichten ausgezahlt werden. Unter diesen Voraussetzungen können KWK-Anlagen in großer Anzahl Verbreitung in Privathaushalten finden.

Für die Auswahl der Referenzobjekte wurde zusätzlich zu den technischen Parametern auch die Motivationsgrundlage der Teilnehmer abgefragt. Die TeilnehmerInnen sprechen sich dabei für Energiesparen aus, vor allem, wenn gleichzeitig sparsam geheizt werden kann. Sie fühlen sich verpflichtet, durch ihr Heizverhalten einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Dieses Verhalten wollen die Teilnehmenden auch nach Projektende beibehalten. Sie fühlen sich gut über ihre Möglichkeiten im ökonomischen und ökologischen Heizverhalten aufgeklärt. Unzufriedenheiten traten durch den erhöhten Verwaltungsaufwand und Zweifel an der Wirtschaftlichkeit aufgrund von hohen Anschaffungskosten auf. Auf Basis der Interviews konnte festgestellt werden, dass die Teilnehmenden grundsätzlich zufrieden mit den KWK-Anlagen sind und die Bereitschaft von Teilnehmenden zur aktiven Unterstützung der Energiewende, durch privates Engagement oder Investitionen, ist an vielen Stellen deutlich geworden.

# Inhaltsverzeichnis

Management Summary.....	3
1. Systemanalyse: Speicherung von Wärme und Strom .....	11
1.1 Mikro-KWK-Systeme .....	11
1.1.1 Ottomotorische Systeme .....	11
1.1.2 Stirlingmotoren .....	13
1.1.3 Brennstoffzellen .....	14
1.1.4 Vergleich der Mikro-KWK-Systeme.....	17
1.2 Thermische Speicher .....	17
1.2.1 Sensible Wärmespeicher .....	18
1.2.2 Latente Wärmespeicher.....	20
1.2.3 Thermochemische Wärmespeicher .....	21
1.2.4 Vergleich der thermischen Speichertechnologien.....	22
1.3 Elektrische Speicher .....	23
1.3.1 Blei-Säure-Batterien.....	24
1.3.2 Lithium-Ionen-Batterien .....	25
1.3.3 Hochtemperatur-Batterien .....	26
1.3.4 Nickel-Metallhydrid-Batterien .....	26
1.3.5 Redox-Flow-Batterien .....	27
1.3.6 Vergleich der elektrischen Speichertechnologien .....	28
2. Teilsystemfokussierung: Stromspeicher/ Batterietechnik .....	29
2.1 Definition der Anforderungen an die Batterien.....	29
2.2 Zelldefinition, -produktion und Anwendung der Bedarfsprofile .....	35
2.2.1 Zelldefinition und -produktion.....	35
2.2.2 Anwendung der Bedarfsprofile .....	36
2.3 Sicherheitstests und post-mortem Analysen.....	40
2.3.1 <i>Post-mortem</i> Analysen der Elektrodenmorphologie .....	40
2.3.2 Elektrolyt-Analyse .....	43
3. Bewertung: Systeme aus KWK, Wärme- und Stromspeicher.....	47
3.1 Integration von Stromspeichern in die vorhandene Testumgebung.....	47
3.1.1 Untersuchung der Batteriespeichersysteme .....	48
3.1.2 Übersicht der untersuchten Speichersysteme .....	50

3.1.3	Versuchsaufbau und Durchführung.....	51
3.1.4	Ergebnisse der Batterieuntersuchungen .....	54
3.2	Integration von real-Nutzer-Betriebsweisen aus dem Demo-Gebiet.....	56
3.2.1	Versuchsaufbau.....	56
3.2.2	Ergebnisse aus dem Betrieb des Brennstoffzellensystems .....	57
3.2.3	Ergebnisse aus dem Betrieb des ottomotorischen Systems.....	61
3.2.4	Erkenntnisse aus der Laboruntersuchung .....	63
4.	Integration in die vorhandene Anlageninfrastruktur .....	65
4.1	Auswahl von Referenzobjekten .....	66
4.2	Systemanalytische Auslegung, Dimensionierung und Zuordnung .....	68
4.3	Installation der Stromspeicher und der zusätzlichen Messtechnik.....	70
4.4	Vorbereitung und Durchführung der Inbetriebnahme .....	70
4.5	Betrieb und Monitoring aller Anlagen .....	72
4.6	Betrieb und erweitertes Monitoring bei Anlagen mit Stromspeicher.....	73
4.7	Nutzerbetreuung und Service .....	76
4.7.1	Inbetriebnahme / Betrieb / Wartung .....	77
4.7.2	Finanzen / Wirtschaftlichkeit .....	78
4.7.3	Bürokratie: Marktstammdatenregister .....	82
4.7.4	E-Speicher .....	82
5.	NutzerInnen-Analyse .....	84
5.1	Standardisierte Langzeiterfassung des NutzerInnenverhaltens .....	85
5.1.1	Haushaltstruktur und Wohnsituation .....	86
5.1.2	Umgang und Zufriedenheit mit der KWK-Anlage .....	88
5.1.3	Einfluss der Anlage auf Einstellungen, Intention und Verhalten .....	90
5.1.4	Zufriedenheit mit den administrativen Prozessen .....	93
5.2	Problemzentrierte Interviews zur Implementierung der Speicher.....	95
5.3	Synthese und Reflexion der Ergebnisse im Gesamtprojekt.....	98
6.	Modellierung und Simulation .....	99
6.1	Modellierung und Simulation des Systems.....	100
6.1.1	Auswahl Lastprofile und Modellentwicklung .....	100
6.1.2	Modellvalidierung .....	104
6.1.3	Modellbezogene Bewertungsaspekte und Ergebnisse der Simulation .....	106

6.2	Entwicklung einer Methodik zur Generierung synthetischer Wärme- und Stromlastprofile unter Berücksichtigung des Einflusses der Bewohner auf die Energiebedarfe .....	111
6.2.1	Erzeugung der Anwesenheits- und Verhaltensprofile .....	112
6.2.2	Ableitung von Stromprofilen anhand der Verhaltensprofile .....	116
6.2.3	Besonderheiten bei der Betrachtung von Mehrpersonenhaushalten .....	118
6.2.4	Validierung der erzeugten Profile .....	119
6.3	Quantifizierung des Netzeinflusses.....	124
7.	Auswertung und Bewertung.....	132
7.1	Messungen zum Teillastverhalten, Anlagenregelung und Nutzerverhalten .....	133
7.1.1	Einbinden des BHKW in ein Smart-Home-System .....	133
7.1.2	Untersuchung der Regelbarkeit des Beispiel-BHKWs.....	135
7.1.3	Analyse des Potenzials des Raums als thermischer Speicher.....	144
7.2	Detailbetrachtung der Referenzobjekte mit Batterie .....	166
7.2.1	CO <sub>2</sub> - und Primärenergieeinsparung .....	166
7.2.2	Qualitative Bewertung des Nutzereinflusses.....	173
7.2.3	Wirtschaftlichkeit.....	180
7.2.4	Vergleich unterschiedlicher Heizperioden.....	191
7.3	Fortführung der Objektanalysen über weitere Heizperioden .....	197
7.3.1	CO <sub>2</sub> - und Primärenergieeinsparung.....	197
7.3.2	Wirtschaftlichkeit.....	204
7.4	Auswertung zu Deckungsgraden und eigenerzeugtem Strom .....	210
7.5	GIS-basierte Bewertung von Innovation-City KWK-Ausbaupotenzialen .....	219
7.6	Übertragung der Ergebnisse auf weitere Strukturen/Gebiete .....	230
8.	Kommunikation in der Innovation-City Ruhr   Modellstadt Bottrop.....	239
9.	Projektmanagement und Wissenstransfer.....	242
10.	Handlungsempfehlungen und Ausblick .....	243
	Literaturverzeichnis.....	246
	Abbildungsverzeichnis.....	257
	Tabellenverzeichnis.....	266
	Anhang .....	269

# 1. Systemanalyse: Speicherung von Wärme und Strom

*In diesem Kapitel werden die Einzelelemente des KWK-Systems in einer Literaturrecherche analysiert und verglichen. Dazu gehören unterschiedliche marktverfügbare sowie in der Entwicklung befindliche KWK-Systeme, Wärme- und Stromspeicher. Für die Analyse und den Vergleich wird eine Recherche zu marktverfügbaren und in der Entwicklung befindlichen Systemen durchgeführt.*

## 1.1 Mikro-KWK-Systeme

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bezeichnet die Wandlung eines Brennstoffs in mechanische Energie und Wärme. Die mechanische Energie wird dabei in der Regel direkt in elektrische Energie umgewandelt. Im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung, bei der die Wärme häufig nicht weiter genutzt wird, erreichen KWK-Anlagen durch eine kombinierte Erzeugung deutlich höhere Gesamtwirkungsgrade. Gegenüber einer getrennten Erzeugung von Strom und Wärme, lassen sich Brennstoffbedarfe, aber auch die Emissionen teils deutlich reduzieren. Die Abwärme kann beispielsweise direkt oder in Form von Fernwärme die Heizenergie für Industrie und Haushalte liefern oder als Prozesswärme verwendet werden.

Das Potenzial der Kraft-Wärme-Kopplung beschränkt sich nicht nur auf Großkraftwerke. Seit einigen Jahren werden dezentrale Anlagen in unterschiedlichen Leistungsklassen angeboten. Von Mikro-KWK-Anlagen mit wenigen Kilowatt über Mini-KWK-Anlagen und BHKW zu Großkraftwerken mit mehreren hundert MW an elektrischer Leistung, findet die Kraft-Wärme-Kopplung in vielen Größenordnungen Anwendung. Dieses Projekt untersucht den Einsatz von KWK-Geräten in Verbindung mit thermischen und elektrischen Speichern für die Sektoren Wohnen sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Diese Sektoren eignen sich aufgrund der Verbraucherstruktur besonders für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen, die in diesem Zusammenhang als Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 10 kW definiert werden.

Ein Großteil der KWK-Anlagen in Deutschland beruht technisch auf dem Prinzip des Ottomotors. Zudem werden Stirlingmotoren und vermehrt Brennstoffzellen eingesetzt. Zukünftig werden auch Mikrogasturbinen am Markt verfügbar sein. Prinzipiell lassen sich KWK-Anlagen mit einer Reihe von Brennstoffen betreiben. Im Bereich der Mikro-KWK hat sich Erdgas als Energieträger durchgesetzt. Das liegt vor allem an der einfachen Einbindung in bestehende Heizungssysteme, solange ein Gasanschluss vorhanden ist.

### 1.1.1 Ottomotorische Systeme

Ottomotorische KWK-Anlagen bilden den Großteil der am Markt verfügbaren Systeme. Sie basieren auf Verbrennungsmotoren der Automobilindustrie und sind daher seit Jahrzehnten in Kraftfahrzeugen erprobt und im Einsatz.

Die Verbrennung eines Brennstoffs sorgt im Motor dafür, dass Kolben in Zylindern bewegt werden. Diese Hubbewegung wird über den Pleuel und die Pleuelwelle als Drehbewegung an einen Generator übertragen und in Strom umgewandelt. Als stromerzeugende Heizung ist der

Einsatz von unterschiedlichen Brennstoffen möglich. Neben Heizöl und Erdgas können Flüssiggase, Klär- und Deponiegase sowie synthetische Gase genutzt werden. Während des Betriebs werden die Komponenten des Motorblocks der aus der Verbrennung entstehenden Wärme ausgesetzt. Diese muss abgeführt werden, um einen erhöhten Verschleiß und einen fehlerhaften Betrieb zu vermeiden. Die Abwärme aus dem Kühlkreislauf des Motors kann zusammen mit der über einen Wärmetauscher abgeführten Wärme der Abgase (abhängig von Brennstoff und Leistungsklasse bis über 600 °C [1]) und der überschüssigen Wärme aus einem Ölkreislauf genutzt werden, um neben Strom auch Wärme auszukoppeln. Die Leistung von ottomotorischen KWK-Anlagen reicht von etwa 0,5 kW bis ca. 20 MW. Dadurch sind neben der Anwendung von Mikro-KWK-Anlagen in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie im GHD-Sektor auch Anwendungen für die Industrie, in der Nah-, Fern- und Prozesswärme- oder der Quartiersversorgung möglich. Anlagen mit Leistungen unterhalb von 2 MW finden sich bereits in größeren Stückzahlen am Markt. Größere Anlagen bis zu einer Leistung von 20 MW bilden derzeit noch die Ausnahme [2].

Abhängig von der Größe, der Bauart und dem verwendeten Brennstoff, ergeben sich unterschiedliche Wirkungsgrade für ottomotorische KWK-Anlagen. Die elektrischen Wirkungsgrade liegen für erdgasbetriebene Anlagen mit weniger als 10 kW elektrische Leistung im Mittel bei etwa 26 %. Größere Anlagen erreichen höhere Wirkungsgrade. Im Leistungsbereich von 10 bis 100 kW liegt das Mittel bei rund 35 %. Anlagen bis 20 MW erreichen bis zu 45 %. Bei der Nutzung von Bio- und Klärgasen liegen die Wirkungsgrade geringfügig unterhalb derer mit Erdgasnutzung. Heizölanlagen erreichen dagegen leicht höhere Wirkungsgrade. Da der thermische Wirkungsgrad bei höheren elektrischen Leistungen sinkt ergeben sich für alle Anlagen etwa gleiche Gesamtwirkungsgrade. Diese liegen zwischen 86 und 93 % [2].

Die Stromkennzahlen von ottomotorischen KWK-Systemen geben das Verhältnis von thermischer zu elektrischer Leistung an. Anlagen im Bereich der Mikro-KWK-Erzeugung erreichen Stromkennzahlen von 0,21 bis 0,5, wobei Anlagen im höheren Megawatt Bereich Stromkennzahlen bis 1,1 aufweisen [2].

Verbrennungsmotoren weisen spezifische Emissionen auf, welche auf die Art der Energieumwandlung – in diesem Fall der Verbrennung – zurückzuführen sind. Vornehmlich treten neben Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Schwefeloxide (SO<sub>x</sub>) sowie Kohlenstoffmonoxid (CO) als Schadstoffe auf. Die zulässigen Ausstoßmengen werden durch die TA-Luft geregelt. Zur Abgasnachbehandlung werden meist Drei-Wege-Katalysatoren oder, in höheren Leistungsbereichen, auch Oxidationskatalysatoren verwendet. Damit werden die Vorgaben der TA-Luft meist deutlich unterschritten.

Neben den Schadstoffemissionen spielen auch die Schallemissionen eine entscheidende Rolle beim Definieren des Aufstellungsortes. Insbesondere wenn die Anlage nicht im industriellen Umfeld, sondern im Wohnsektor eingesetzt werden soll, ist die Lärmbelastung nicht zu vernachlässigen. Kleinere Anlagen bis ca. 50 kW zeichnen sich durch geringe Schallemissionen von 53 bis 69 dB(A) aus. In ausreichend gedämmten Kellerräumen stellt die Lärmentwicklung

damit kein Problem dar. Größere Anlagen erreichen jedoch bis zu 110 dB(A) und werden, falls die Lärmbelästigung zu groß ist, eingekapselt oder in speziellen Containern mit schalldämmenden Materialien aufgestellt [3].

Verbrennungsmotoren können vergleichsweise flexibel eingesetzt werden und bieten die Möglichkeit eines Teillastbetriebs. Dadurch lassen sich auch Zeiträume mit niedrigeren Bedarfen abdecken, ohne ein hohes Maß an Überschüssen zu produzieren. Aufgrund der verringerten Wirkungsgrade, sollte ein Teillastbetrieb jedoch eher die Ausnahme darstellen. Gegenüber anderen Systemen, insbesondere Brennstoffzellen, können ottomotorische Systeme bei Bedarf problemlos ganz abgeschaltet werden.

### 1.1.2 Stirlingmotoren

Stirlingmotoren arbeiten aufgrund der temperaturbedingten Volumenänderung des Arbeitsgases. Der Zylinder des Motors wird dazu durch einen Kolben in zwei Bereiche geteilt, die jeweils unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Anders als bei anderen Verbrennungsmotoren wird die Kolbenbewegung nicht durch die Verbrennung von Treibstoff im Zylinderraum erreicht, sondern durch das Zuführen von Wärme mittels einer externen Quelle. Diese sorgt dafür, dass die eine Seite des Zylinders erhitzt wird, die andere Seite bleibt jedoch durch das ständige Abführen von Wärme kalt. Das Arbeitsgas in dem abgeschlossenen Zylinder expandiert bei der Erwärmung und setzt durch den höheren Druck im heißen Bereich den Kolben in Bewegung. Das Gas kann dann in den kalten Bereich strömen, wo es gekühlt und das Volumen verringert wird. Dabei bewegt sich der Kolben zurück in die Ursprungsposition. Zur Verbesserung des Wirkungsgrads gibt es einen sogenannten Regenerator, welcher die Wärme des Arbeitsgases zwischenspeichert.

Eine externe Verbrennung kann so optimiert werden, dass die Emissionen verglichen mit der internen Verbrennung in Ottomotoren niedriger ausfallen. Nach dem Prinzip des Stirlingmotors arbeiten eine Vielzahl von unterschiedlichen Bauformen mit einer unterschiedlichen Zahl von Kolben und Zylindern und unterschiedlichen Geometrien. Als Arbeitsgase wird meistens das thermodynamisch günstige und gefahrenfreie Helium oder der einfacher zu speichernde Stickstoff verwendet.

Verglichen mit anderen Verbrennungsmotoren, sind die Wartungsintervalle eines Stirlingmotors wesentlich länger. Im eigentlichen Motor bilden sich keine Verbrennungsrückstände und es treten keine Schmierprobleme auf [4].

Der Stirlingmotor hat sich für KWK-Anwendungen in privaten Haushalten mit einer elektrischen Leistung von ca. 1 kW etabliert. Hierzu korrespondierend, steht je nach erzielbarer Stromkennzahl eine Nutzwärmeleistung von ca. 5 bis 7,5 kW zur Verfügung.

Prinzipbedingt können nur vergleichsweise niedrige Stromkennzahlen von  $\sigma = 0,17$  bis  $0,25$  erzielt werden. Trotz geringer elektrischer Wirkungsgrade im Bereich zwischen 13,9 und 15 %, kann bei optimaler Wärmenutzung ein Gesamtwirkungsgrad von bis zu 98 % und im Kondensationsbetrieb sogar bis zu 107 % realisiert werden [5].

Die externe Verbrennung kann ohne Beeinflussung des Prozesses soweit optimiert werden, dass niedrige Schadstoffemissionen ( $\text{CO}$  maximal bis  $40 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  bis  $70 \text{ mg/m}^3$  [5]) auch ohne aufwändige Abgasnachbehandlung erzielt werden können. Daraus erfolgen eine geringe Systemkomplexität und eine kompakte Bauweise.

KWK Anlagen mit Stirlingmotoren weisen Schallemissionen von 40 bis maximal 54 dB(A) auf, welche somit im Bereich von Brennstoffzellenheizgeräten liegen und im Vergleich zu Ottomotoren gleicher Leistungsklasse eine deutlich niedrigere Belastung darstellen.

### 1.1.3 Brennstoffzellen

Brennstoffzellen erzeugen im Betrieb, ebenso wie die zuvor beschriebenen Systeme, elektrischen Strom und Wärme. Die Art und Weise der Erzeugung basiert jedoch auf einem anderen physikalischen Prinzip. Der Brennstoff muss nicht erst verbrannt werden, um über die Bewegung von Kolben einen Generator anzutreiben. Vielmehr handelt es sich um einen elektrochemischen Prozess, bei dem der Brennstoff ohne den Umweg über die Wärme in elektrischen Strom umgewandelt wird. Die Brennstoffzellentechnologie zur hocheffizienten, elektrochemischen Stromerzeugung basiert auf der Umkehrung der Wasserelektrolyse. Die Reaktionspartner Wasserstoff und Sauerstoff reagieren unter der Abgabe von elektrischer Energie und Wärme zu Wasser. Bei Wasserdampf handelt es sich um die einzigen Emissionen des Systems. Zu beachten ist jedoch, dass eine Vielzahl von Brennstoffzellen nicht direkt mit Wasserstoff betrieben werden. In stationären Anwendungen wird das Erdgas häufig zuvor reformiert und in seine Bestandteile Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  aufgespalten. Dieser Vorgang kann durch einen vorgeschalteten Reformier oder eine in der Brennstoffzelle stattfindende, interne Reformation erfolgen. Der Wasserstoff reagiert im elektrochemischen Prozess zu Wasser, welches zusammen mit dem im Abgas abgeführt wird. Generell fallen die Emissionen verglichen mit anderen Erzeugersystemen geringer aus, da ein Großteil der Schadstoffe von klassischen Verbrennungsprozessen in der Flamme entstehen [6].

Verfügbare und in der Entwicklung befindliche Anlagen können nach der elektrischen Nennleistung hauptsächlich in zwei Segmente unterteilt werden. So genannte Brennstoffzellenheizgeräte (BZHG) adressieren mit einer elektrischen Leistung von bis zu 10 kW das Mikro-KWK Segment zur Versorgung von Wohngebäuden mit Strom und Raumwärme sowie Warmwasser. Blockheizkraftwerke (BHKW) mit bis zu einigen Megawatt elektrischer Leistung bedienen den KWK Sektor in den Bereichen Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) bzw. Industrie. Brennstoffzellen lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Bau- und Betriebsweisen in fünf bis sechs Technologien unterteilen. Hauptsächlich unterscheiden sich die Technologien durch den eingesetzten Elektrolyten, welcher wiederum für die Eigenschaften der Brennstoffzelle verantwortlich ist. Alkalische Brennstoffzellen (AFC) nutzen Kalilauge als Elektrolyt. Polymer-Elektrolyt-(PEFC) und Direkt-Methanol-(DMFC) Brennstoffzellen besitzen beide eine Kunststoffmembran. Phosphorsäure wird in Phosphorsäure-Brennstoffzellen (PAFC) eingesetzt. Brennstoffzellentypen, welche höhere Temperaturen erreichen, nutzen beispielsweise geschmolzenes Lithium- oder Kalziumcarbonat (MCFC) oder verwenden wie die Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) eine hitzebeständige Keramik als Elektrolyt. Die mit dem Brennstoffzellentyp

verbundenen, unterschiedlich elektrochemischen Reaktionen, haben Unterschiede der Arbeitstemperatur, der Anforderungen an den Brennstoff, der Trägheit beim An- und Abfahren sowie der erreichbaren Wirkungsgrade zur Folge. Manche Typen eignen sich aufgrund niedriger Temperaturen, der sehr kurzen Anfahrzeit und einer hohen Dynamik zum Einsatz in Fahrzeugen, in der Raumfahrt oder sogar in Mobiltelefonen. Andere Typen erreichen deutlich höhere Temperaturen, sind wenig dynamisch und daher eher für stationäre Anwendungen, beispielsweise der kombinierten Strom- und Wärmebereitstellung, geeignet. Abbildung 1.1 gibt eine Übersicht über die Brennstoffzellentypen und ihre korrespondierenden Eigenschaften.

	AFC	PEFC DMFC	PAFC	MCFC	SOFC		
Temperatur	niedrig	<100°C		bis 1000°C		hoch	
Kat. Material	edel	Platin			Metalle		Weniger edel
Gasanforderung	Reinstgase	4-5,0 H <sub>2</sub>			C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>		Weniger rein
Zell-Wirkungsgrad	niedrig	40-50%			50-60%		hoch
Systemkomplexität	hoch	Reformer			Interne Ref.		niedrig
Start-Up-Time	sofort	Sekunden			Stunden		hoch
Dynamik	hoch						niedrig

Abbildung 1.1: Übersicht Brennstoffzellentechnologien [7]

Abhängig von der Technologie und deren Eigenschaften, werden im Vergleich zu anderen KWK-Anlagen unter Umständen höhere Anforderungen an den Brennstoff gestellt. Alle Brennstoffzellentypen können mit Wasserstoff betrieben werden. Dieser muss dafür zunächst hergestellt, transportiert oder gelagert werden. Im stationären Sektor der dezentralen Energieversorgung von Wohngebäuden, GHD und Industrie, sind Wasserstoffleitungen und -speicher jedoch die Ausnahme. Aus diesem Grund haben sich für dieses Anwendungsgebiet vor allem Zelltechnologien durchgesetzt, die auch mit weniger reinen Gasen betrieben werden können. MC- und SO-Brennstoffzellen sind, bedingt durch die hohen Temperaturen, in der Lage zugeführtes Erdgas in einem internen Reformationsprozess in Wasserstoff und CO<sub>2</sub> aufzuspalten. Sie eignen sich daher besonders zum Einsatz in der bestehenden Erdgasinfrastruktur und stellen die deutliche Mehrheit aller verbauten Brennstoffzellensysteme im Gebäudesektor.

Die Startzeiten von brennstoffzellenbasierten KWK-Anlagen hängen ebenfalls vom Brennstoffzellentyp aber auch von der System- bzw. Leistungsgröße ab. Im Vergleich zu konventionellen KWK-Technologien, weisen Brennstoffzellensysteme insbesondere den Vorteil auf, hohe

Stromkennzahlen auch im kleinen Leistungsbereich erreichen zu können. Sie werden daher bevorzugt dort eingesetzt, wo größere Mengen Strom benötigt werden. Stromkennzahlen zwischen 0,5 und 2,46 verdeutlichen, dass eine Brennstoffzelle im Vergleich zu motorischen KWK-Systemen teilweise deutlich mehr Strom als Wärme bereitstellt. So können hohe Jahresnutzungsgrade und in Kombination mit Wärmespeichern hohe Wärme-Deckungsgrade erzielt werden. Hohe elektrische Wirkungsgrade von bis zu 60 % und Gesamtwirkungsgrade von über 90 % sowie ein nahezu schadstoffemissionsfreier und geräuscharmer Betrieb können, anders als bei motorischen BHKW, bereits bei geringen Leistungen erreicht werden [8].

Brennstoffzellen mit elektrischen Leistungen bis 10 kW sind bereits am Markt erhältlich, verglichen mit motorischen Mikro-KWK-Systemen jedoch relativ neu. Systeme für BHKW-Anwendungen ab einer elektrischen Leistung von 100 kW sind ebenfalls verfügbar. Bei derartigen Anlagen, die in der Regel als Containerlösung aufgebaut werden, ist der Einsatzbereich vielfältig und vornehmlich in dem Bereich GHD sowie kleinerer Industrieanwendungen angesiedelt. [9]

### 1.1.4 Vergleich der Mikro-KWK-Systeme

In Tabelle 1.1 sind die drei zuvor beschriebenen Systeme mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften dargestellt. Die tabellarische Darstellung dient der Kurzübersicht und dem Vergleich der Systeme untereinander.

Tabelle 1.1: Vergleich der Mikro-KWK-Technologien

Mikro-KWK-Systeme			
	Ottomotor	Stirlingmotor	Brennstoffzelle
Elektrische Leistung	0,3 bis 10 kW [2] [9]	0,7 bis 1 kW [5]	0,3 bis 5 kW [8]
Thermische Leistung	2,5 bis 23,3 kW [2]	2,2 bis 20 kW [5]	0,61 bis 7,5 kW [8]
Elektrischer Wirkungsgrad	19 bis 29,7 % [2]	12,0 bis 28,6 % [5]	32 bis 60 % [8]
Thermischer Wirkungsgrad	56,5 bis 81,8 % [2]	62,8 bis 92,4 % [5]	25 bis 72 % [8]
Gesamtwirkungsgrad	82,1 bis 108,6 % [2]	91,4 % bis 107,4 % [5]	85 bis 104 % [8]
Stromkennzahl	0,21 bis 0,50 [2]	0,17 bis 0,45 [5]	0,43 bis 2,46 [8]
Emissionen (NO <sub>x</sub> /CO)	50 bis 350 mg/Nm <sup>3</sup> / 11 bis 550 mg/Nm <sup>3</sup> [3]	29,9 bis 134,2 mg/Nm <sup>3</sup> / 2,9 bis <100 mg/Nm <sup>3</sup> [5]	10 mg/Nm <sup>3</sup> / 150 mg/Nm <sup>3</sup> [10]
Schall (dB(A))	53 bis 59 dB(A) [3]	< 40 bis 54 dB(A) [5]	46 dB(A) [10]

## 1.2 Thermische Speicher

Thermische Speicher dienen der Zwischenspeicherung von Wärme, um diese zu einem von der Wärmeproduktion abweichenden Zeitpunkt nutzen zu können. Gleichzeitig erlaubt eine Zwischenspeicherung eine kleinere Dimensionierung der Wärmeerzeuger sowie deren verlängerte Laufzeiten, was einer Erzeugung mittels Kraft-Wärme-Kopplung zugutekommt. Im kleinen Maßstab werden thermische Speicher vor allem im Bereich der Raumwärme- und Trinkwarmwasserbereitstellung eingesetzt. Die Speicher sind leicht zu skalieren und können daher bei ähnlicher Bauweise auch in Fernwärmenetzen eingesetzt werden.



Aufgabe eines jeden Wärmespeichers ist es, die Versorgung der angeschlossenen Verbraucher bei Spitzenlasten oder einer zeitlichen Differenz von der Wärmeerzeugung und –Nutzung sicherzustellen. Sensible Speicher verändern dazu mess- und fühlbar die Temperatur des jeweiligen Speichermediums. Als Speichermedium sind theoretisch viele Materialien und Stoffe geeignet, für den Einsatz in einem Heizungssystem hat sich jedoch Wasser als geeignetstes Speichermedium etabliert. Wasser ist günstig und besitzt mit einer spezifischen Wärmekapazität von rund  $4,2 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  eine höhere Kapazität als beispielsweise Luft mit rund  $1,0 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , Ziegel mit etwa  $0,84 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  oder andere flüssige oder gasförmige Materialien. Die Energiedichte für Wasser unterhalb von  $100 \text{ °C}$  liegt bei ca.  $60 \text{ kWh}/\text{m}^3$  [11]. Zudem eignet sich Wasser als Flüssigkeit nicht nur zum Speichern der Wärme, es wird auch als Transportmedium zur Verteilung im Heizkreislauf eingesetzt. Speichermedien, die weder flüssig noch gasförmig sind, müssten über einen Wärmetauscher mit dem Transportmedium in Kontakt gebracht werden. Dies erfordert weitere Komponenten im Heizungssystem und verringert dadurch den Systemwirkungsgrad.

Kleinere Speicher, in der Regel zwischen 100 und 1.500 Liter groß, werden im Wohnsegment und in kleinen bis mittelständigen Unternehmen zur Wärmespeicherung eingesetzt und sind seit langem am Markt etabliert. Reine Heizungspufferspeicher bestehen aus Stahl. Speicher die Trinkwarmwasser enthalten werden dagegen aus korrosionsbeständigem Edelstahl oder emailliertem Stahl hergestellt. Sensible Speicher mit deutlich größerem Volumen, für die industrielle Wärmespeicherung oder den Einsatz in Fernwärmenetzen, sind meist Sonderanfertigungen und werden je nach Größe aus Stahl oder Beton hergestellt.

Unabhängig von Größe und Material des Speichers, müssen sensible Wärmespeicher gedämmt werden. Geschieht dies nicht, wird die gespeicherte Wärme über die gesamte Oberfläche des Speichers an die Umgebung abgegeben, bis ein gemeinsames Temperaturniveau erreicht ist. Um diese Wärmeverluste möglichst gering zu halten, werden Dämmungen aus Stoffen wie Polyurethan Hart- oder Weichschaum, Melaminharzschaumstoff, thermostabilisiertem EPS oder Polyesterfaservlies verwendet. Häufigste Anwendung im kleineren Maßstab finden die Hart- und Weichschaumdämmungen. Wichtig ist, neben einer gewissen Brandsicherheit, vor allem die Wärmeleitfähigkeit des Materials. Diese liegt bei den beschriebenen Dämmstoffen zwischen  $0,024$  und  $0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung ist von der Dicke der Dämmschicht abhängig. Speicher mit Polyurethan-Hartschaum-Dämmung benötigen bei gleichen Dämmeigenschaften mit 5-8 cm eine geringere Dämmschicht als Polyurethan-Weichschaum-Dämmungen, da die Wärmeleitfähigkeit des Hartschaums mit  $0,024 - 0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  geringer als die des Weichschaums mit  $0,039 - 0,040 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  ausfällt [12]. Die Dämmschicht einer Weichschaum-Dämmung ist daher etwa 8-10 cm dick. Vorgaben zur Auslegung von Trinkwarmwasserspeichern, insbesondere zu den verwendeten Materialien, den Dämmmaßnahmen und der Korrosionsbeständigkeit werden in der DIN 4753-11 beschrieben.

Ein wesentlicher Qualitätsfaktor eines Wärmespeichers ist dessen Fähigkeit Wärme möglichst verlustfrei speichern zu können. Für Warmwasserspeicher werden deshalb eine Wärmeverlustrate und ein Bereitschaftsenergieverbrauch angegeben. Die Wärmeverlustrate gibt an, welcher Wärmestrom je Kelvin Temperaturunterschied an die Umgebung abgegeben wird. Dieser Wert ist stark von dem Volumen des jeweiligen Speichers abhängig, da mit größerem Volumen auch die Oberfläche zunimmt. Für die gängigsten Speicher in der Größenordnung von 100 bis 1.500 Litern, können Wärmeverlustraten zwischen 1,7 und 5,2 W/K angenommen werden [13]. Der Bereitschaftsenergieverbrauch, auch Bereitschaftswärmeverlust genannt, gibt zusätzlich die Wärmeverluste eines beladenen Speichers über den Zeitraum von 24 Stunden an. Zu beachten ist, dass bei der Berechnung des Wertes nur der Speicher an sich, ohne Verrohrung betrachtet wird. Die Berechnung des Bereitschaftsenergieverbrauchs kann der DIN 4753-7 entnommen werden und liegt für einen 1.000 Liter Speicher zwischen 3 und 5 kWh/d.

Kenngößen wie die Lade- bzw. Aufheizzeit werden ebenfalls von vielen Herstellern angegeben. Diese Daten lassen sich allerdings nur unzureichend vergleichen, da die Bedingungen zur Bestimmung nicht einheitlich festgelegt sind. Entscheidende Faktoren sind unter anderem die Leistung des Heizgeräts, die aktuelle und gewählte Speichertemperatur, die Umgebungstemperatur sowie das Volumen des Speichers. Sie reichen von wenigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden.

### 1.2.2 Latente Wärmespeicher

Latente Wärmespeicher nutzen, anders als sensible Wärmespeicher, nicht die Temperaturveränderung des Speichermediums zur Speicherung von Energie, sondern den Phasenübergang von unterschiedlichen Stoffen. Beim Übergang eines Stoffes in einen anderen Aggregatzustand wird, ohne eine nennenswerte Veränderung der Temperatur, Energie freigesetzt bzw. zur Veränderung des Zustands benötigt. In der Praxis werden häufig Phasenwechselmaterialien (*phase change materials* (PCMs)) mit einem Phasenübergang von flüssig zu fest und umgekehrt genutzt.

Aufgrund der Eigenschaften von Latentwärmespeichern, eignen sie sich zur verlustarmen Speicherung von Wärme über längere Zeiträume. Ein wesentlicher Unterschied für die Speicheranwendung ist die beinahe gleichbleibende Temperatur über die gesamte Betriebszeit. Die zugeführte Energie in Form von Wärme wird größtenteils für den Phasenwechsel genutzt. Aufgrund der stoffspezifischen Schmelztemperatur, lassen sich unterschiedlichste Temperaturbereiche und damit Einsatzgebiete durch unterschiedliche Materialien erzeugen, wodurch sich PCMs auch zum Kühlen eignen. Für Kältespeicher wird beispielsweise Wasser oder eine Salzlösung verwendet. Für Temperaturen zwischen 5 und 130 °C eignen sich besonders Paraffine und Salzhydrate. Temperaturen über 130 °C lassen sich mit Hilfe verschiedener Salze, wie Nitraten, Chloriden, Carbonaten, Fluoriden oder Mischungen aus diesen Stoffen, erreichen. In Zukunft werden dank dieser Materialien sogar Temperaturen bis etwa 330 °C möglich sein und dadurch weitere Einsatzbereiche ermöglichen [14].

Anwendungen für Latentwärmespeicher befinden sich größtenteils noch in der Versuchsphase. Ein Potenzial bietet dabei die Raum- und Gebäudeklimatisierung. Dazu können beispielsweise mit einem PCM gefüllte Mikrokapseln in Wände, Decken oder Böden eingebracht werden. In größeren Makrokapseln lässt sich das Material in Speichern einsetzen, die äußerlich klassischen Warmwasserspeichern ähneln und so beispielsweise in ein Heiz- oder Kühlsystem integriert werden.

Entscheidender Vorteil von Latentwärmespeichern gegenüber sensiblen Warmwasserspeichern ist die höhere Energiedichte, die bei Wasser bei rund  $60 \text{ kWh/m}^3$  liegt und bei latenten Wärmespeichern bis zu  $150 \text{ kWh/m}^3$  erreichen kann [15]. Damit ist es mit Hilfe von PCMs theoretisch möglich mehr als die doppelte Energiemenge eines Warmwasserspeichers in demselben Volumen zu speichern.

Abhängig von dem jeweiligen Einsatzgebiet, kann es von Nutzen sein den latenten Speicher zu dämmen. Anwendungen wie der Einbau in Wände und Decken benötigen keine Dämmung, da diese den Wärmefluss im Raum stören würde. Nutzt man allerdings ein Heizungssystem mit zentralem Wärmespeicher, ähnlich den klassischen Pufferspeichern, ist eine Dämmung nötig. Die Ausführung der Dämmung sowie die verwendeten Dämmmaterialien können dabei von sensiblen Speichern übernommen werden. Lediglich für Anwendungen mit Temperaturen über  $100 \text{ °C}$  sollte auf eine nicht brennbare und hitzebeständige Dämmung geachtet werden.

### 1.2.3 Thermochemische Wärmespeicher

Thermochemische Speicher unterscheiden sich wiederum von sensiblen und latenten Wärmespeichern. Sie nutzen eine exotherme Reaktion des Speichermediums, um Wärme abzugeben. Dazu werden Materialien wie Zeolithe, Silicagele oder Metallhydride mit Wasser oder Wasserdampf in Berührung gebracht. Das Material adsorbiert das Wasser und gibt dabei Wärme ab. Ist das Material vollständig mit Wasser gesättigt, kommt die Reaktion zum Erliegen. Das erneute Laden des Speichers erfordert, dass dem Material zunächst das aufgenommene Wasser entzogen wird. Bei diesem Vorgang wird es dafür stark erwärmt, sodass das enthaltene Wasser verdampft und abgeführt werden kann. Man spricht von Desorption. In diesem Zustand treten nahezu keine Wärmeverluste auf, solange sichergestellt ist, dass das Material nicht mit Wasser oder Wasserdampf aus der Umgebungsluft in Berührung kommt. Der Prozess ist beliebig oft wiederholbar, da er vollständig reversibel ist und sich das Speichermedium nicht abnutzt.

Anwendungen für einen thermochemischen Speicher befinden sich größtenteils noch in der Entwicklungsphase. Aufgrund der theoretisch sehr hohen Energiedichte von bis zu  $500 \text{ kWh/m}^3$ , bietet diese Technik ein großes Potenzial für die Wärmespeicherung, da beispielsweise klassische Warmwasserspeicher eine Energiedichte von rund  $60 \text{ kWh/m}^3$  aufweisen [16]. Die Technologie kommt jedoch bereits in einigen Wärmepumpen und in Spülmaschinen zum Einsatz. Hauptsächlich werden für diese Anwendungen Zeolithe verwendet. Sie bieten die passenden Temperaturniveaus und sind kostengünstig am Markt erhältlich.

Auf die Temperaturen muss auch bei der Dämmung geachtet werden. Speicher, die Silicagele als Medium verwenden, können genauso gedämmt werden wie herkömmliche Warmwasserspeicher, da die Temperatur maximal 100 °C erreichen. Zeolithe und Metallhydride erreichen jedoch Temperaturen zwischen 100 °C und 500 °C [16]. Bei derart hohen Temperaturen muss auf spezielle Dämmstoffe mit hoher thermischer Beständigkeit zurückgegriffen werden, sollten diese überhaupt für die Anwendung in Wohngebäuden geeignet sein.

### 1.2.4 Vergleich der thermischen Speichertechnologien

In Tabelle 1.2 sind die drei beschriebenen thermischen Speichertechnologien mit einigen vergleichbaren Eigenschaften dargestellt. Die tabellarische Darstellung dient der Kurzübersicht und dem Vergleich der beschriebenen Speichertechnologien.

Tabelle 1.2: Vergleich der thermischen Speichertechnologien

	Sensible Wärmespeicher	Latente Wärmespeicher	Thermochemische Wärmespeicher
Größe	Variabel (i.d.R. 100 bis 1.500 Liter)	Variabel (abhängig von Anwendung)	Variable (abhängig von Anwendung)
Spezifische Wärmekapazität (Speichermaterial)	Wasser: 4,182 kJ/(kg·K) [17]	Paraffine: 2,1 kJ/(kg·K) [18]	Zeolithe: 0,80 bis 0,90 kJ/(kg·K) [19] Silicagele: 0,92 bis 1,00 kJ/(kg·K) [19]
Energiedichte	60 bis 80 kWh/m <sup>3</sup> [17]	50 bis 150 kWh/m <sup>3</sup> [16] [20]	100 bis 500 kWh/m <sup>3</sup> [20]
Temperaturbereich	< 100 °C [16]	Paraffine: ca. 10 bis 60 °C [16] Salzhydrate: ca. 30 bis 80 ° [16]	Zeolithe: 100 bis 300 °C [16] [21] Silicagele: 40 bis 100 °C [16] [21]
Wärmeverluste	1,7 bis 5,2 W/K (DIN EN 12977-3) 1,19 bis 6,25 kWh/d (DIN 4753-8)	Nahezu verlustfrei [16]	Nahezu Verlustfrei [16]
Wärmeleitfähigkeit	0,597 W/(m·K) bei 20°C [17]	Paraffine: ca. 0,2 W/(m·K) [16] Salzhydrate: 0,6 bis 0,8 W/(m·K) [16]	Zeolithe: 0,58 W/(m·K) [19] Silicagele: 0,14 bis 0,20 W/(m·K) [19]
Dämmmaterial (bis 100 °C) mit Wärmeleitfähigkeit	Polyurethan Hartschaum Polyurethan Weichschaum Melaminharzschaumstoff Expandiertes Polystyrol (EPS) Polyesterfaservlies	0,024 bis 0,035 W/(m·K) [22] 0,039 bis 0,040 W/(m·K) [23] ungefähr 0,035 W/(m·K) [23] 0,032 bis 0,040 W/(m·K) [22] 0,034 bis 0,041 W/(m·K) [22]	

### 1.3 Elektrische Speicher

Elektrische Speicher erfüllen eine ähnliche Aufgabe wie thermische Speicher. Sie erlauben eine zeitlich von der Erzeugung differenzierte Nutzung von Strom durch die Zwischenspeicherung in einem Speicher. Elektrizität kann dazu in unterschiedlichen Formen zwischen gespeichert werden. Abbildung 1.4 zeigt eine Übersicht der verfügbaren Technologien, die es ermöglichen elektrische Energie zu speichern.

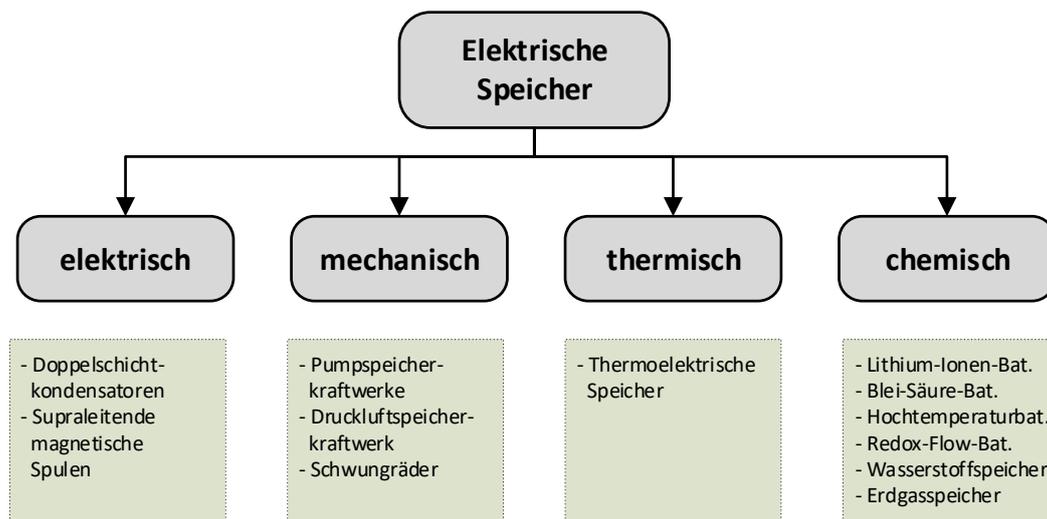


Abbildung 1.4: Übersicht der elektrischen Speichertechnologien

Der Großteil der dargestellten Speichertechnologien erlaubt keine direkte Speicherung von elektrischer Energie. Lediglich Kondensatoren und Spulen bieten die Möglichkeit der direkten Speicherung. Alle anderen Technologien erfordern eine Umwandlung der elektrischen in eine andere Energieform. Die nichtelektrischen Speicher lassen sich in mechanische, thermische und chemische Speicher aufteilen. Zu den mechanischen Speichern zählen beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher und Schwungräder. Soll elektrische Energie mit diesen Technologien gespeichert werden, muss sie zunächst über Motoren in potenzielle bzw. kinetische Energie umgewandelt werden. Bei der Entladung wird dann die jeweilige Energieform wieder zurück in elektrische Energie gewandelt. Thermische Speicher nutzen den Strom, um ein Medium wie Wasser oder Salz zu erwärmen. Bei der Rückverstromung kann dann, wie bei einem klassischen Kraftwerksprozess, Wasser verdampft und durch eine Turbine entspannt werden, um über mechanische Energie wieder elektrische Energie zu erzeugen. Chemische Speicher wandeln die zugeführte elektrische Energie in chemische Energie, wobei zwischen zwei Methoden unterschieden werden muss. Unter Zuhilfenahme der Elektrolyse lässt sich elektrische Energie in Wasserstoff umwandeln. Dieser kann in geeigneten Behältern zwischengespeichert werden oder in geringen Mengen bzw. vollständig nach dem Durchlaufen eines Methanisierungsprozesses ins Erdgasnetz eingespeist werden. Anschließend kann das erzeugte Gas in regulären Gasanwendungen, beispielsweise zur Erzeugung von Wärme und Strom, genutzt werden.

Eine andere Form der chemischen Speicherung stellen Batteriespeicher dar. Batteriespeicher bestehen aus galvanischen Zellen, die jeweils mindestens aus zwei verschiedenen Elektroden und einem Elektrolyten bestehen. Beim Beladen der Batterie wird die elektrische Energie in chemische Energie gewandelt, beim Entladen läuft der Prozess andersherum.

Die verschiedenen Speicherarten bringen aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften unterschiedliche Speicherdauern mit sich. Abbildung 1.5 gibt einen Überblick über die Speicherdauer der jeweiligen Technologien.



Abbildung 1.5: Speicherdauer der verschiedenen elektrischen Speicher

Wie lange ein Speicher seine Ladung halten kann, hängt von der Selbstentladung des Systems ab. Schwungräder beispielsweise entladen sich verhältnismäßig schnell, Gase dagegen können in einem abgedichteten Speicher besonders lange und nahezu verlustfrei gespeichert werden.

Der Einsatz von elektrischen Speichern in Kombination mit KWK-Anlagen soll den Eigendeckungsgrad erhöhen und den Netzbezug sowie die Stromkosten reduzieren. Im Wohn- und GHD-Sektor müssen die Speicherdauern von einigen Stunden bis zu wenigen Tagen reichen. Gleichzeitig darf die verbaute Technik nicht zu teuer, wartungs- oder platzintensiv sein. Aus diesem Grund haben sich Batterien als mögliche Speichertechnologie herausgestellt. Verglichen mit anderen Technologien, sind sie bereits in größeren Stückzahlen erhältlich, technisch erprobt und vergleichsweise günstig.

Im Folgenden werden die gängigsten Batteriespeicher aufgelistet. Einige sind bereits in anderen Märkten etabliert, andere befinden sich noch in der Erprobung.

### 1.3.1 Blei-Säure-Batterien

Blei-Säure-Batterien zählen zu den ältesten und bis vor kurzem meist verbauten Batteriespeichern. Eingesetzt werden sie vor allem als „Starterbatterien“ in Kraftfahrzeugen. In dieser Funktion sind sie jedoch auf kurzzeitig hohe Ströme ausgelegt und daher nicht für den Einsatz in Speicheranwendungen optimiert. Seit geraumer Zeit sind jedoch auch Blei-basierte Batterien zur Notstromversorgung und in Inselanlagen im Einsatz.

Typische Blei-Säure-Batterien besitzen eine negative Blei- und eine positive Bleioxidielektrode. Als Elektrolyt wird verdünnte Schwefelsäure verwendet, die entweder in einer wässrigen Lösung oder in moderneren Blei-Gel- oder Blei-Vlies-Batterien gelförmig vorliegt. Die moderneren Bauarten bieten den Vorteil, dass die Batterie nicht mehr zwangsläufig aufrechtstehend

verbaut werden muss. Sie ist daher flexibler einzusetzen und weist außerdem einen verringerten Wartungsaufwand auf. In Blei-Säure-Batterien kommt es aufgrund des hohen Wasseranteils im Elektrolyten bei hohen Ladungszuständen zur Bildung von Wasserstoff. Verdampfen des Wasser und Wasserstoff werden aus Sicherheitsgründen an die Umgebung abgegeben. Dieser Vorgang lässt sich nicht vermeiden, stellt jedoch bei ausreichend belüfteten Aufstellungsorten keine Gefahr dar. Als Resultat daraus muss in regelmäßigen Abständen eine Wartung durchgeführt werden, die sich jedoch meist auf das Nachfüllen von destilliertem Wasser beschränkt. Die Nennspannung einer Blei-Säure-Batterie beträgt 2 V.

Bleibatterien sollen immer ausreichend geladen sein, um eine Tiefenentladung zu vermeiden. Kommt es zu einer Tiefenentladung, kann die Nutzkapazität deutlich verringert werden.

Die Materialien zum Bau von bleibasierten Batterien sind umweltschädigend und teilweise toxisch. Dem wirkt jedoch eine hohe Recyclingrate entgegen.

Detaillierte Kennzahlen zu Blei-Säure-Batterien finden sich in Tabelle 1.3.

### 1.3.2 Lithium-Ionen-Batterien

Die Lithium-Ionen-Batterie ist der mit Abstand am meisten eingesetzte Batteriespeicher in mobilen Anwendungen. Durch eine vergleichsweise hohe Energiedichte können Lithium-Ionen-Batterien kleiner als andere Batterietechnologien dimensioniert werden. Mit der Einführung von Mobiltelefonen, Laptops und Tablets sowie Geräten, bei denen die Portabilität und die mobile Stromversorgung ein entscheidendes Kaufkriterium ist, wurde der Entwicklungsaufwand für lithiumbasierte Batterien stetig erhöht. In jüngster Vergangenheit ist mit der Entwicklung und Massenfertigung von Elektrofahrzeugen ein weiteres Anwendungsfeld entstanden, welches eine hohe Nachfrage nach kompakten Batterien mit hoher Energiedichte aufweist.

Der stationäre Einsatz verlangt nicht nach besonders kompakten Speichern. Prinzipiell darf ein Speicher daher größer und schwerer ausfallen als in mobilen Anwendungen. Lithium-Ionen-Batterien könnten bei einer steigenden Nachfrage auf anderen Märkten und den damit verbundenen Preissteigerungen, insbesondere für den Rohstoff Lithium, für den Einsatz im Wohn- und GHD-Sektor ausscheiden. Dieses Szenario hängt jedoch stark von der Entwicklung der Elektromobilität ab.

Lithium-Ionen-Batterien besitzen eine Kathode aus einem Lithium-dotierten Metalloxid auf einer beschichteten Aluminiumfolie als Stromsammler. Die negative Elektrode (Anode) besteht aus Graphit auf einer beschichteten Kupferfolie. Bei der Kathode können verschiedene Metalloxide, wie z.B. Lithiummanganoxid ( $\text{LiMnO}_4$ ), Lithiumeisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ) oder Lithiumcobaltoxid ( $\text{LiCoO}_4$ ) eingesetzt werden. Als Elektrolyt können verschiedenste Kombinationen verwendet werden. Häufig wird ein Gemisch aus organischen Carbonaten, wie z.B. Dimethylcarbonat (DMC) oder Ethylencarbonat (EC), das mit einem Leitsalz, wie z.B. Lithiumhexafluorophosphat ( $\text{LiPF}_6$ ) versetzt wurde, genutzt. Es gibt aber auch Bestrebungen, die organischen Carbonate durch ionische Flüssigkeiten zu ersetzen.

Gegenüber anderen Batterietechnologien bestechen lithiumbasierte Batterien durch eine hohe Energiedichte und eine geringe Selbstentladung. Sie können verhältnismäßig tief entladen werden und weisen hohe Wirkungsgrade auf. Als negativ ist der, trotz sehr großer Produktionskapazitäten, hohe Preis für Lithium-Ionen-Batterien einzustufen. Hersteller versuchen die Kosten durch immer größere Stückzahlen und einen hochgradig automatisierten Herstellungsprozess zu senken.

Detaillierte Kennzahlen zu Lithium-Ionen-Batterien finden sich in Tabelle 1.3 auf Seite 28.

### **1.3.3 Hochtemperatur-Batterien**

Hochtemperatur-Batterien weisen, anders als andere Batterietechnologien, eine hohe Betriebstemperatur auf. Sie werden als Natrium-Schwefel (NaS)- und Natrium-Nickelchlorid (Na-NiCl<sub>2</sub>)-Batterien angeboten und unterscheiden sich durch den festen Elektrolyten von anderen Batterien, die mit einem flüssigen Elektrolyten ausgestattet sind. Die aktiven Massen der Batterie sind im ungenutzten Zustand ebenfalls fest, müssen für die Nutzung der Batterie jedoch verflüssigt werden. Eine ausreichend hohe Ionenleitfähigkeit wird durch die Verflüssigung bei Temperaturen zwischen 270-350 °C erreicht. Unterhalb dieses Temperaturbereichs ist ein Laden und Entladen nicht mehr möglich. Bei der Abkühlung der Batterie kann es zur Rissbildung innerhalb der Elektroden und dem Elektrolyten kommen. Eine Batterie dieser Bauart muss entsprechend gedämmt werden und sollte die notwendigen Temperaturen durch die eigene Reaktionswärme aufrechterhalten. Wird die Batterie jedoch weder Be- noch Entladen, verliert sie einen Großteil ihrer Wärme und muss über das Stromnetz nachheizen. Die Selbstentladung ist daher stark von der Nutzung abhängig und kann zu Stillstandzeiten durchaus hoch sein. Insbesondere klein dimensionierte Anlagen eignen sich daher nicht zur Eigenverbrauchsoptimierung. Größere Batterien weisen durch ein verbessertes Volumen- zu Oberflächenverhältnis geringere Verluste auf. Neben den hohen Verlusten stellen die hohen Temperaturen ein höheres Sicherheitsrisiko dar als andere Batteriespeicher.

Detaillierte Kennzahlen zu Hochtemperatur-Batterien finden sich in Tabelle 1.3 auf Seite 28.

### **1.3.4 Nickel-Metallhydrid-Batterien**

Nickel-Metallhydrid-Batterien basieren auf den mittlerweile, aufgrund des toxischen Schwermetalls Cadmium, nicht mehr zugelassenen Nickel-Cadmium-Batterien. Die negative Elektrode wird daher, statt mit Cadmium, mit einem nickelbasierten Metallhydrid legiert. Als Elektrolyt wird eine wässrige Kalilauge verwendet.

Nickel-Metallhydrid-Batterien reagieren empfindlich auf hohe Temperaturen und Überladungen. Treten diese Bedingungen auf, kommt es zu irreversiblen Alterungserscheinungen. Hohe Ladezustände können über die Wasserelektrolyse zur Bildung von Wasserstoff führen. Kommt es zu einem Überdruck in den Zellen, besteht die Gefahr des Berstens. Sicherheitsventile verhindern dies, erfordern jedoch, neben einer Belüftung des Aufstellraums, ein regelmäßiges Nachfüllen von destilliertem Wasser. Werden die Batterien im optimalen Betriebszustand gehalten, sind sie dagegen vergleichsweise langlebig.

In stationären Anwendungen spielen Nickel-Metallhydrid-Batterien aufgrund der hohen Kosten und geringen Lebensdauer bei abweichenden Temperaturen und Ladezuständen kaum eine Rolle. Teilweise werden sie in tragbaren Geräten eingesetzt.

Detaillierte Kennzahlen zu Nickel-Metallhydrid-Batterien finden sich in Tabelle 1.3 auf Seite 28.

### 1.3.5 Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Batterien unterscheiden sich im Aufbau von anderen Batteriespeichern. Im Gegensatz zu blei- oder lithiumbasierten Systemen, liegt der Elektrolyt in flüssiger Form in baulich voneinander getrennten Tanks vor. Bislang werden vor allem Vanadium und Bromverbindungen als Elektrolyte eingesetzt. Soll die Batterie be- oder entladen werden, werden die flüssigen Elektrolyte durch aktive Pumpen an einer zentralen Reaktionseinheit vorbeigeführt. Diese besteht aus zwei Halbzellen, welche durch eine Membran voneinander getrennt sind. Solange die Pumpen die Flüssigkeiten nicht bewegen, findet keine Reaktion statt.

Die Kapazität einer Redox-Flow-Batterie kann durch die Dimensionierung der jeweiligen Elektrolyttanks bestimmt werden. Größere Tanks sorgen dabei für eine größere Speicherkapazität, wobei die Leistung der Batterie nicht durch die Tankgröße beeinflusst wird. Zur Anpassung der Leistung kann wiederum die Größe der Reaktionseinheit angepasst werden. Eine Redox-Flow-Batterie bietet damit die Möglichkeit vergleichsweise einfach und weitestgehend voneinander unabhängig Kapazität und Leistung zu variieren. Sie können daher besonders flexibel eingesetzt und an die jeweilige Anwendung angepasst werden.

Ein Vorteil der getrennten Lagerung der Elektrolyte und der Notwendigkeit von Pumpen zum Betrieb des Systems sind eine praktisch nicht relevante Selbstentladung bei Stillstand. Hinzu kommt eine hohe Effizienz. Beim Einsatz von Vanadium-Redox-Flow-Batterien kommt es aufgrund der vier verschiedenen Wertigkeiten von Vanadium und der damit verbundenen Möglichkeit Vanadium in beiden Elektroden zu verwenden nicht zu einer Verunreinigung der Elektroden durch Fremdionendiffusion. Eine irreversible Alterung der Elektroden tritt daher auch bei einer Tiefenentladung nicht auf, wodurch besonders hohe Lebensdauern zu erwarten sind. Die flüssigen und in separaten Tanks gelagerten Elektrolyte können einfach aus einem Tankwagen befüllt werden. Das macht die Installation einfacher und erlaubt, zumindest theoretisch, auch das Betanken von Fahrzeugen mit Redox-Flow-Batterien.

In der Praxis sind die Energiedichten derzeit am Markt befindlicher Systeme jedoch vergleichsweise gering und liegen in etwa auf dem Niveau von Bleibatterien. Zudem ergeben sich einige Probleme aus dem Einsatz von stark verdünntem Vanadium und Brom. So muss die Betriebstemperatur oberhalb des Gefrierpunktes liegen. Die eingesetzten Rohstoffe weisen zudem eine hohe Toxizität auf und sind im Vergleich zu anderen Batterien relativ teuer.

Detaillierte Kennzahlen zu Redox-Flow-Batterien finden sich in Tabelle 1.3 auf Seite 28.

### 1.3.6 Vergleich der elektrischen Speichertechnologien

In Tabelle 1.3 sind die zuvor beschriebenen elektrischen Speicher mit ihren unterschiedlichen, vergleichbaren Eigenschaften dargestellt. Die tabellarische Darstellung dient zusätzlich der Kurzübersicht der Batterien.

Tabelle 1.3: Vergleich der elektrischen Speichertechnologien [24] [25] [26] [27] [28] [29]

	Blei-Säure Batterie	Lithium-Ionen Batterie	Hochtempera- tur Batterie	Nickel-Metall- hydrid Batterie	Redox-Flow Batterie
Energiedichte	24 bis 60 Wh/kg	60 bis 250 Wh/kg	100 bis 165 Wh/kg	40 bis 110 Wh/kg	15 bis 50 Wh/kg
Leistungsdichte	10 bis 1.000 W/kg	270 bis 2.540 W/kg	100 bis 245 W/kg	163 bis 250 W/kg	20 bis 200 W/kg
Wirkungsgrad	70 bis 95 %	80 bis 99 %	68 bis 89 %	65 bis 75 %	60 bis 85 %
Lebensdauer (zyklisch)	500 bis 7.000	500 bis 15.000	1.700 bis 10.000	500 bis 3.000	> 10.000
Lebensdauer (ka- lendarisch)	5 bis 19 Jahre	5 bis 20 Jahre	5 bis 20 Jahre	2 bis 18 Jahre	>10 bis 20 Jahre
Max. Entladetiefe (DoD)	50 bis 100 %	Bis zu 100 %	80 bis 100 %	80 bis 100 %	100 %
Selbstentladung	2 bis 6 %/Mo- nat	0,4 bis 3 %/Monat	bis 100 %/Mo- nat  (Temperatur- verluste)	7,6 bis 20 %/Monat	0 bis 3 %/Mo- nat a)

## 2. Teilsystemfokussierung: Stromspeicher/ Batterietechnik

*Die Ergebnisse aus den post-mortem Analysen und Elektrolytuntersuchungen geben einen Hinweis darauf, dass für den Einsatz von Batteriespeichern mit Mikro-KWK Anlagen eher kleine Speicher in Betracht zu ziehen sind. Anhand der durchgeführten Zyklisierprozeduren kann gezeigt werden, dass der Eigennutzenanteil bei einer Speichergröße von 2 kWh bereits deutlich erhöht wird, was ebenfalls für den Einsatz von kleinen Speichern spricht.*

*Für die Lebensdauer von NMC-basierten Batterien sollte möglichst ein kontinuierliches Lade- und Entladeverhalten vorherrschen, was bei dem Ottomotor und Stirlingmotor gegeben ist. Es ist anzumerken, dass auch für die Brennstoffzellprozedur bei 40 °C keinerlei Alterung zu erkennen ist. Kürzere Standzeiten der Batterie haben demnach keinen Einfluss auf die Lebensdauer.*

*Die Anode aus NMC111-basierten Zellen unter Verwendung der Otto-prozedur bei 20 °C zeigt ein ausgeprägtes Wachstum von Lithium-Dendriten, somit einen schnelleren Zellverschleiß als bei 40 °C.*

*Bei LFP-basierten Batterien zeigte sich ein differenzierteres Ergebnis. Der Einsatz der Brennstoffzelle als KWK-Anlage führt zu einem geringer ausgeprägten Alterungsverhalten im Vergleich zum Einsatz eines Ottomotors und der jeweils resultierenden Zyklisierprozedur. Kürzere Standzeiten wirken sich ebenfalls nicht negativ aus. Die Erhöhung der Betriebstemperatur führte zu einer erhöhten Elektrolytzersetzung, weshalb der Einsatz bei 20 °C empfohlen wird.*

*Die Annahmen wurden auf der Grundlage getroffen, dass 90 % des Überschussstromes der Mikro-KWK-Anlage den Speicher erreichen. Sollte der Wert geringer sein, wirkt sich dies eventuell negativ auf die Lebensdauer aus. Die Zellen bei 40 °C Betriebstemperatur zeigten weniger Alterungsverhalten als Zellen bei 20 °C [30]. Als ein Ausgleich dieser Verlustreaktion könnte eine erhöhte Betriebstemperatur der Batterie angedacht werden. Die geringen Ströme können durch eine Erhöhung der Betriebstemperatur ausgeglichen werden [31].*

*Zusammenfassend ist der Ottomotor der Brennstoffzelle und dem Stirlingmotor vorzuziehen, da hier eine kontinuierliche Beladung und Entladung mit den höchsten Strömen zu erwarten ist. Generell lässt sich anmerken, dass die Lade- und Entladeströme, die die Batterie erfährt, erhöht werden können. Die höher gewählte Strombelastung für die Alterungsuntersuchungen von 1C als Maximalstrom (1C = 1 A bei 1 Ah) aus den Alterungsuntersuchungen, zeigen keine negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer der untersuchten Elektrodenaktivmaterialien. Dies lässt sich vermutlich durch variable BMS Systeme umsetzen, die besser an den Strommen-gen der Mikro-KWK Anlage angepasst sind.*

### 2.1 Definition der Anforderungen an die Batterien

Für den Einsatz in stationären Speichern wurden zunächst drei vielversprechende Kathodenaktivmaterialien unterschiedlicher Struktur ausgewählt: Das Olivin Lithium-Eisen(II)phosphat (LFP,  $\text{LiFePO}_4$ ), das Spinell Lithium-Mangan-Oxid (LMO,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) und das Schichtoxid Lithium-

Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC622,  $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ ). Die Aktivmaterialien werden mit Hilfe des organischen Lösungsmittels NMP (*N*-Methyl-2-pyrrolidinon) zur Prozessierung des Polyvinylidendifluorid-Binders (PVdF) und eines Leitadditivs (Leitruß zur Erhöhung der elektronischen Leitfähigkeit der Kompositelektrode) verarbeitet und elektrochemisch charakterisiert.

Die graphische Darstellung der Partikelgrößenverteilung der ausgewählten Aktivmaterialien ist im rechten Teil der Abbildung 2.1 dargestellt. Der linke Teil stellt die entsprechenden  $D_{50}$  und  $D_{90}$  Werte der untersuchten Pulver dar.

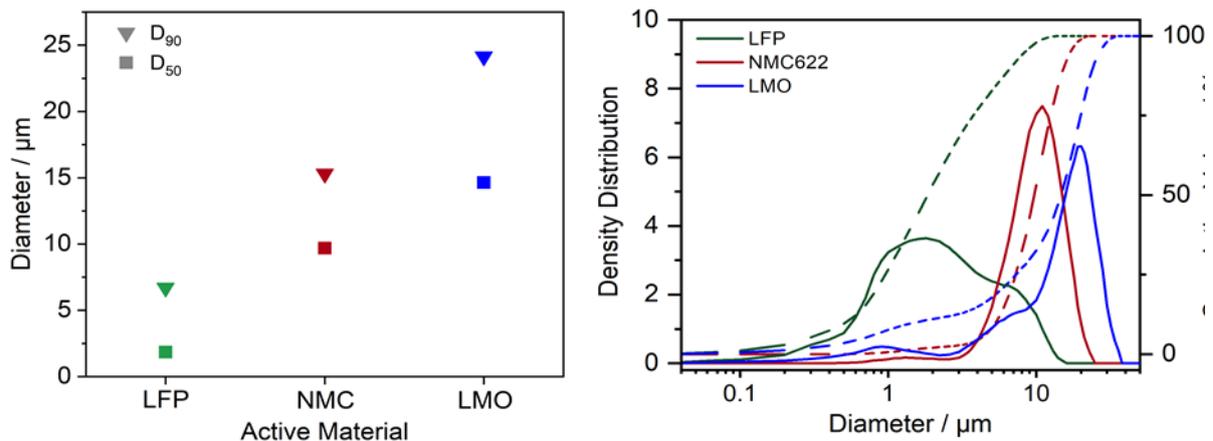


Abbildung 2.1: Partikelgrößenanalyse (PSA) der ausgewählten Aktivmaterialien LFP, NMC622 und LMO (links) mit jeweils  $D_{90}$  und  $D_{50}$ -Werten, kumulierte Werte der PSA sind in der rechten Abbildung dargestellt

Anhand des Verlaufs der Partikelgrößenverteilung im rechten Teil der Abbildung 2.1 beobachtet man die Häufigkeitsverteilung sowie die Spanne der verschiedenen Partikelgrößen der Aktivmaterialien. Die schmalen Partikelgrößenverteilungen für NMC622 und LMO um die Werte von  $10 \mu\text{m}$  bzw.  $20 \mu\text{m}$  weisen nur geringe Mengen kleinerer Partikel auf, welche größtenteils auf Bruchstücke/Primärpartikel der zugrundeliegenden Sekundärpartikel zurückzuführen sind. Im Vergleich zu diesen Materialien, zeigen die Partikel von LFP eine deutlich breitere Partikelgrößenverteilung zwischen  $0,2 \mu\text{m}$  und  $11 \mu\text{m}$ , was auf eine stark irreguläre Partikelgröße und -form hinweist. Dieser Umstand kann sich auf die Prozessierung der Elektroden sowie das elektrochemische Verhalten (Lebensdauer, Performance) auswirken. Daher werden die Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung bei der späteren Auswertung der elektrochemischen Daten berücksichtigt.

Die Untersuchung der Partikelmorphologie und -oberfläche sowie der Querschnitt der Elektroden basierend auf LFP, LMO oder NMC622 wird mittels Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

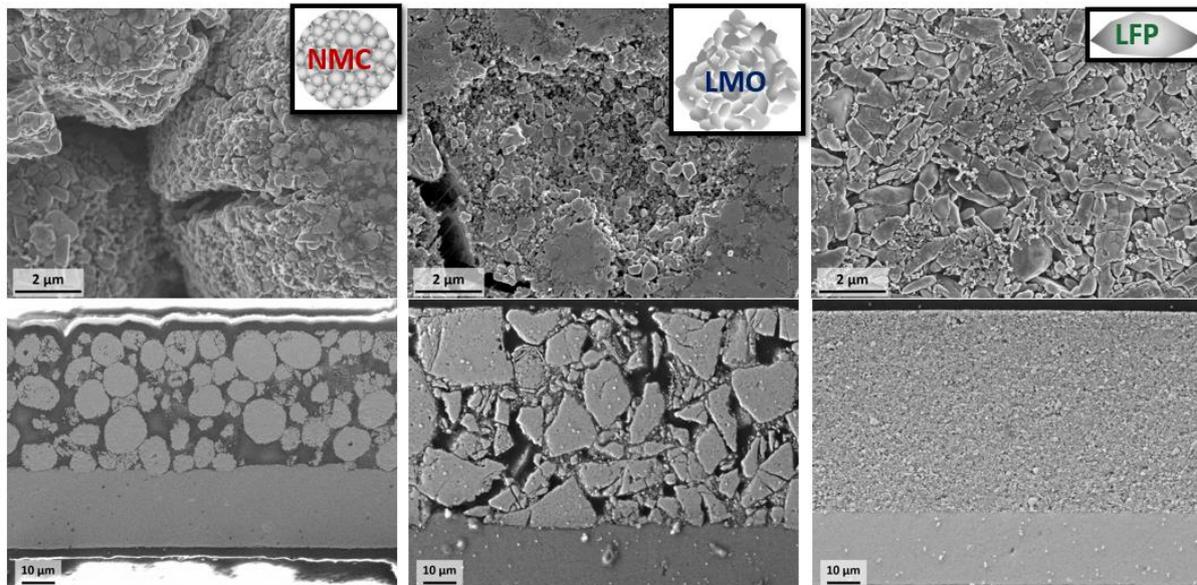


Abbildung 2.2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Partikel von NMC622, LMO und LFP-basierten Elektroden, oben: die einzelnen Partikel, unten: die Verteilung des Aktivmaterials in hergestellten Compositelektroden.

Im oberen Teil der Abbildung sind die detaillierten Ansichten der Primär- sowie Sekundärpartikel des jeweiligen Aktivmaterials dargestellt. Der untere Teil zeigt die Gesamtansicht der Verteilung der Aktivmaterialpartikel im Elektrodenquerschnitt. Hierbei kann festgestellt werden, dass die NMC622-Sekundärpartikel eine sphärische Form aufweisen, wobei die LMO-Sekundärpartikel eine stark irreguläre Morphologie aufweisen, welche sich deutlich auf die Porenstruktur in der Elektrode auswirkt und beim Verdichten der Elektrode auch zum Bruch der Partikel führen kann.

Im Gegensatz dazu liegen die LFP-Partikel als Primärpartikel vor und weisen eine reisförmige längliche Gestalt mit spitzen Enden auf. Angesichts dieser Erkenntnisse kann angenommen werden, dass sich die Morphologie der diskutierten Materialien wesentlich auf die Prozessierung der Elektrodenpaste auswirken wird. Im Fall von kleinen Primärpartikeln (LFP) muss die Lösungsmittelmenge deutlich höher angesetzt werden, um eine dispergierfähige Paste zu erzielen. Darüber hinaus erzeugen die deutlich kleineren Partikel des LFP ( $D_{50}$  und  $D_{90}$ -Werte, siehe Abbildung 2.1) eine wesentlich dichtere Elektrodenstruktur, kleinere Poren und eine höhere Tortuosität verglichen mit Elektroden basierend auf den Aktivmaterialien NMC622 oder LMO. Des Weiteren scheinen die Partikel zu Partikel Kontaktflächen in LFP-basierten Compositelektroden nicht optimal ausgebildet zu sein. Während des Kalandrierprozesses muss daher mehr Kraft (Linienlast) aufgewandt werden, um die Elektrode basierend auf verkanteten kleinen LFP Partikeln zu komprimieren, um somit sowohl die elektronische Leitfähigkeit aufgrund verbesserter Kontakte zu erhöhen als auch die Gesamtporosität der Elektrode einzustellen. Der Kalandrierprozess ist bei LFP zwingend notwendig, um einerseits den Kontakt zwischen den Aktivmaterialpartikeln zu erhöhen und andererseits auch den Kontakt zwischen Aktivmaterial und Leitruß sowie zwischen der gesamten Compositelektrode und dem Stromsammler zu

gewährleisten. Im Vergleich dazu müssen die NMC622-Elektroden durch Kalandrierung weniger stark verdichtet werden, da die sphärischen Sekundärpartikel durch ihre Morphologie eine bessere initiale Partikel zu Partikel Kontaktierung aufweisen. Einer der Vorteile der sphärischen Partikel ist die Tatsache, dass durch diese Partikel eine dichte Kugelpackung erreicht werden kann und die größeren Sekundärpartikel beim Kalandrieren der Kompositelektrode direkt in den Stromsammler eingedrückt werden und somit zur besseren elektronischen Kontaktierung der Kompositelektrode führen. Im Vergleich dazu müssen die reisförmigen LFP-Partikel intensiver dispergiert und mit mehr Aufwand kalandriert werden, um dadurch eine ausreichende elektronische Kontaktierung samt Binder und Leitruß zu gewährleisten.

Um den Einfluss der Porosität auf die Entladefähigkeit zu untersuchen, werden LFP-Elektroden mit unterschiedlichen Porositäten hergestellt und bei der Zyklisierung auf ihre C-Raten-Stabilität hin untersucht. Die LFP-Kathode wurde mit dem Mischverhältnis von 90,5 Gew.% Aktivmaterial (LFP), 3 Gew.% Leitruß und 6,5 Gew.% Binder hergestellt. Die Auswirkung der Porosität auf die Entladefähigkeit der LFP-Elektroden ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Die elektrochemischen Untersuchungen werden in einem 2-Elektroden-Setup gegen Graphit-basierte Gegenelektroden durchgeführt.

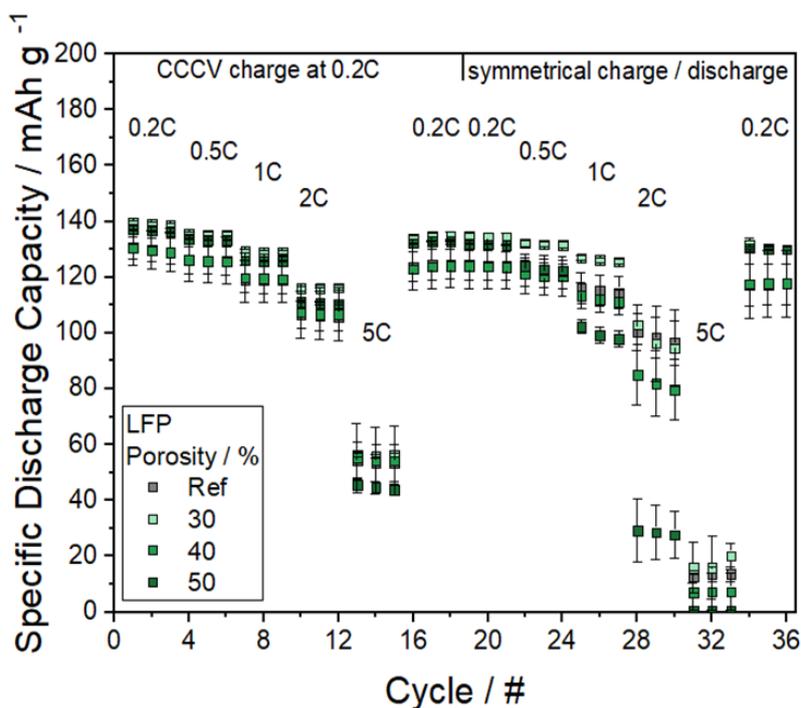


Abbildung 2.3: C-Ratenperformance der LFP-Kathoden mit dem LFP: Leitruß: Binder-Mischverhältnis von 90,5 : 3 : 6,5. Die Ergebnisse der Elektroden mit der unterschiedlichen Porosität (30, 40, 50 %) sind dargestellt. Die Vollzellen wurden im 2-Elektroden-Setup in Knopfzellen gegen Graphit zyklisiert.

Die spezifischen Entladekapazitäten der untersuchten LFP-Kathoden variieren in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades der Kathode: die Elektroden mit der höchsten Porosität (50 %) zeigen bei stark erhöhten C-Raten von 5C eine niedrigere spezifische Entladekapazität als die stärker verdichteten Elektroden. Dieser Sachverhalt basiert auf dem geringer ausgeprägten Kontakt

zwischen den Aktivmaterial- und Leitrußpartikeln. Die dadurch verursachte geringere elektronische Leitfähigkeit führt wiederum zu einer unzureichenden Effizienz innerhalb der Kompositelektrode und somit zur Absenkung der spezifischen Entladekapazität. Bei niedrigeren C-Raten bis 1C, wirkt sich dieser Effekt aufgrund der geringeren Stromdichten jedoch nur unmerklich auf die erreichte spezifische Entladekapazität aus.

Des Weiteren wird der Einfluss des Leitrußanteils auf die Entladefähigkeit der LFP- und NMC622-basierten Kathoden anhand unterschiedlicher prozentualer Anteile in der Elektrodenrezeptur evaluiert. Die Ergebnisse sind für beide Zellchemien in Abbildung 2.4 dargestellt.

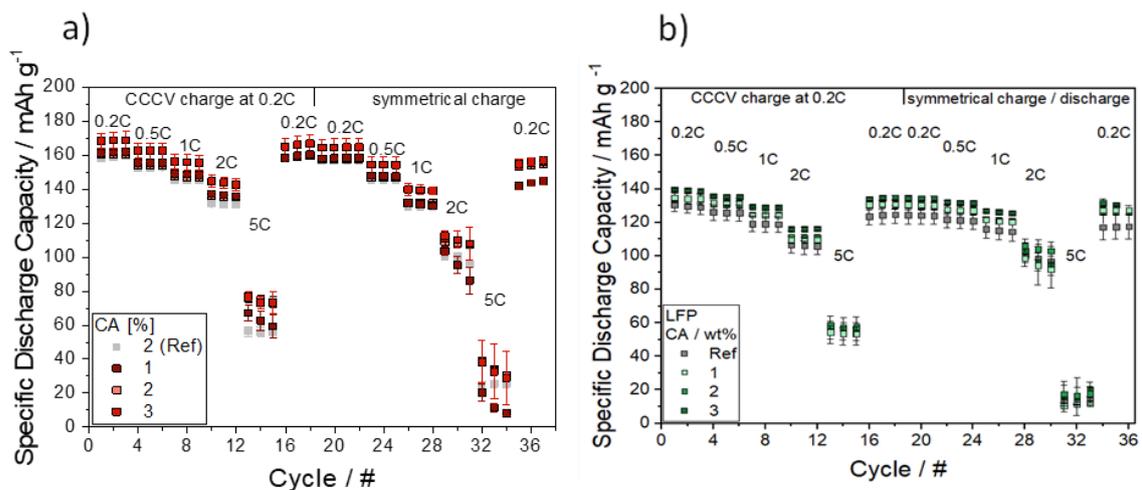


Abbildung 2.4: Einfluss des Leitrußanteils auf die Entladefähigkeit der a) NMC622- und b) LFP-basierten Kathoden. Der Leitrußanteil (CA-Anteil, CA= *Conductive Agent*) wurde im Verhältnis von 1 Gew.%, 2 Gew.% und 3 Gew.% variiert.

Der Anteil des Leitrußes wurde bei beiden Zellchemien im Bereich zwischen 1 Gew.% und 3 Gew.% variiert, um dessen Einfluss auf die Effizienz und Entladefähigkeit der Kompositelektroden zu untersuchen. Abbildung 2.4 a) zeigt die spezifische Entladekapazitäten der NMC622-basierten Kathoden, in Abhängigkeit vom Leitrußanteil. Bei höheren Leitrußanteilen (mit 3 Gew.%) werden geringfügig höhere spezifische Entladekapazitäten (*ca.* 5-10  $\text{mAh g}^{-1}$ ) erreicht. Dieser Einfluss nimmt mit steigender C-Rate zu, da hierbei neben der ionischen Leitfähigkeit der Kompositelektrode auch die elektronische Leitfähigkeit eine zunehmend große Rolle spielt, welche maßgeblich durch das Perkolationsnetzwerk aus Leitrußpartikeln beeinflusst wird.

Die LFP-Partikel (Abbildung 2.4 b)) zeigen hingegen keinen deutlichen Unterschied in der Entladefähigkeit bei der Veränderung des Leitrußanteils. Dieser Sachverhalt beruht darauf, dass die LFP-Partikel aufgrund ihrer geringen intrinsischen elektronischen Leitfähigkeit beim Herstellungsprozess mit einer leitenden Kohlenstoffbeschichtung versehen werden. Dementsprechend weisen die beschichteten Partikel einen Vorteil in Bezug auf die elektronische Leitfähigkeit auf, was zu einer weniger ausgeprägten Abhängigkeit vom Leitrußanteil führt.

Um diese Annahme zu bestätigen, werden Leitfähigkeitsuntersuchungen (*through-plane conductivity*) an den Elektroden durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

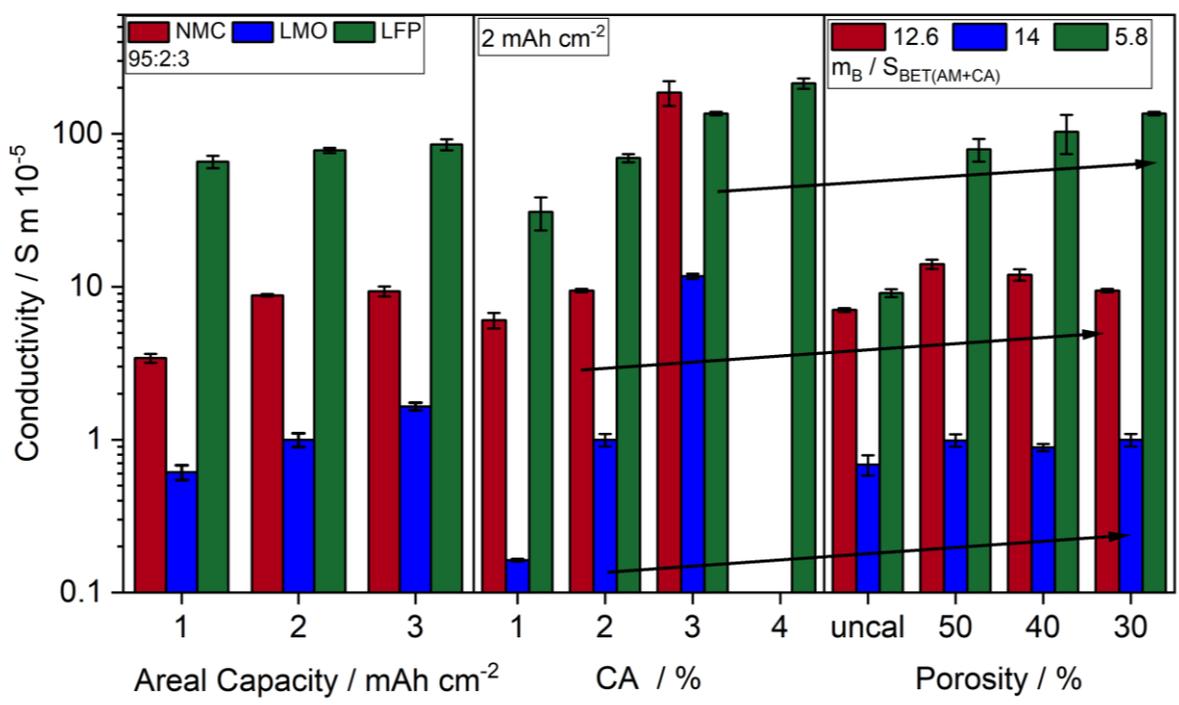


Abbildung 2.5: Ergebnisse der Leitfähigkeitsuntersuchungen in Bezug auf die unterschiedliche Flächenbelastungen für LFP, NMC622- und LMO-Kathoden.

Die Annahme der erhöhten elektronischen Leitfähigkeit der beschichteten LFP-Partikel und der darauf basierenden Kompositelektroden konnte durch diese Messungen bestätigt werden. In Abbildung 2.5 zeigen die LFP-basierten Elektroden, unabhängig von der Flächenkapazität und dem Leitrußanteil, eine konstant höhere elektronische Leitfähigkeit im Vergleich zu den NMC622-basierten Elektroden. Somit kann eindeutig belegt werden, dass die LFP-basierten Elektroden eine höhere intrinsische elektronische Leitfähigkeit aufweisen, die sich auch bei den elektrochemischen Untersuchungen durch höhere spezifische Entladekapazitäten und stabilere Ratenfähigkeit widerspiegelt.

Im Gegensatz zu dem Kohlenstoff-beschichteten LFP (cLFP) wirkt sich der Leitrußanteil und die Porosität (Kalandriergrad) der NMC622-basierten Kompositelektroden durch die vergleichsweise geringe elektronische Leitfähigkeit des reinen NMC622-Materials deutlich auf die elektronische Leitfähigkeit aus. Mit steigendem Leitrußanteil steigt somit auch die Leitfähigkeit kontinuierlich. Ab einem gewissen Grenzwert des Leitrußanteils liegt demnach ein vollständig ausgebildetes Perkolationsnetzwerk aus Leitrußpartikeln vor, welches sich in der Messung einer sehr hohen elektronischen Leitfähigkeit widerspiegelt (siehe Abbildung 2.4: 3 Gew.% Leitruß, CA).

Aus diesen Beobachtungen zeichnet sich ab, dass die LFP-basierte sowie die NCM622-Elektrodenmaterialien beide als vielversprechende Kandidaten für die Weiterverwendung in den stationären Speichern geeignet sind. Ausschlaggebend ist die angepasste Rezeptur der Kompositelektroden mit optimierter Rußverteilung, die eine verbesserte elektronische Leitfähigkeit und Verarbeitung der Elektrode gewährleisten [32].

## 2.2 Zelldefinition, -produktion und Anwendung der Bedarfsprofile

### 2.2.1 Zelldefinition und -produktion

Kommerziell werden Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid ( $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ , in dem hier betrachteten Fall  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ , oder NMC622) und LFP als Kathodenaktivmaterial in Betracht gezogen, weshalb nachfolgend Ergebnisse beider Kathodenaktivmaterialien präsentiert werden. Beide Verbindungen unterscheiden sich bezüglich ihrer Morphologie und strukturellen Eigenschaften. Dieser Umstand hat dementsprechend einen starken Einfluss auf das mechanische und elektrochemische Verhalten der entsprechenden Kompositelektroden.

Für die elektrochemischen Untersuchungen der Kathodenaktivmaterialien werden Anoden mit synthetischem Graphit unter Anwendung des Polyolefin-Separators in Knopfzellen mit 2-Elektroden-Setup verwendet. Als Elektrolyt dient eine Mischung aus 1M  $\text{LiPF}_6$ -Leitsalz in Ethylencarbonat (EC) mit Ethylmethylcarbonat (EMC) (Mischverhältnis 3:7 Gew.) mit 2 Gew.% Vinylencarbonat (VC) als Additiv.

Die Langzeitzyklisierungen in Abbildung 2.6 zeigt, dass der Leitrußanteil in der Rezeptur für LFP-basierte Elektroden einen höheren Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle hat als bei NMC622-basierten Elektroden. Dies kann auf die geringere intrinsische elektronische Leitfähigkeit und deutlich geringere Größe der LFP-Partikel, verglichen mit NMC, zurückgeführt werden.

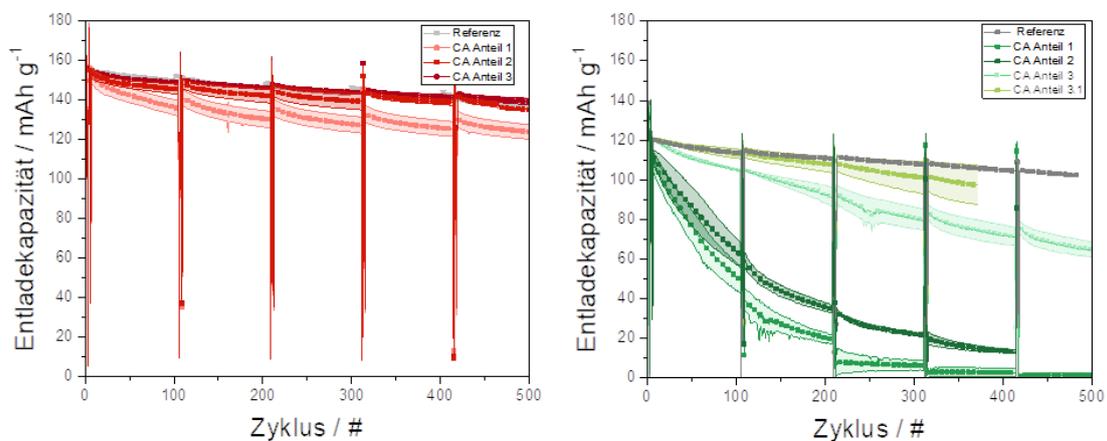


Abbildung 2.6: Einfluss des Leitrußanteils in der Elektrodenrezeptur auf die Langzeitzyklisierung bei 1C. Kathodenaktivmaterial NMC622 (rot) und LFP (grün) mit 1 – 3 Gew.% Leitruß zyklisiert gegen Graphit als Anode in Knopfzellen im 2-Elektroden-Setup. Flächenbelastung der Kathode: 2 - 2,3  $\text{mAh}/\text{cm}^2$ , Kapazitätsverhältnis Kathode:Anode (1:1,25)

Für das NMC622-Material kann der Leitrußanteil 2 (CA Anteil 2) als kritischer Anteil angesehen werden. Bei einer weiteren Reduktion des Leitrußanteils beeinflusst die abnehmende elektronische Leitfähigkeit der Kompositelektrode die elektrochemische Performance und somit die Lebensdauer. Bei LFP muss aus intrinsischen Gründen mehr Leitruß (CA) verwendet werden, um eine ausreichende Porosität der LFP-Elektroden zu gewährleisten. Daher ist hier CA-Anteil 3 als kritischer Wert zu sehen. Bei LFP Elektroden kommt bei gleicher Flächenkapazität hinzu, dass das Beschichtungsvolumen zunimmt. Aus diesem Grund sollte die Elektrolytmenge von 50  $\mu\text{L}$  (CA-Anteil 3) auf 70  $\mu\text{L}$  erhöht werden (siehe CA Anteil 3.1), um eine bessere Lebensdauer zu gewährleisten.

Demnach konnte in zwei Schritten zuerst der Binderanteil für NMC622- und LFP-Rezepturen und im zweiten Schritt der kritische Leitrußanteil bestimmt werden. Dadurch werden Elektroden mit einer Beschichtung von mehr als 2  $\text{mAh}/\text{cm}^2$  prozessiert, die eine optimierte elektrochemische Lebensdauer und Performance aufweisen.

Bei den dargestellten Zyklierungen (Abbildung 2.6) handelt es sich um eine Standardzyklisierungsprozedur mit einem Ladestrom von 0.2C und 1C Entladestrom. Die Entladekurven stellen den Durchschnitt von mindestens drei Zellen dar, der hell eingefärbter Bereich repräsentiert die Standardabweichung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die kritischen Anteile an Leitruß für die LFP- und NCM622-basierte Kompositelektroden bei 3 Gew.% für LFP (CA Anteil 3) und 2 Gew.% (CA Anteil 2) für NCM622-Kompositelektroden ausmachen. Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, beläuft sich das Verhältnis der Binder-Masse zu der spezifischen Oberfläche (BET AM+CA) für LFP-Kompositelektrode auf 5,8, damit weist dieses Material die geringste spezifische Oberfläche unter den untersuchten Materialien. Somit weisen die LFP-basierten Kompositelektroden den größten Binderanteil auf, um eine optimale Verarbeitung der Beschichtung zu gewährleisten.

### 2.2.2 Anwendung der Bedarfsprofile

Anhand der zur Verfügung gestellten Bedarfsprofile sollen passende Zyklierprozeduren erstellt werden. Ziel ist es, eine Aussage über das Alterungsverhalten aufgrund der eingesetzten KWK-Anlagen zu erhalten. Zur Reduzierung des Testumfangs und des dafür zur Verfügung stehenden Zeitraumes wurden Anpassungen bei der Umsetzung getroffen.

Da die gelieferten Bedarfsprofile nicht den realen Be- und Entlademenge an Strom entsprechen, mit welchen der Speicher be-/entladen wird, werden am MEET Berechnungen angestellt, um Strom-Zeit-Profile zu ermitteln, mit welchen anschließend Laborzellen zyklisiert werden.

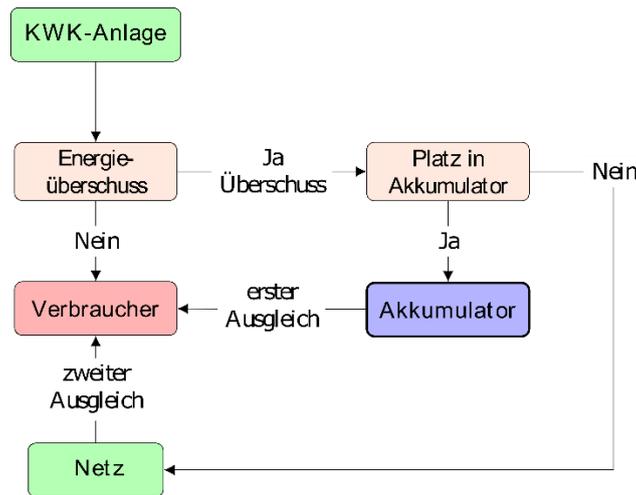


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung zur Verarbeitung der Bedarfsprofile von den KWK-Anlagen, um den realen Strom während der Lade- und Entladeprozesse zu berechnen.

Zur Berechnung der Belastungsprofile dient die Software MATLAB. Die Daten der Bedarfsprofile werden nach dem Schema in Abbildung 2.7 bearbeitet und es werden Abfragen erstellt. Sobald die KWK-Anlage mehr Strom produziert, als verbraucht wird, kann der Speicher (Batterie/Akkumulator) beladen werden. Sollte der Verbraucher Strom benötigen, der nicht von der KWK-Anlage zur Verfügung gestellt werden kann, wird dieser Strombedarf zuerst von dem Speicher, und sobald dieser leer ist, von dem Stromnetz bedient.

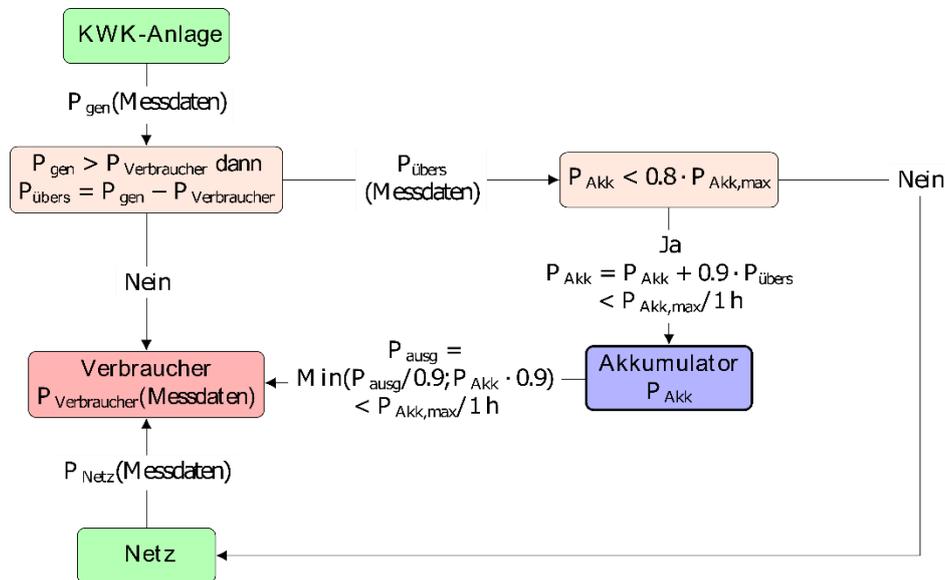


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung zur Verarbeitung der Bedarfsprofile von den KWK-Anlagen, um den realen Strom während der Lade- und Entladeprozesse zu berechnen.

Eine genauere Umsetzung dieser Annahmen ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Generelle Übertragungsverluste werden mit 10 % veranschlagt und die maximale Beladung des Speichers wird ebenfalls in MATLAB berücksichtigt [33]. Der Maximalstrom, mit dem die Speicher be- und entladen werden, wird auf 1C festgelegt [34].

Somit wurde es mithilfe von MATLAB ermöglicht, Strom-Zeit-Profile zu erstellen.

Innerhalb des Projektes werden drei verschiedene Typen von KWK-Anlagen eingesetzt, um Strom zu generieren. Darunter zählten Ottomotor, Brennstoffzelle und Stirlingmotor. Im Feldversuch kommen verschiedene Speichergrößen von 2 kWh bis 15 kWh, sowie verschiedene Zellchemien für die Batterien zum Einsatz. Da es im Rahmen des Projekts zeitlich nicht möglich war, alle Speichergrößen im Labormaßstab zu untersuchen, wurde mithilfe von MATLAB eine Auswahl von zwei möglichen Testszenarien festgelegt. Abbildung 2.9 zeigt, dass der Eigennutzenanteil bei allen Bedarfsprofilen eine Speichergröße von 2 kWh erheblich steigt, wohingegen die Steigung bei weiterer Zunahme der Speichergröße nur noch marginal vorhanden ist. Für die Alterungsuntersuchungen wird demnach die kleinste Speichergröße von 2 kWh zur Berechnung der Strom-Zeit-Profile gewählt.

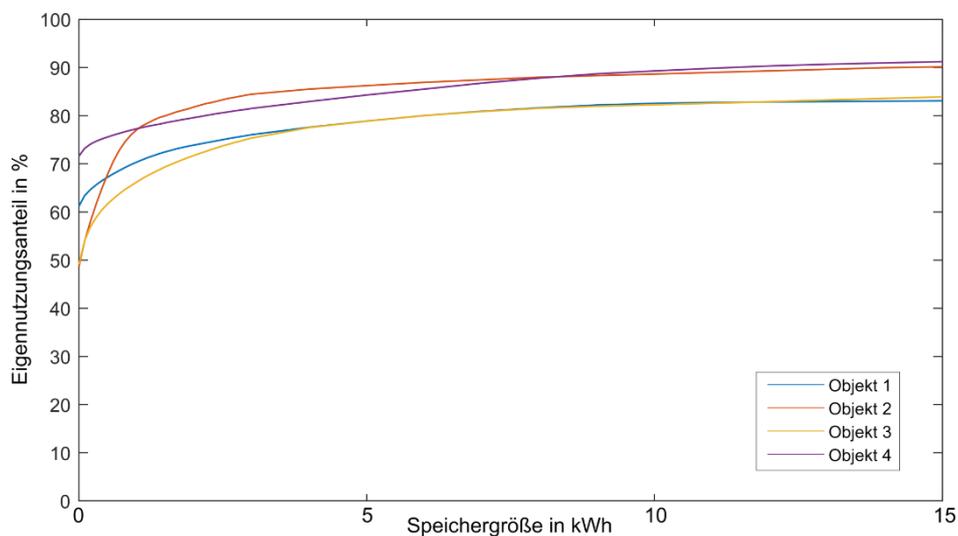


Abbildung 2.9: Eigennutzenanteil in Abhängigkeit der Speichergröße der zur Verfügung gestellten Bedarfsprofile

Nachdem eine Speichergröße für die Simulation der Strom-Zeit-Profile gewählt wird, muss noch ein Vergleich des Lade- und Entladeverhaltens der verschiedenen KWK-Anlagen erfolgen. Es zeigte sich, dass der Stirling-Motor die geringsten C-Raten aufweist und den Speicher somit am wenigstens belastet (siehe Abbildung 2.10). Die Profile des Ottomotors (Verbrennungsmotor) und der Brennstoffzelle unterscheiden sich zudem stärker, da zwischen den Be- und Entladungen des über Brennstoffzellen generierten Stroms mehr Pausen liegen. Außerdem sind hier die Peak-Belastungen stärker ausgeprägt.

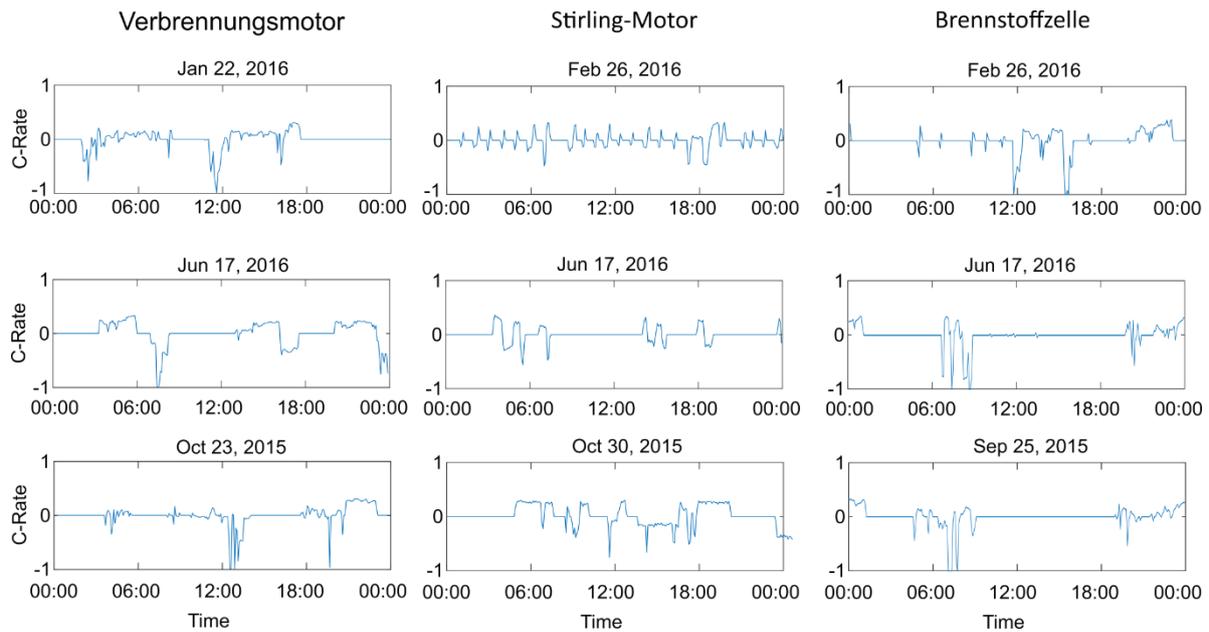


Abbildung 2.10: Vergleich der KWK-Anlage auf die Strom Zu- und Abnahme während eines Tages im Winter, im Sommer und in der Übergangszeit.

Die Untersuchungen führen zu dem Entschluss, die Rohdaten aus den Bedarfsprofilen für einen 2 kWh Speicher zu berechnen und das Alterungsverhalten von Ottomotor und Brennstoffzelle zu untersuchen, da hier größere Unterschiede und somit eine bessere Aussagekraft erwartet wird.

Hierbei werden die Strom-Zeit-Profile so berechnet, dass eine maximale C-Rate von 1C bei Be- bzw. Entladung erreicht wird, was einer höheren Strombelastung als im Testfeld entspricht, welche die Alterung somit begünstigen soll. Der Strom, der darüber hinaus von der KWK-Anlage produziert wird, wird nicht betrachtet. Die Zyklisierung wird über einen Zeitraum von vier Wochen durchgeführt. Eine Woche entspricht eines Bedarfsprofils der jeweiligen Jahreszeit (Frühling, Sommer, Herbst, Winter) um das unterschiedliche Lade- Entladeverhalten abzudecken.

Diesbezüglich wird eine Standard- (NMC111) und eine Projektzelle mit optimierter Rezeptur (LFP) untersucht. Zum einen wird eine Standardumgebungstemperatur der Testzellen von 20 °C ausgewählt und zum anderen 40 °C, um die kalendarische Alterung der Zellen innerhalb des 4-Wochenzeitraums zu beschleunigen. In Tabelle 2.1 sind die untersuchten Standardzellen, in Tabelle 2.1 die Projektzellen samt Kennzeichnung während der Alterungsuntersuchungen in den folgenden Kapiteln aufgelistet.

Tabelle 2.1: Auflistung der untersuchten Standardzellen NMC111 bei 20 und 40 °C mit der jeweiligen Kennzeichnung im weiteren Berichtsverlauf.

Zellnummer – NMC111	Angewandte Bedarf- profile der KWK Anlage	Ofentemperatur	Kennzeichnung
3, 9	Ottomotor	20 °C	Otto – 20 °C
4, 12	Brennstoffzelle	20 °C	Fuel – 20 °C
5, 10	Ottomotor	40 °C	Otto – 40 °C
6, 11	Brennstoffzelle	40 °C	Fuel – 40 °C

Tabelle 2.2: Auflistung der untersuchten Projektzellen bei 20 °C und 40 °C mit der jeweiligen Kennzeichnung im weiteren Berichtsverlauf.

Zellnummer – LFP	Angewandte Bedarf- profile der KWK Anlage	Temperatur	Kennzeichnung
3, 4	Ottomotor	20 °C	Otto – 20 °C
5, 6	Brennstoffzelle	20 °C	Fuel – 20 °C
2, 7	Ottomotor	40 °C	Otto – 40 °C
1, 8	Brennstoffzelle	40 °C	Fuel – 40 °C

## 2.3 Sicherheitstests und post-mortem Analysen

In diesem Kapitel folgen die Ergebnisse der Alterungsuntersuchungen und *post-mortem* Analysen der zyklisierten Zellen. Sicherheitstests wurden hingegen nicht durchgeführt, da sie für die Aussage der Auswahl der KWK-Anlage keine Relevanz haben. Die Berechnungen im Kapitel 2.2 zeigen, dass die Speicher während der Be- und Entladung nur geringe Strombelastungen erfahren, was kein Sicherheitsrisiko darstellt.

### 2.3.1 *Post-mortem* Analysen der Elektrodenmorphologie

Nach der elektrochemischen Belastung lassen sich die Oberflächen der Anode (Graphit) und Kathode (NMC111 und LFP) via Rasterelektronenmikroskop (REM) auf Defekte und Ablagerungen hin untersuchen, welche während der Zyklisierung entstehen.

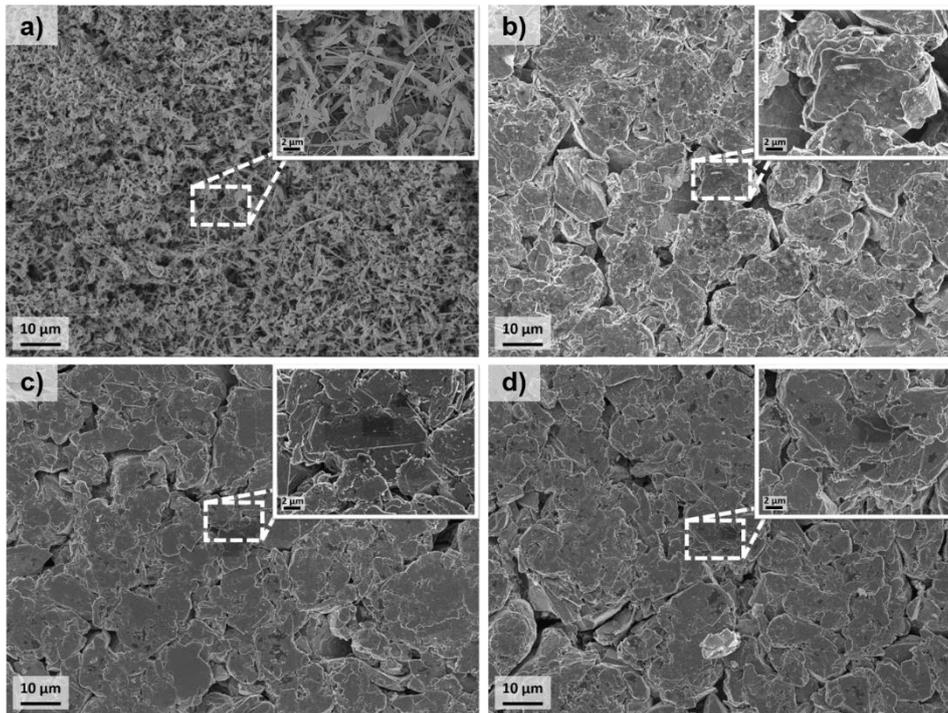


Abbildung 2.11: Zyklisierte Graphit-basierte Anoden aus einer NMC111-Graphitzelle nach der jeweiligen Zyklisierungsmethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C.

Abbildung 2.11 zeigt die Anodenoberflächen aus den NMC111 Zellen. Die Anode in Abbildung 2.11 a) zeigt eine deutliche Ausbildung von Lithiumdendriten, die in b) – d) nicht vorhanden sind. Es kann ein Hinweis darauf sein, dass für diese Zelle ein zu schnelles Laden und Entladen einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle aufzeigt. Die Anode aus a) wurde bei 20 °C mit dem Profil des Ottomotors zyklisiert. Abbildung 2.11 b) wurde mit dem Profil der Brennstoffzelle bei 20 °C zyklisiert und die einzelnen Graphitpartikel zeigen keine deutlichen Veränderungen an der Elektrodenoberfläche. Auch eine Erhöhung der Zyklisierungstemperatur auf 40 °C in d) bewirkt keine stärkere Ausprägung von Alterungseffekten. Die Anode in Abbildung 2.11 c) mit dem Zyklisierungsprofil des Ottomotors bei 40 °C zeigt ebenfalls den Erhalt der Graphitstruktur und keine ausgeprägten Elektrolytzersetzungsreaktionen.

Die Anoden aus den NMC Zellen zeigen keine signifikanten Alterungseffekte bei dem Einsatz der Brennstoffzellen Anlage. Die Erhöhung der Zyklisierungstemperatur zeigte einen positiven Effekt bei dem Einsatz beider KWK-Anlagen.

Abbildung 2.12 zeigt die äquivalenten NMC111 Kathodenoberflächen zu den Anoden in Abbildung 2.11. Alle sichtbaren NMC111 Partikel sind intakt, größere Rissbildungen, wie sie nach einer längeren Zyklisierung auftreten können, sind nicht vorhanden.

Aus den REM-Untersuchungen lässt sich schließen, dass die Auswahl der KWK-Anlage keinen Einfluss auf das Alterungsverhalten der Kathode aufweist.

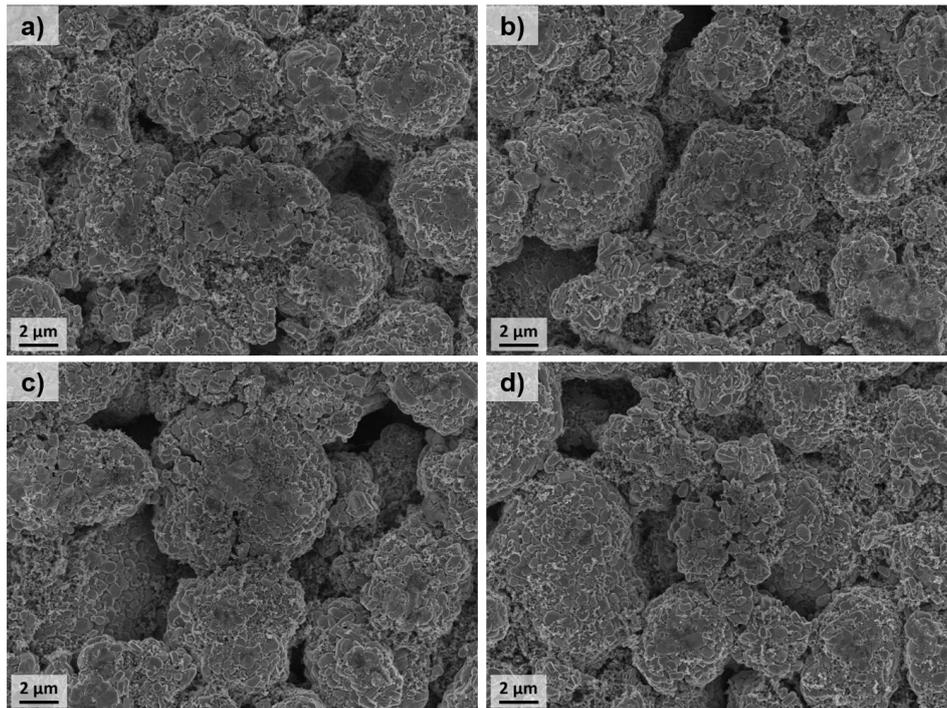


Abbildung 2.12: *Post-mortem* REM-Untersuchungen der gealterten NMC111 Kathoden nach der jeweiligen Zyklieremethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C.

Nachfolgend werden die Anoden- sowie Kathodenoberflächen aus den gealterten LFP || Graphit Zellen diskutiert.

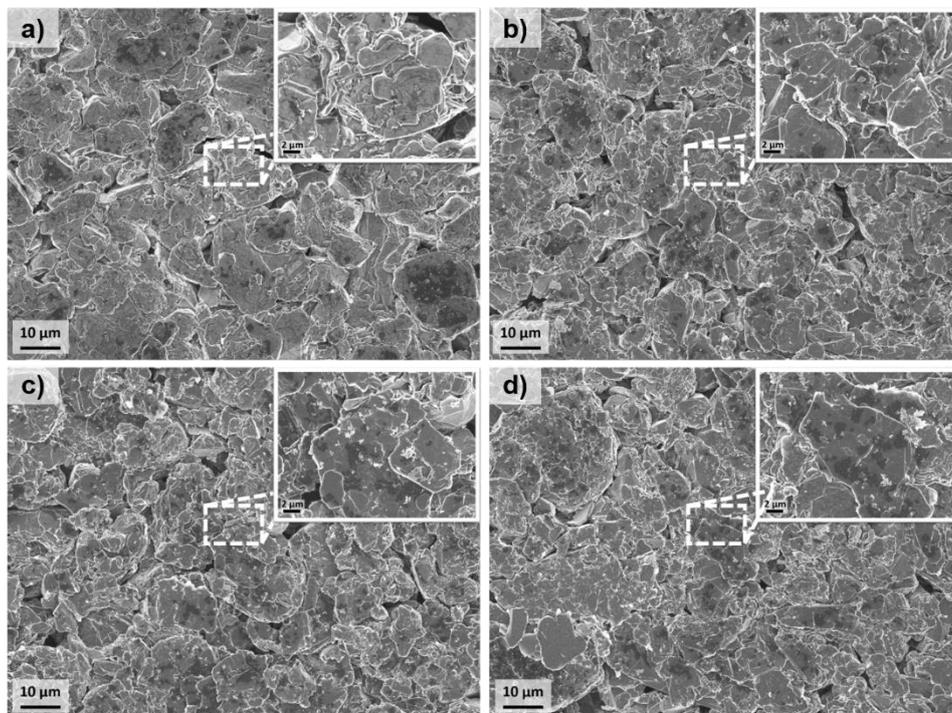


Abbildung 2.13: Zyklisierte Graphit-basierte Anoden aus einer LFP || Graphitzelle nach der jeweiligen Zyklieremethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C.

Die elektronenmikroskopische Untersuchung der Graphit-basierten Anoden aus den LFP Zellen zeigt keine signifikanten Abweichungen im Alterungsverhalten. Die entsprechenden REM-

Aufnahmen sind in Abbildung 2.13 dargestellt und verdeutlichen, dass weder das angewandte Bedarfsprofil noch die Temperatur eine verstärkte Ausprägung von Alterungseffekten bewirkt.

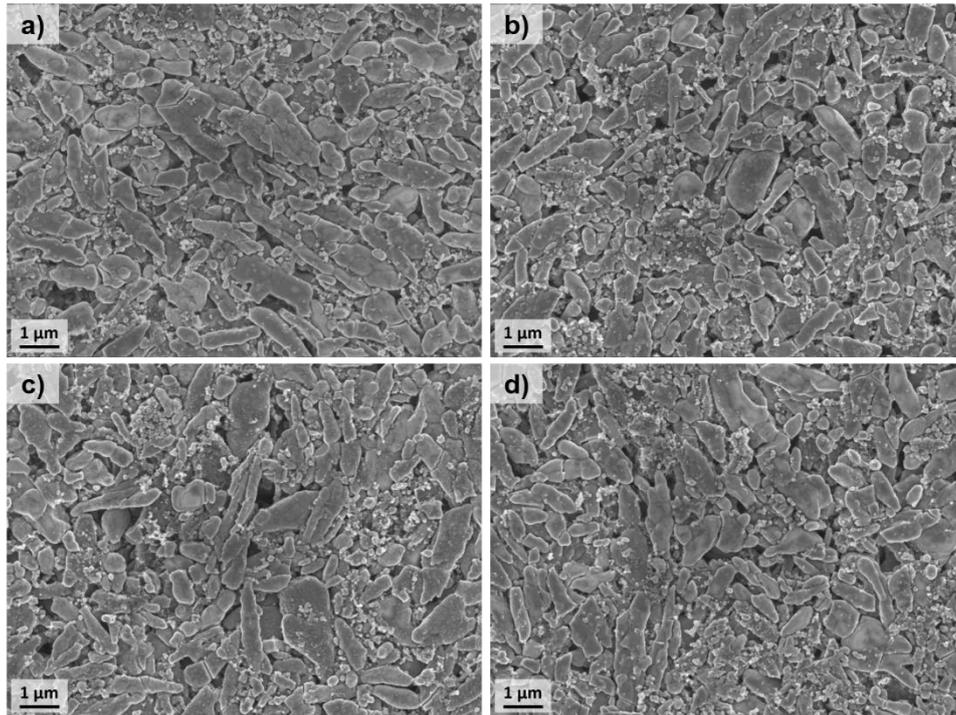


Abbildung 2.14: Zyklierte LFP-basierte Kathoden nach der jeweiligen Zyklieremethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C.

Abbildung 2.14 zeigt die äquivalenten LFP Kathodenoberflächen zu den Anoden in Abbildung 2.13. Alle sichtbaren LFP Partikel sind intakt, größere Rissbildungen, wie sie nach der Zyklierung auftreten können, sind nicht vorhanden.

Aus den REM-Untersuchungen lässt sich schließen, dass die Auswahl der KWK-Anlage oder die unterschiedliche Betriebstemperatur keinen signifikanten Einfluss auf das Alterungsverhalten der LFP-basierten Kathoden aufweist.

### 2.3.2 Elektrolyt-Analyse

Neben den Elektrodenoberflächen, wurden die Elektrolyte der zyklierten NMC111- und LFP-basierten Zellen hinsichtlich möglicher Abbauprodukte oder Zersetzungsprodukte untersucht. Im Vergleich zu Abschnitt 2.2 wurde dem Elektrolyt in den produzierten 5 Ah Zellen 2 Gew.% Vinylencarbonat (VC) als Additiv zugesetzt.

Die Ergebnisse der Elektrolytuntersuchung aus den NMC111-basierten Zellen mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) sind in Tabelle 2.3 aufgeführt. Für die Interpretation der Ergebnisse werden die Befunde im weiteren Verlauf mit einem Referenzwert, der die prozentuellen Anteile der einzelnen Elektrolytkomponenten vor der Zyklierung widerspiegelt, verglichen. Da während der Zyklierung, und insbesondere bei der Formierung in den ersten Zyklen, eine SEI-Schutzschicht (solid electrolyte interphase) unter Verbrauch des schichtbildenden Additivs VC und teilweisen Zersetzung der übrigen Elektrolytkomponenten

stattfindet, beobachtet man einen geringeren Anteil des VC in der Elektrolytmischung. Im Vergleich zur Reduktion des VC-Anteils scheint die Alterung zu einem geringfügigen Anstieg der EC- und EMC-Anteile zu führen, welche jedoch aufgrund der üblichen Überbefundung und der unveränderten Verhältnisse untereinander auf keine präferentielle Alterung bzw. signifikante Änderung der Zusammensetzung des Elektrolyten hindeutet (s. Tabelle 2.3).

Der leicht höhere Anteil von VC, der nach der Zyklisierung mit der Brennstoffzellen-Prozedur (Zelle Fuel – 20 °C) im Vergleich zu den anderen Betriebsbedingungen gemessen wurde, wird im weiteren Verlauf diskutiert.

Tabelle 2.3: Ergebnisse der GC-MS-Untersuchungen des gealterten Elektrolyten mit 1M LiPF<sub>6</sub>-Leitsalz in EC: EMC (3:7 Gew.) mit 2 Gew.% VC in NMC111-basierten Zellen. Gehalt der Elektrolytbestandteile EC, EMC und VC vor (Referenz) und nach erfolgter Zyklisierung.

NMC111-basierte Zellen	EMC / %	EC / %	VC / %	EC/EMC
Referenz	52.9 ± 0.5	21.6 ± 0.2	1.5 ± 0.1	0.41
Otto – 20 °C	58.7 ± 0.5	25.1 ± 0.2	0.1 ± 0.1	0.43
Fuel – 20 °C	59.5 ± 0.5	24.9 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.42
Otto – 40 °C	58.8 ± 0.4	24.8 ± 0.3	0.1 ± 0.1	0.42
Fuel – 40 °C	58.7 ± 0.4	24.9 ± 0.3	0.1 ± 0.1	0.42

In Tabelle 2.4 sind die ermittelten PF<sub>6</sub><sup>-</sup>-Gehalte aus den NMC111-basierten Zellen nach der Untersuchung mittels Ionen-Chromatographie (IC) aufgeführt, welche Rückschlüsse auf das Alterungsverhalten des Leitsalzes ermöglicht. Im Vergleich zum Referenzwert wurde in allen zyklisierten Zellen ein höherer Gehalt an PF<sub>6</sub><sup>-</sup>-Anionen festgestellt. Dieser Sachverhalt kann auf das Verdampfen der flüchtigen Elektrolytbestandteile wie bspw. EMC bei der Probenvorbereitung zurückgeführt werden. Die Zyklisierung mit der Brennstoffzellen-Prozedur bei 20 °C zeigt den geringsten Anteil an PF<sub>6</sub><sup>-</sup>, was auf weniger Zersetzungsreaktionen der Elektrolytbestandteile EC und EMC hindeutet. Im Vergleich dazu ist der Gehalt des PF<sub>6</sub><sup>-</sup>-Anions in den weiteren Zellen auf gleichem Niveau. Diese analytischen Ergebnisse geben einen Grund zur Annahme, dass die geringere Konzentration des PF<sub>6</sub><sup>-</sup>-Anions in der Elektrolytmischung mit dem Zyklisierprogramm der Brennstoffzelle bei 20 °C (Fuel – 20 °C) auf eine etwas stärker ausgeprägte LiPF<sub>6</sub>-Zersetzung hindeutet. Somit ist im Vergleich zu den anderen Zyklisierprozeduren eine evidente Alterung des Leitsalzes vorliegt.

Gleichzeitig lässt sich kein signifikanter Unterschied im Alterungsverhalten auf Grundlage der eingesetzten KWK-Anlage feststellen.

Tabelle 2.4:  $\text{PF}_6^-$  - Gehalt der gealterten Elektrolyte laut IC-Untersuchung im Vergleich zum Referenzgehalt aus NMC111-basierten Zellen.

NMC111-basierten-Zellen	$\text{PF}_6^-$ / mol/L	Zunahme $\text{PF}_6^-$ / %
Referenz	0.98	
Otto – 20 °C	1.14	16.6
Fuel – 20 °C	1.07	9.2
Otto – 40 °C	1.15	17.5
Fuel – 40 °C	1.15	17.2

Die Ergebnisse der Elektrolytuntersuchung aus den LFP-basierten Zellen mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) sind in Tabelle 2.5 aufgeführt. Der Anteil an VC wurde weniger stark reduziert, als bei den NMC111-basierten Zellen. Dies lässt sich durch den erhöhten Anteil an eingesetztem Elektrolyten erklären. Auffällig ist, dass sich der Anteil an EC, wie auch in den NMC111-basierten Zellen erhöhte, während der Anteil an EMC in allen untersuchten Elektrolyten reduziert wurde. Dies deutet zwar ebenfalls auf eine teilweise Zersetzung des Elektrolyten hin, allerdings mit unterschieden starkem Reduktionsverhalten von EC und EMC. Der Einfluss der Zyklisierprozedur und -temperatur ist hier vernachlässigbar.

Tabelle 2.5: Ergebnisse der GC-MS-Untersuchungen des gealterten Elektrolyten mit 1M  $\text{LiPF}_6$  -Leitsalz in EC: EMC (3:7 Gew.) mit 2 Gew.% VC in LFP-basierten Zellen. Gehalt der Elektrolytbestandteile EC, EMC und VC vor (Referenz) und nach erfolgter Zyklisierung.

LFP-basierte Zellen	EMC / %	EC / %	VC / %
Referenz	53.3 ± 0.3	21.9 ± 0.1	1.5 ± 0.1
Otto – 20 °C	51.4 ± 1.2	24.3 ± 0.8	0.8 ± 0.1
Fuel – 20 °C	51.5 ± 0.4	24.5 ± 0.3	0.8 ± 0.1
Otto – 40 °C	51.2 ± 1.2	24.5 ± 0.4	0.7 ± 0.1
Fuel – 40 °C	51.9 ± 0.7	24.8 ± 0.3	0.7 ± 0.1

In Tabelle 2.6 sind die ermittelten  $\text{PF}_6^-$ -Gehalte aus den LFP-basierten Zellen nach der Untersuchung mittels Ionen-Chromatographie (IC) aufgeführt. Wie auch bei den vorher diskutierten NMC111-basierten Zellen lässt sich eine Zersetzung des Elektrolyten aufgrund der generellen Zunahme des  $\text{PF}_6^-$ -Gehaltes feststellen. Die Zellen, die mit dem Zyklisierprogramm des Ottomotors zyklisiert wurden, zeigen eine erhöhte Elektrolytzersetzung im Vergleich zur Brennstoffzellenprozedur. Die Erhöhung der Zyklisiertemperatur verstärkt das Zersetzungsverhalten der Carbonate.

Der Unterschied zwischen den Prozeduren ist die Häufigkeit und Stärke der Strombelastung. Demnach zeigt sich für LFP-basierte Zellen, dass sie keiner kontinuierlichen Strombelastung

ausgesetzt werden sollten, wie es bei Ottomotoren der Fall ist, da dies zu einem beschleunigten Alterungsverhalten führt.

Dabei lässt sich der höhere Anteil des zersetzten Elektrolyten mit der höheren Aktivmaterialoberfläche des LFP-Aktivmaterials erklären. Es sind mehr Kontaktflächen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterial vorhanden, was zu erhöhter Elektrolytzersetzung führen kann. [35]

Tabelle 2.6:  $\text{PF}_6^-$  - Gehalt der gealterten Elektrolyte laut IC-Untersuchung im Vergleich zum Referenzgehalt aus LFP-basierten Zellen.

LFP-basierte Zellen	$\text{PF}_6^-$ / mol/L	Zunahme $\text{PF}_6^-$ / %
Referenz	1.01	
Otto – 20 °C	1.21	20.4
Fuel – 20 °C	1.12	11.6
Otto – 40 °C	1.28	27.6
Fuel – 40 °C	1.18	17.5

### 3. Bewertung: Systeme aus KWK, Wärme- und Stromspeicher

*Zusätzlich zu den Feldversuchen werden einige Batterien im GWI eigenen Labor untersucht. Dieses Kapitel zeigt die für einen Betrieb mit Mikro-KWK-Anlagen typischen Beladeleistungen für Batteriespeicher und die dabei auftretenden Wechselrichterwirkungsgrade. Da die Batteriespeichersysteme für PV-Anlagen mit teils deutlich größeren Leistungen entwickelt wurden, fällt ein Großteil der Beladung in einen nicht optimalen Wirkungsgradbereich. Die Entladung wiederum ist vom jeweiligen Nutzerverhalten abhängig. Für den Betrieb mit kleinen KWK-Systemen wird eine verbesserte Auslegung der Wechselrichter empfohlen. Dadurch können Überschüsse effizienter zwischengespeichert werden.*

*Durch die detaillierte Untersuchung des Speicherverhaltens kann bei zwei Speichern ein fehlerhaftes Verhalten beobachtet werden. Ein System erkennt den Strombezug im Standby-Betrieb der KWK-Anlage als Erzeugung und belädt trotz fehlender Überschüsse den Speicher. Ein weiteres System belädt in unregelmäßigen Abständen den Speicher mit der maximalen Beladeleistung, unabhängig davon ob ein Überschuss zum Zwischenspeichern vorhanden ist oder nicht. Diese Erkenntnisse konnten in die Auswertung der Felddaten einbezogen werden.*

*Die Speicher werden zusätzlich mit KWK-Systemen untersucht, die nicht im Feld eingesetzt wurden. Dadurch konnte ein am Markt verfügbares Brennstoffzellensystem und eine ottomotorische Anlage für MFH und Gewerbeobjekte in die Untersuchung einbezogen werden.*

#### 3.1 Integration von Stromspeichern in die vorhandene Testumgebung

Die Laboruntersuchungen sollen helfen, die Integration von Batteriespeichern in bestehende KWK-Systeme detaillierter zu untersuchen. Dazu werden Systemkombinationen betrachtet, die im Projektgebiet nicht vorkommen und die Kompatibilität von Speichern und KWK-Anlagen geprüft, um Fehlerquellen und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Die Batteriespeicher im Gebiet der Innovation City Bottrop sind in Objekten mit KWK-Systemen aus dem vorausgegangenen Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ installiert. Die verbauten KWK-Anlagen entsprechen dabei dem Stand der Technik aus dem Jahr 2013, wobei ein Großteil der Systeme nicht mehr am Markt verfügbar ist. Auch die dazugehörige Messdatenerfassung stammt aus dieser Zeit. Damit können alle betriebsrelevanten Parameter in 5-Minuten-Intervallen aufgezeichnet werden.

Im Labor können Anlagen untersucht werden, die dem aktuellen Stand der Mikro-KWK-Technik entsprechen. Damit können Aussagen zu Anlagen getroffen werden, die im Feld nicht eingesetzt wurden und Empfehlungen zur Kombination dieser Anlagen mit Batteriespeichern gegeben werden. Die Messtechnik im Labor erlaubt zudem eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Systemkomponenten. Dadurch können Potenziale zur Optimierung des Betriebs und der Systemkombinationen ermittelt werden.

Der Betrieb von Batteriespeichersystemen mit Mikro-KWK-Anlagen stellt andere Anforderungen an die Speicher als der Betrieb mit einer Photovoltaik-Anlage, wofür die Geräte ursprünglich entwickelt wurden. Die Ladeprofile unterscheiden sich in den Ladeleistungen und den Zeiträumen, in denen Strom bereitgestellt werden kann. Insgesamt wurden fünf Speichersysteme für eine Untersuchung auf dem Prüfstand ausgewählt, wobei ein Mix aus Speichertechnologien und Nutzkapazitäten angestrebt wurde.

In den Versuchen wird zunächst das individuelle Verhalten der Speicher ohne den Verbund mit einer KWK-Anlage untersucht. Dabei können Wirkungsgrade und betriebsrelevante Parameter anhand reproduzierbarer Betriebspunkte erfasst und mit anderen Speichern verglichen werden. Die Betriebspunkte sind dabei so gewählt, dass sie den typischen Erzeugungsprofilen von Mikro-KWK-Anlagen entsprechen.

Aus energetischer Sicht erfolgt anschließend eine Analyse des Speicherverhaltens in Kombination mit einem KWK-System. Die in Bottrop eingesetzten Anlagen entsprachen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme dem am Markt verfügbaren Mix an Mikro-KWK-Systemen. Es wurden hauptsächlich stirling- und ottomotorische KWK-Anlagen verbaut. Diese Systeme werden, Stand 2020, nicht mehr von den Herstellern angeboten. KWK-Systeme mit Stirlingmotoren sind gar nicht mehr verfügbar, ottomotorische Systeme mit elektrischen Leistungen unter 2,5 kW werden noch von einigen wenigen Herstellern angeboten.

In den vergangenen Jahren sind zunehmend Brennstoffzellensysteme mit elektrischen Leistungen unter 1 kW an die Stelle der Stirling- und Ottomotoren getreten. Für die Bewertung des Betriebs von KWK-Anlagen mit Batteriespeichern, wurde daher für die Laboruntersuchung ein PEM-Brennstoffzellensystem untersucht. Diese Anlage kann aufgrund der geringen Wärmebereitstellung in energetisch sanierten EFH und in Neubauten eingesetzt werden.

Die Versorgung von EFH kann durch ein Brennstoffzellensystem erfolgen, für größere Objekte, beispielsweise Mehrfamilienhäuser oder kleine Gewerbeobjekte, kann der Einsatz von KWK-Systemen mit größeren Leistungen relevant sein. Daher wurde ein ottomotorisches System mit einer elektrischen Leistung von rund 5,5 kW angeschafft. Im Labor konnte damit auch die Kombination eines Batteriespeichers mit einer größeren Anlage untersucht werden.

Die Kombination aus Batteriespeicher und KWK-System wurde so gewählt, dass die Speicher mit geringen Speicherkapazitäten mit dem Brennstoffzellensystem und die mit den größeren Kapazitäten mit der ottomotorischen Anlage getestet wurden.

### **3.1.1 Untersuchung der Batteriespeichersysteme**

Die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Speicher sind alle für den Betrieb mit PV-Anlagen entwickelt worden. Das schließt den Betrieb mit einer KWK-Anlage nicht aus, die Betriebsarten unterscheiden sich jedoch, insbesondere in den Beladeleistungen und den Beladezeiträumen. Derzeit werden auf dem Markt keine dedizierten Speicher für KWK-Anlagen angeboten.

Eine PV-Anlage liefert nur tagsüber Strom und erreicht in der Regel um die Mittagszeit die höchste Erzeugungsleistung. Ein zugehöriges Speichersystem lädt zu diesem Zeitpunkt mit der höchsten Ladeleistung, die einige Kilowatt erreichen kann. Eine Mikro-KWK-Anlage liefert dagegen eine geringere Leistung über einen längeren Zeitraum. Abhängig von der Anlage und dem Wärmebedarf sind Laufzeiten von bis zu 24 Stunden am Tag möglich. Ist der Wärmebedarf sehr gering, läuft die Anlage mitunter gar nicht. Da Mikro-KWK-Systeme wärmegeführt betrieben werden, ist der im Gebäude vorliegende Wärmebedarf die Führungsgröße für den Betrieb. Anders als bei einer PV-Anlage, fällt damit ein Großteil der Erzeugung in die Heizperiode. Im Sommer decken KWK-Anlagen häufig nur den Trinkwarmwasserbedarf eines Gebäudes und erreichen dadurch geringere Laufzeiten.

Die Batteriespeicher werden, unabhängig von der Art der Erzeugertechnologie, nur mit der Leistung beladen, die nach Abzug des Gebäudestrombedarfs übrigbleibt und ohne einen elektrischen Speicher in das öffentliche Netz eingespeist werden würden. Bei PV-Anlagen können das einige Kilowatt an Leistung sein. Im Falle einer Mikro-KWK-Anlage mit einer Leistung von 1 kW oder weniger sind es nur einige hundert Watt. Da Wechselrichter, wie sie zum Be- und Entladen von Batteriespeichern nötig sind, nicht über ihr gesamtes Leistungsband gleichbleibend effizient sind und die Speicher von den Herstellern für den Betrieb mit einer PV-Anlage und damit größeren Leistungen optimiert sind, ist die Ermittlung der Wirkungsgrade beim Beladen der Speicher mit den geringen Überschüssen aus dem Betrieb einer Mikro-KWK-Anlage Teil der Laboruntersuchung.

Aus den Daten der Objekte in Bottrop geht hervor, dass die Grundlast eines EFH mit 3-5 Personen 500 W beträgt. Als Grundlast wird in diesem Zusammenhang die Leistung bezeichnet, die ein Objekt in 80 % der Zeit verbraucht. Anders ausgedrückt benötigt das Objekt an rund 7.000 Stunden im Jahr eine elektrische Leistung 500 W oder mehr.

Die elektrische Leistung von Mikro-KWK-Systemen beträgt meist weniger als 1 kW. Die Messungen im Labor zeigen, dass ein PEM-Brennstoffzellensystem, abzüglich der benötigten Energie für die interne Steuerelektronik, die Regler und Pumpen, im Mittel 680 W in das Gebäudenetz eingespeist. Bei einer Grundlast von 500 W bleiben weniger als 200 W für die Beladung des Speichers über. Da die Wechselrichter der untersuchten Speichersysteme auf maximale Leistungen von 2 bis 6,5 kW ausgelegt sind und der Wirkungsgrad der Wechselrichter bei geringen Leistungen abnimmt, wird untersucht, wie effizient die Beladung eines Speichers bei den für eine Brennstoffzelle typischen Beladeleistungen verhält. Die Entladung der Speicher ist nicht von der Erzeugungstechnologie, sondern vielmehr von dem Objekt und dem Nutzerverhalten der BewohnerInnen abhängig.

Aufgrund der mitunter geringen Überschüsse zum Beladen der Speicher, wird die minimale Beladeleistung ermittelt. Diese sollte möglichst niedrig sein, damit die Batterien auch bei geringen Überschüssen Strom aufnehmen können.

Die Reaktionszeit der Speicher gibt an, wie lange ein Überschuss oder Bedarf an Strom vorliegen muss, bis der Speicher diesen ausgleicht. Beim Einsatz von PV-Anlagen sind Veränderungen der Leistung eher träge. Die Sonne wird selten innerhalb von Sekunden durch Wolken verdeckt. Mikro-KWK-Systeme werden durch den wärmegeführten Betrieb immer dann ein- und ausgeschaltet, wenn Wärme benötigt wird oder der thermische Speicher vollständig beladen ist. Daher kann es zu deutlich schnelleren Lastwechseln kommen. Eine schnelle Reaktionszeit des Speichers ermöglicht zudem das Decken von Verbrauchsspitzen.

Die genannten Betriebsparameter können für den Betrieb eines Batteriespeichers mit einer KWK-Anlage relevant sein. Insbesondere, da sie von den Parametern einer PV-Anlage abweichen, für die die Speicher entwickelt wurden. In den nachfolgenden Versuchen soll daher festgestellt werden, ob die Speichersysteme für einen Betrieb mit Mikro-KWK-Anlagen geeignet sind.

### 3.1.2 Übersicht der untersuchten Speichersysteme

Die für den Laborbetrieb ausgewählten Speicher stellen eine Auswahl der im Feld eingesetzten Speichersysteme dar. Berücksichtigt wurden unterschiedliche Kapazitäten und Technologien, um die jeweiligen Vor- und Nachteile der Systeme zu identifizieren und Empfehlungen für den Betrieb eines Batteriespeichers mit einer KWK-Anlage geben zu können.

In Tabelle 3.1 sind die fünf Speichersysteme für den Laborbetrieb aufgelistet. Neben der Kapazität und der Technologie sind die Be- und Entladeleistungen angegeben. Die Leistungen sind bei Batteriespeichern von der eingesetzten Technologie und der Kapazität abhängig. Lithiumbasierte Speicher weisen höhere Leistungen auf als bleibasierte und eine höhere Kapazität zieht oft höhere Lade- und Entladeleistungen nach sich.

Tabelle 3.1 Übersicht der Batteriespeichersysteme mit den wichtigsten Herstellerangaben

	System 1	System 2	System 3	System 4	System 5
Technologie	Lithium	Lithium	Lithium	Blei	Lithium
Nutzkapazität	6 kWh	2 kWh	4 kWh	6 kWh	10,8 kWh
max. Beladeleistung (dauerhaft)	4,2 kW	1,5 kW	3,3 kW	1,5 kW	5 kW
max. Entladeleistung (dauerhaft)	4,2 kW	1,5 kW	3,3 kW	2,0 kW	8,3 kW

Die Speichersysteme sind in zwei Kategorien einteilbar. Systeme, bei denen das Batteriemodul und der Wechselrichter separat voneinander und von unterschiedlichen Herstellern erworben werden können und Systeme in denen Batteriemodul und Wechselrichter in einem Gehäuse zusammengefasst sind und von einem Hersteller als System angeboten werden. Die Systeme 2, 3 und 4 sind fest verbaute Systeme, sie erlauben jedoch das Nachrüsten von Batteriemodulen. Theoretisch lassen sich auch die Systeme erweitern, in denen Batteriemodul und Wechselrichter getrennt voneinander bezogen werden können, dazu wird zusätzlich Hardware zum

Verbinden benötigt. Durch das Hinzufügen weiterer Module steigt nicht nur die Kapazität, sondern auch die Leistungen der Speichersysteme.

Im Betrieb mit einer KWK-Anlage scheint eine geringere Kapazität sinnvoller als bei einem Betrieb mit einer PV-Anlage. Die PV-Anlage liefert nur tagsüber Strom, der nach Sonnenuntergang aus dem Speicher ins Hausnetz eingespeist wird. Daher müssen in der Zeit, in der die Sonne scheint, möglichst große Mengen Strom zwischengespeichert werden. Eine KWK-Anlage liefert den Strom kontinuierlicher, dafür aber mit einer geringeren Leistung. Da der Speicher bei diesem Betrieb nicht nur einmal am Tag geladen werden kann, sondern über den Tag verteilt und sogar in der Nacht, kann der Speicher, so die Theorie, vergleichsweise klein ausgelegt werden.

### 3.1.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Versuche zu den Eigenschaften der Speichersysteme werden zunächst ohne eine KWK-Anlage durchgeführt, da auf die Regelung und Steuerung der KWK-Systeme nicht zugegriffen werden kann. Um präzise, reproduzierbare Messreihen durchführen zu können, wird in einem vereinfachten Versuchsaufbau zunächst eine elektrische Quelle/Senke mit dem Speicher betrieben. Im Betrieb als Quelle liefert dieses Gerät Strom, wie es eine Erzeugungsanlage tun würde und der Speicher kann mit unterschiedlichen Leistungen beladen und die Reaktionszeit durch kurze Leistungsspitzen untersucht werden. Im Senken-Betrieb verhält sich das Gerät wie ein großer Verbraucher, sodass der Speicher kontrolliert entladen werden kann.

Die Verluste durch die Umwandlung des Wechselstroms (AC) auf Seiten des Hausnetzes in Gleichstrom (DC), der in der Batterie gespeichert werden kann können untersucht werden, indem, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, vor dem Wechselrichter und zwischen dem Wechselrichter und dem Batteriemodul eine Leistungsmessung installiert wird.

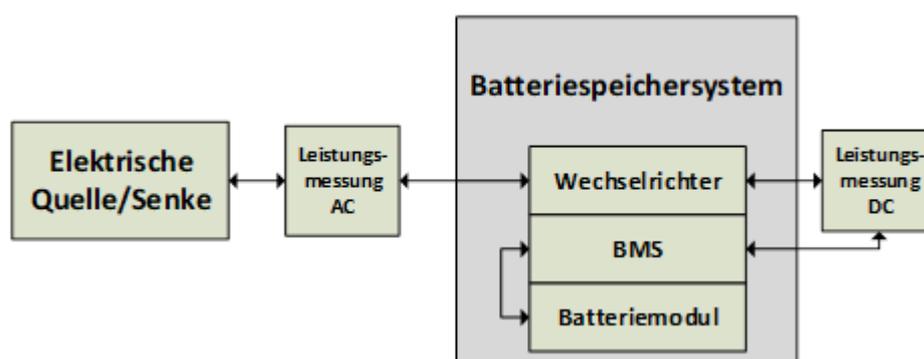


Abbildung 3.1: Messstellen auf der Wechsel- (AC) und Gleichstromseite (DC)

Die Effizienz eines Speichersystems ist abhängig von der Be- bzw. Entladeleistung. Die verbauten Wechselrichter decken Leistungen von wenigen Watt bis zu einigen Kilowatt ab und sind nicht über das gesamte Leistungsband gleichermaßen effizient. Als Teil der Untersuchung werden Verluste beim Beladen mit Mikro-KWK-typischen Überschüssen von 100-200 W untersucht.

Die Wirkungsgrade beim Beladen des Speichers sind, zusammen mit den Beladeleistungen auf der Wechselstromseite (AC) und der Gleichstromseite (DC) beispielhaft für das Speichersystem 1 in Abbildung 3.2 dargestellt.

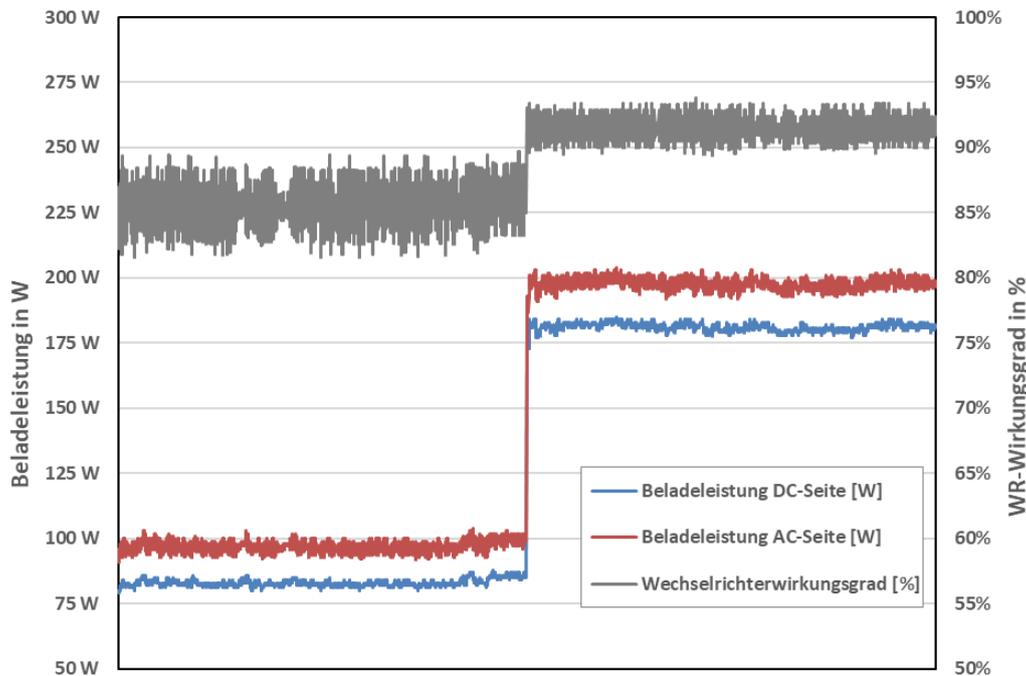


Abbildung 3.2: Wirkungsgrade beim Beladen mit geringen Leistungen

Erkennbar ist, dass die Beladeleistung auf der AC-Seite bei den eingestellten 100/200 W liegt. Die Beladung des Batteriemoduls auf der DC-Seite erfolgt mit etwas mehr als 80/180 W. Die Verluste sind auf die Wandlung des Wechselstroms in Gleichstrom zurückzuführen.

Die Überschüsse werden durch die elektrische Quelle vorgegeben. Die Leistungen schwanken im Bereich von einige Watt, da die Anlagen netzparallel betrieben werden. Das bedeutet, dass die Anlagen an das öffentliche Stromnetz angeschlossen sind und Netzparameter wie Spannung und Frequenz vom Netz übernommen werden. Soll mit einer konstanten Leistung geladen werden und die Spannung im Netz schwankt, muss der Ladestrom angepasst werden, um die erforderliche Leistung zu liefern. Daher sind die Ladeleistungen trotz möglichst konstanter Beladung durch die elektrische Quelle nicht durchgehen bei 100 bzw. 200 W.

Die mittleren Wirkungsgrade für die Beladung dieses Speichers mit 100 W liegen bei 85,6 %, die Wirkungsgrade für eine Beladung mit 200 W bei 91,5 %.

Neben der Beladung und der damit verbundenen Wirkungsgrade der Einspeicherung wird zusätzlich die Effizienz der Entladung betrachtet. Die Entladung unterliegt dem Nutzerverhalten und es können keine Aussagen über die Häufigkeit bestimmter Entladeleistungen getroffen werden. Daher wird der maximale Wirkungsgrad für eine Entladeleistung zwischen 0 und 3.500 W bestimmt, um eine Vergleichsmöglichkeit zu den Wirkungsgraden der Beladung mit geringen Leistungen zu schaffen.

Abbildung 3.3 zeigt den Verlauf der Entladeleistung auf der AC- und DC-Seite, sowie die jeweiligen Wechselrichterwirkungsgrade.

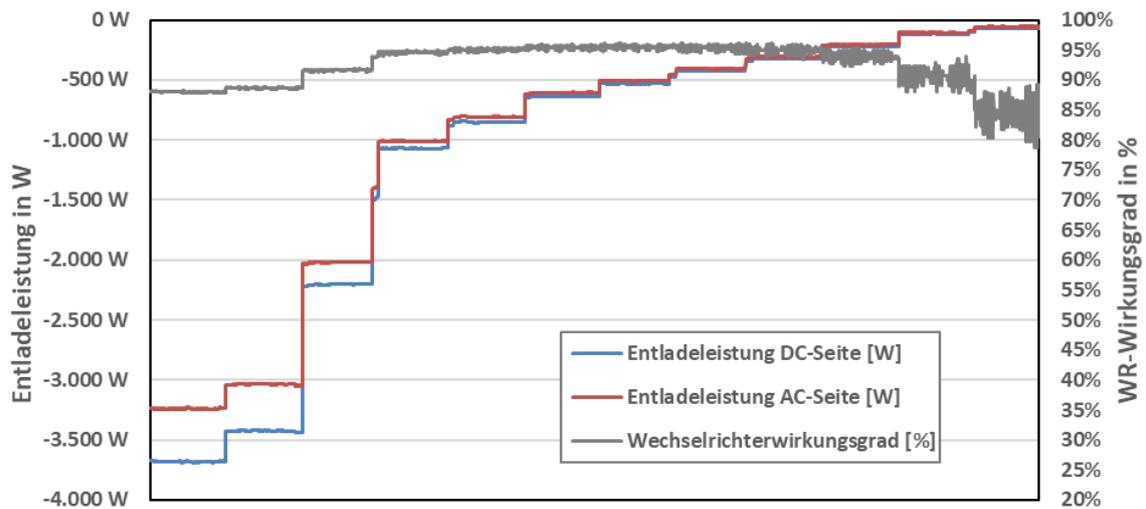


Abbildung 3.3: Wechselrichterwirkungsgrade beim Entladen

Die Entladung erreicht mehrfach eine maximale Effizienz von 96,3 % zwischen einer Entladeleistung von 400 und 600 W. Mit steigender Leistung reduziert sich der Wechselrichterwirkungsgrad, bei geringen Leistungen werden Werte ähnlich dem Beladewirkungsgrad erreicht.

Nachfolgend wird die minimale Beladeleistung bestimmt. Sie zeigt, wie hoch der Überschuss aus der Stromerzeugung abzüglich des Hausverbrauchs mindestens sein muss, um den Speicher zu beladen. Ist dieser Wert zu hoch, kann ein Teil des Überschusses nicht genutzt werden, um den Eigenverbrauch zu optimieren. Die nachfolgende Abbildung 3.4 zeigt die minimale Beladeleistung des untersuchten Speichers und die Wirkungsgrade bei der Beladung.

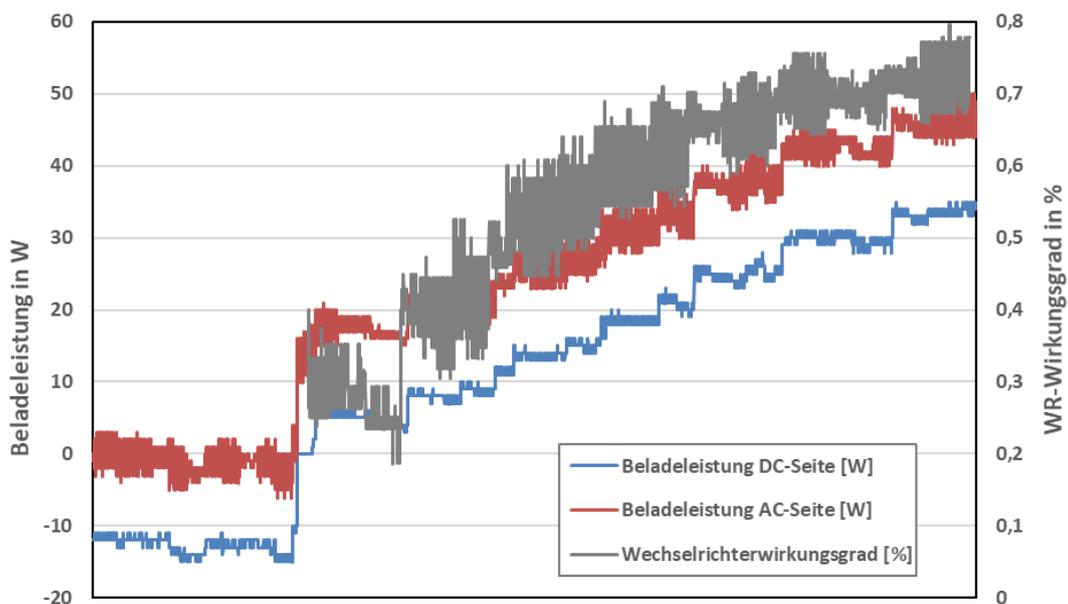


Abbildung 3.4: Minimale Beladeleistung mit Wirkungsgraden

Die Leistung, ab der das System beladen werden kann, liegt bei rund 18 W. Der Wirkungsgrad des Wechselrichters erreicht dabei knapp 30 %. Mit steigender Leistung steigt die Effizienz schnell an. Bei einer Beladung mit 50 W erreicht der Wechselrichter einen Wirkungsgrad von rund 75 %.

Zuletzt wurde die Reaktionszeit des Speichers gemessen. Die Messungen der Reaktionszeit werden durch das schnelle Bereitstellen von Überschüssen durch die elektrische Quelle/Senke gemessen. Das Speichersystem sollte den Speicher so schnell wie möglich be- bzw. entladen, wenn der Bedarf entsteht, um den Eigenverbrauch des selbst produzierten Stroms zu optimieren. Da das Quelle/Senke-Gerät geringen Latenzen zwischen dem Signal zur Leistungsänderung und der Ausführung unterlegen ist und die Messdatenerfassung die maximal alles 250 ms einen Wert aufzeichnen kann, können die gemessenen Reaktionszeiten bis zu einer halben Sekunde von der tatsächlichen Reaktionszeit abweichen. Das Speichersystem 1 hat auf Änderungen der Be- und Entladeleistung in etwa 2 Sekunden reagiert.

### 3.1.4 Ergebnisse der Batterieuntersuchungen

Die Ergebnisse der Einzelbetrachtungen der vier funktionsfähigen Speichersysteme sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Ein Vergleich der gemessenen Werte zeigt, dass die Unterschiede beim Beladen mit geringen Leistungen sich nicht signifikant voneinander unterscheiden und mit steigender Leistung sinken. Die größte Differenz zwischen den Systemen liegt beim Beladen mit 100 W bei 5,1 %. Werden die Speicher mit 200 W beladen liegt die Differenz bei 3,4 %.

Tabelle 3.2: Ergebnisse aus der Speicherbetrachtung

	System 1	System 2	System 3	System 4
WR-Wirkungsgrad Beladen mit 100 W	85,6%	83,7%	84,2%	80,5%
WR-Wirkungsgrad Beladen mit 200 W	91,5%	91,0%	90,1%	88,1%
max. Effizienz beim Entladen	96,6% (400-600 W)	95,0% (750-850 W)	97,1% (1.900-2.000W)	95,3% (400-600 W)
minimale Beladeleistung	18 W	13 W	19 W	25 W
Reaktionszeit	ca. 2s	ca. 5s	ca. 2s	ca. 5s

Die betrachteten Systeme erreichen ähnliche Werte für die Effizienz der Be- und Entladung. Interessant ist, dass die höchsten Effizienzen um maximal 2,1 % voneinander abweichen, die Leistungen, bei denen die Höchstwerte erreicht werden, sich jedoch teilweise deutlich unterscheiden.

Die minimalen Beladeleistungen geben an, wie groß die Überschussleistung im Hausnetz sein muss, um den Speicher zu beladen. Die Ergebnisse liegen zwischen 13 und 25 W.

Die Reaktionszeiten der Speicher liegen bei 2 - 5 Sekunden. Gemessen wurde diese Zeit beim Anlegen eines Überschusses, ohne dass der Speicher zuvor be- oder entladen wurde. Der Speicher muss sozusagen von einer Standby-Phase in die Be- oder Entladung wechseln. Die Zeiten für einen Lastwechsel während der Be- oder Entladung, also beispielsweise, wenn die Beladeleistung von 200 auf 300 W steigt, erfolgte bei jedem Speicher etwas schneller. Der Wechsel von Laden auf Entladen oder umgekehrt kann wiederum etwas länger dauern und deckt sich in etwa mit der gemessenen Reaktionszeit.

Anders als zunächst vermutet, kann keine direkte Aussage zu den Vor- und Nachteilen der Zelltechnologie oder der Ladeleistungen getroffen werden. Der Bleispeicher im Test, Speicher 4, weist nur leicht niedrigere Wirkungsgrade und die höchste minimale Beladeleistung auf. Ob dieses Verhalten aber auf die Zelltechnologie oder den verwendeten Wechselrichter zurückzuführen ist, kann nicht ermittelt werden.

Neben den untersuchten Eigenschaften und Betriebsparametern konnten durch die Versuchsreihen mit den Speichern im Labor weitere Merkmale und Probleme einiger Speicher festgestellt werden. Das Speichersystem 4, der einzige Blei-Speicher im Test, fällt durch ein unregelmäßiges und nicht nachvollziehbares Ladeverhalten auf. Das System belädt mit der vollen Ladeleistung, obwohl ein deutlich geringerer oder gar kein Stromüberschuss vorhanden ist. Teilweise erfolgt eine vollständige Beladung mit maximaler Leistung nach einigen Stunden und der Speicher gibt die Energie bei Bedarf in das Hausnetz ab, teilweise scheint es, als könne der Speicher, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, nur mit der maximalen Leistung be- und entladen.

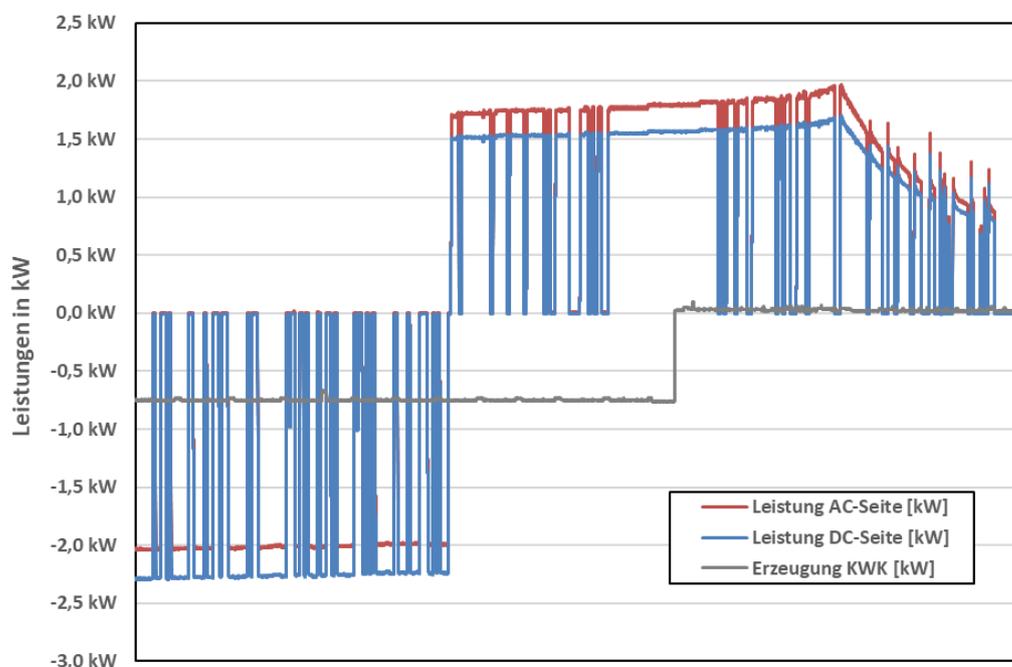


Abbildung 3.5: Speichersystem 4 be- und entlädt mit voller Leistung

Dieses Verhalten tritt nicht nur im Laborbetrieb auf, sondern das fehlerhafte Verhalten zeigt sich auch bei den im Feld installierten Batteriespeichern.

## 3.2 Integration von real-Nutzer-Betriebsweisen aus dem Demo-Gebiet

Im Labor wird neben der Einzelbetrachtung der Batteriespeicher auch die Integration von Batteriespeichern in die Versorgung eines Gebäudes mit KWK-System untersucht. Dazu wird der Prüfstand um zwei KWK-Anlagen, ein Brennstoffzellensystem und eine ottomotorische KWK-Anlage erweitert. Die Betrachtung der Speicher und die Be- und Entladung durch das Quelle/Senke-Gerät zeigen für die definierten Betriebspunkte die Effizienzen und Betriebsparameter. Die Untersuchung in der Kombination mit einer realen KWK-Anlage soll das Potenzial zur Steigerung des Eigenverbrauchs zeigen und wie ein Speicher für den Betrieb mit einer KWK-Anlage dimensioniert sein sollte. Die Systembetrachtungen werden durchgeführt, da ein Großteil der in Bottrop installierten Systeme vom Markt genommen und in den vergangenen Jahren von anderen Anlagen verdrängt wurden. Damit kann die Laboruntersuchung zusätzliche Handlungsempfehlungen für den Betrieb einer marktverfügbaren KWK-Anlage mit einem elektrischen Speicher bieten.

### 3.2.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau aus den Einzelversuchen wird in diesen Systembetrachtungen um ein KWK-System und eine thermische Senke erweitert (Abbildung 3.6). Die thermische Senke stellt den Wärmebedarf eines Gebäudes dar, den das KWK-System decken muss. Dabei wird aus dem Betrieb der KWK-Anlage Strom produziert, der in der elektrischen Senke verbraucht, in den Batteriespeicher zwischengespeichert oder ins öffentliche Netz eingeleitet werden kann. Die elektrische Senke wird in diesem Aufbau nicht mit konstanten Leistungen betrieben, sondern stellt den Strombedarf eines realen Haushaltes dar. Dazu wird das Lastprofil eines der Gebäude aus dem Projektgebiet Bottrop genutzt. Das Lastprofil für Heizungswärme und Trinkwarmwasser entstammt demselben Gebäude.

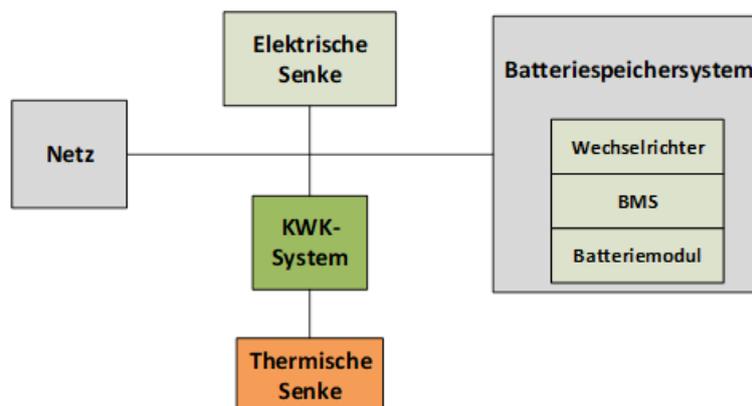


Abbildung 3.6: Versuchsaufbau der Systembetrachtung

Jede Versuchsreihe bildet den Wärme- und Strombedarf des ausgewählten Objekts über einen Zeitraum von einer Woche ab. Das KWK-System soll den Wärmebedarf decken und dabei Strom produzieren. Nach Ablauf der Woche wird das Batteriespeichersystem ausgetauscht und der Versuch mit einem anderen Speicher wiederholt.

Ein KWK-System besteht neben der KWK-Anlage aus einem Zusatzheizgerät und einem thermischen Speicher. Die KWK-Anlage sollte für einen effizienten Betrieb eine hohe Laufzeit erreichen. Durch den Einsatz eines thermischen Speichers kann die Wärme aus der KWK-Anlage zwischengespeichert werden. Sie produziert so lange Strom und Wärme, bis der thermische Speicher voll ist. Gleichzeitig sollte die thermische Leistung der KWK-Anlage vergleichsweise gering sein, um den Speicher über einen möglichst langen Zeitraum zu beladen und dabei Strom zu produzieren. Die Wärmebedarfsspitzen, insbesondere in der Heizperiode werden durch das Zusatzheizgerät gedeckt.

Um den Einfluss der Batterie bewerten zu können, werden bei den Versuchen die Be- und Entladeleistungen auf der Gleich- und Wechselstromseite des Speichersystems aufgezeichnet. Daraus kann der Wirkungsgrad der Be- und Entladung ermittelt werden.

### **3.2.2 Ergebnisse aus dem Betrieb des Brennstoffzellensystems**

Die ersten Systembetrachtungen werden mit einem PEM-Brennstoffzellensystem durchgeführt. Die Brennstoffzelle hat eine elektrische Leistung von 750 W und eine thermische Leistung von 1,1 kW. Zur Unterstützung in der Heizperiode und für Bedarfsspitzen ist ein Zusatzheizgerät mit einer thermischen Leistung bis 30 kW verbaut. Das System verfügt über einen vergleichsweise kleinen Speicher mit einem Volumen von rund 200 Litern.

Die PEM-Brennstoffzelle wird mit Erdgas betrieben. In einem der Brennstoffzelle (BZ) vorgeschalteten Reformier wird das Erdgas zu Wasserstoff reformiert und anschließend im BZ-Stack zu Strom und Wärme umgewandelt. Dieser Prozess dauert etwa vier Stunden, in denen kein Strom und keine Wärme aus der KWK-Anlage zur Verfügung stehen und das System für die Regeneration Strom bezieht.

Die Ergebnisse der Wochenversuche zeigen, neben den batteriespezifischen Wirkungsgraden der einzelnen Speicher, ein vom Hersteller der Brennstoffzelle abweichendes Betriebsverhalten. Die Brennstoffzelle liefert im Betrieb die vom Hersteller beschriebenen Leistungen, die angegebene Laufzeit erreicht das System nicht. In den Versuchsreihen variiert die Laufzeit, im Mittel beträgt sie rund 12 Stunden, gefolgt von bis zu 3 Stunden ohne Strom und Wärmebereitstellung.

In Abbildung 3.7 ist ein Zyklus der Brennstoffzelle dargestellt. Die Brennstoffzelle benötigt eine Standby-Leistung von 30 bis 50 W. Neben der verbauten Leistungselektronik werden damit auch die integrierten Pumpen betrieben.

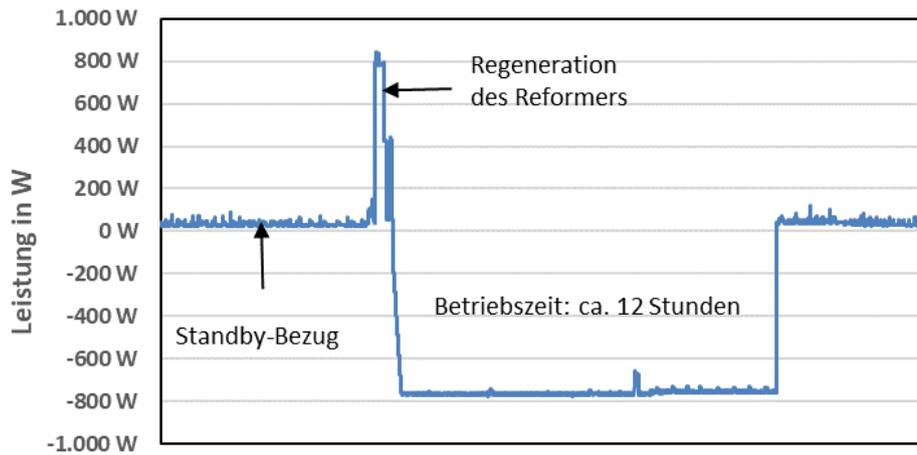


Abbildung 3.7: Leistungszyklus der Stromproduktion der Brennstoffzelle

Die Regeneration des Reformers findet vor dem Start der Brennstoffzelle statt. Dafür bezieht die Brennstoffzelle knapp 800 W. Im Betrieb liefert die Brennstoffzelle zwischen 650 W und 750 W. Dieser Wert ist abhängig vom Eigenverbrauch des KWK-Systems, der im Wesentlichen durch die nötige Pumpenleistung, die das System aufbringen muss, charakterisiert ist.

Das Brennstoffzellensystem wird mit insgesamt vier der fünf Batteriespeicher getestet, der Betrieb mit Speichersystem 4 kann nicht ausgewertet werden, da das Speichersystem, wie in der Auswertung der Einzelversuche beschrieben, in unregelmäßigen Abständen eine vollständige Be- und Entladung mit maximaler Leistung aus dem Stromnetz durchführt. Teilweise liegt nur eine vollständige Beladung vor, wobei der Strom dann wieder ins Hausnetz abgegeben wird, sodass die Energieflüsse nicht mehr nachvollzogen werden können.

Theoretisch sollte die Brennstoffzelle bei einer thermischen Leistung von 1,1 kW ab einem Wärmebedarf von 25 kWh am Tag die maximale Laufzeit erreichen. In den Versuchswochen werden jeweils rund 240 kWh Wärme benötigt, was etwa 34 kWh am Tag entspricht. Trotzdem erreicht die Brennstoffzelle in den 168 Stunden nur Laufzeiten zwischen 90 und 100 Stunden.

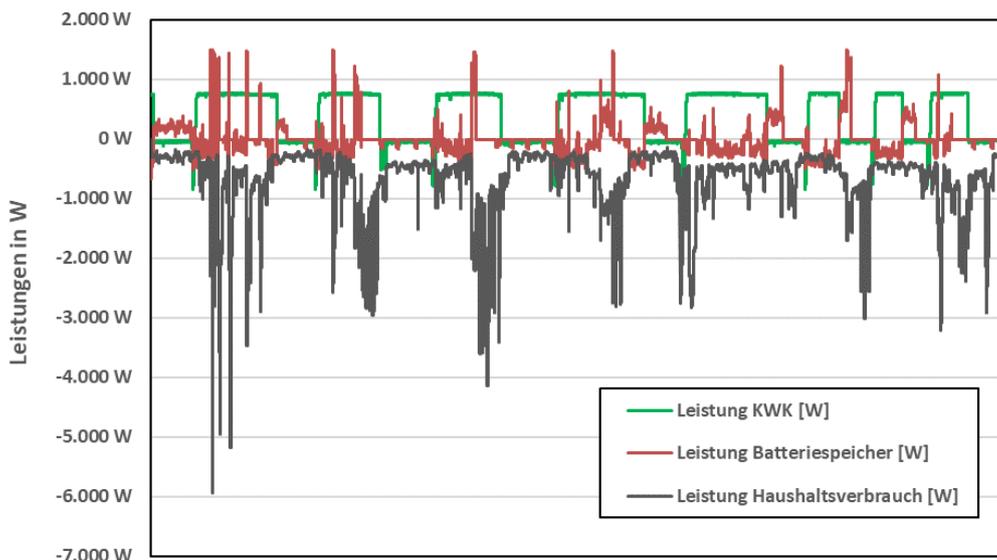


Abbildung 3.8: Leistungsverläufe eines Wochenversuchs

Abbildung 3.8 zeigt den typischen Verlauf einer Systembetrachtung über den Zeitraum von einer Woche. Der Strombedarf des Haushalts sowie der thermische Bedarf, sind in allen Messungen identisch. Der Strombedarf beträgt in der Woche 113,07 kWh. Das Verhalten der KWK-Anlage und der Batterie weichen in jeder Versuchsreihe leicht voneinander ab. Das liegt vor allem an der Brennstoffzelle, auf deren interne Steuerung und Regelung keinen Einfluss genommen werden kann. Die Laufzeiten variieren daher um bis zu 10 Stunden pro Versuchsreihe.

Beim Betrieb des gesamten Systems wird ein Wärmebedarf, Heizwärme und Trinkwarmwasser von rund 230 kWh durch die Wärmesenke abgeführt. Diese Wärme wird von der Brennstoffzelle und dem Zusatzheizgerät gedeckt. Im Mittel kommen 37,3 % der Wärme aus der KWK-Anlage, die übrigen 62,7 % liefert das Zusatzheizgerät.

In Tabelle 3.3 sind die Anteile des Stroms dargestellt, die von den Batterien aufgenommen bzw. bereitgestellt werden. Die absoluten Energiemengen unterscheiden sich, da die Laufzeiten der Anlagen leicht variieren, daher sind die prozentualen Anteile dargestellt. Die Ergebnisse von Speichersystem 4 konnten aufgrund des fehlerhaften Verhaltens nicht ausgewertet werden.

Tabelle 3.3: Effizienz der Batteriespeichersysteme

	KWK-Beladung der Batterie	Anteil der Entladung am Bedarf des Obj	Wirkungsgrad der Beladung	Wirkungsgrad der Entladung
System 1	25,4%	9,6%	84,3%	88,6%
System 2	22,8%	10,2%	87,5%	87,6%
System 3	29,4%	14,6%	84,1%	86,6%

Die Speichersysteme sind in der Lage zwischen 22,8 % und 29,4 % des produzierten Stroms zwischengespeichern. Die Brennstoffzelle produziert dabei im Mittel 70 kWh Strom je Versuchswoche. Ohne den Einsatz der Batteriespeichersysteme würde die Energie in das Stromnetz eingespeist werden. Beim Entladen der Batterie können die Speicher einen Anteil zwischen 9,6 % und 14,6 % des vom Haushalt benötigten Stroms decken. Die Energie aus dem Speicher verringert damit den Netzbezug.

Im Verlauf der Versuchswoche werden die Speicher immer wieder be- und entladen und das mit variierenden Leistungen. Die Effizienz der realen Beladung des Speichers kann an dieser Stelle, mit den zuvor in den Einzelversuchen identifizierten Wirkungsgraden bei bestimmten Betriebspunkten verglichen werden. Über den Betrachtungszeitraum von einer Woche und bei einem Betrieb mit realen Verbrauchsdaten kann gezeigt werden, dass die zu erwartenden Beladeleistungen unterhalb von 200 W häufig auftreten. Die Wirkungsgrade entsprechen in etwa der Beladung mit 100 bis 200 W.

Beim Entladen der Speicher werden Wirkungsgrade zwischen 86,6 % und 88,6 % erreicht. Diese Werte liegen unterhalb der zuvor ermittelten maximalen Wirkungsgrade bei den jeweils optimalen Leistungen der Speicher.

Ein Vergleich der Speichersysteme untereinander sollte auf Basis dieser Daten nicht vorgenommen werden. Die Laufzeiten der Brennstoffzelle sowie die Zeitpunkte, in denen das Gerät Strom bereitstellt, unterscheiden sich, trotz des gleichen Wärme- und Stromlastprofils in allen Versuchsreihen, wenn auch nur geringfügig. Die Steuereinheit der Brennstoffzelle gibt vor, wann das Brennstoffzellenmodul aktiv ist und welcher Anteil der Wärme durch das Zusatzheizgerät gedeckt wird. Selbst wenn die Brennstoffzelle bilanziell in allen Versuchsreihen die gleiche Energiemenge bereitgestellt hat, sorgt eine Verschiebung der Betriebszeit dafür, dass wenn Strom produziert wurde in jedem Versuch ein anderer Bezug des Gebäudes vorlag. Damit verschieben sich die Überschüsse und Bedarfe, sodass die Batterie anders be- und entladen wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass ca. ein Viertel des in dem Versuchszeitraum produzierten Stroms zwischengespeichert werden kann und damit 10 bis 15 % der vom Haushalt benötigten Energie bereitgestellt werden können. Die Kapazität hat auf das Verhalten keinen großen Einfluss zwischen dem Speichersystem 1 mit 6 kWh und dem System 2 mit 2 kWh sind die Unterschiede sehr gering und ggf. nur auf die ungleichen Laufzeiten zurückzuführen. Ein größerer Speicher ist vor allem dann energetisch sinnvoll, wenn der Speicher häufig vollständig beladen ist und die Überschüsse aus der KWK-Anlage ins Netz eingespeist werden müssen. Dieses Verhalten konnte in den Wochenversuchen nicht festgestellt werden.

Eine KWK-Anlage mit einer niedrigen elektrischen Leistung, sollte mit einem vergleichsweise kleinen Speicher ausgerüstet werden. Ein größerer Speicher führt nicht zu einer Steigerung der Eigenverbrauchsanteile und der Autarkie und ist energetisch nicht sinnvoll.

### 3.2.3 Ergebnisse aus dem Betrieb des ottomotorischen Systems

Das ottomotorische System ist ähnlich aufgebaut wie das Brennstoffzellensystem. Neben der KWK-Anlage wird ein Zusatzheizgerät in Form einer Gasbrennwerttherme und ein thermischer Speicher benötigt. Die untersuchte Anlage kann, anders als die Brennstoffzelle, in der Leistung modulieren. Die elektrische Leistung kann 2,85, 4,1 oder 5,5 kW betragen wobei das Gerät eine thermische Leistung von 7,5, 10,6 oder 14,8 kW liefert. Das angeschlossene Brennwertgerät kann eine Leistung bis zu 38 kW liefern. Die KWK-Anlage wird wärmegeführt betrieben.

Die KWK-Anlage wird durch einen elektrischen Speicher mit einer Nutzkapazität von 5,9 kWh ergänzt. Aufgrund der zu erwartenden hohen Überschüsse aus dem Betrieb des KWK-Geräts wird bewusst ein größerer Speicher für die Versuche gewählt. Der Batteriespeicher kann laut Hersteller mit bis zu 4,2 kW be- und entladen werden, in den Versuchen kann nur eine Leistung von 3,3 kW nachgewiesen werden.

Auf dem Prüfstand wird die Integration des Systems in ein Gebäude aus dem Projektgebiet simuliert. Dazu werden der thermische und elektrische Bedarf einer Woche in der Heizperiode als Grundlage für den Betrieb des KWK-Systems und der Batterie gewählt. Das Gebäude besteht aus drei Wohneinheiten und einen Gewerbebetrieb im Erdgeschoss.

Der Wärmebedarf des Gebäudes beläuft sich in der untersuchten Woche auf 1.465,58 kWh, wovon 1.247,60 kWh auf den Heizwärmebedarf und 217,98 kWh auf die Bereitstellung von Trinkwarmwasser entfallen. Das Heizsystem, bestehend aus KWK-Anlage und Zusatzheizgerät, lieferte insgesamt 1.505,22 kWh Wärme. Demnach entfallen rund 39,64 kWh auf Wärmeverluste durch den Speicher und die Leitungen. In einem realen Gebäude würden diese Verluste höher ausfallen, da die Leitungswege im Laboraufbau vergleichsweise kurz sind. Ein Großteil der Verluste sind demnach auf den Warmwasserspeicher zurückzuführen.

Die KWK-Anlage selbst liefert 1.245,47 kWh oder 82,7 % der benötigten Wärme, 259,75 kWh oder 17,3 % werden durch das Zusatzheizgerät bereitgestellt. Thermisch ist die Anlage für den Einsatz in dem Gebäude passend dimensioniert. Sie erreicht eine Laufzeit von etwa 110 Stunden und liefert dabei einen Großteil der benötigten Wärme.

In dem untersuchten Zeitraum weist das betrachtete Gebäude einen elektrischen Bedarf von 178,24 kWh auf. Der Lastgang des Strombezugs ist dabei klar durch die Gewerbeeinheit bestimmt. Ein Großteil des benötigten Stroms wird von montags bis freitags bezogen, der Bedarf am Wochenende ist deutlich geringer. Gleichzeitig wird während der Arbeitszeit mehr Strom benötigt als abends und in der Nacht.

In Abbildung 3.9 ist das Lastprofil des Strombedarfs für den betrachteten Zeitraum dargestellt. Während der Nacht und am Wochenende liegt die Grundlast des Gebäudes um 300 W, in der Woche um ca. 2.000 W mit Peaks bis zu 8.300 W.

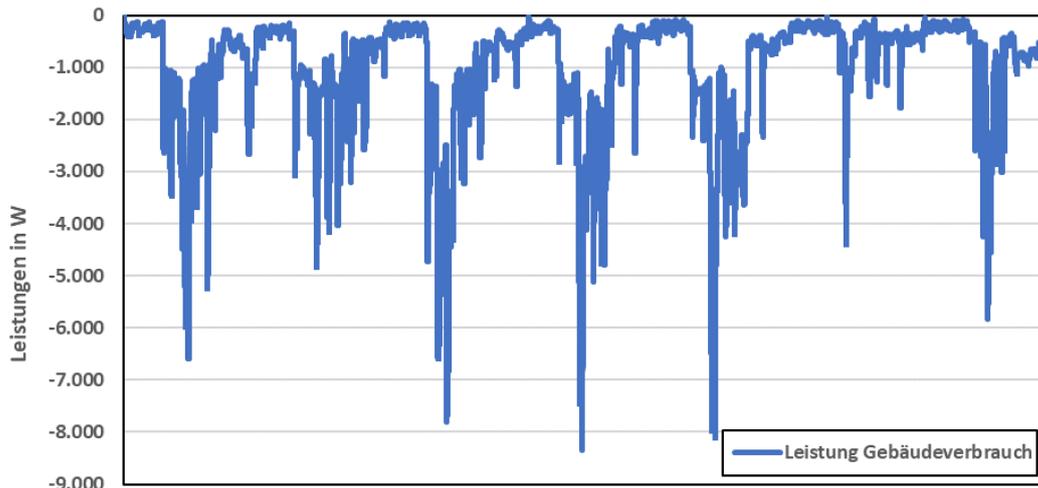


Abbildung 3.9: Elektrischer Bedarf des untersuchten Gebäudes

Die KWK-Anlage liefert im betrachteten Zeitraum 535,18 kWh Strom. Damit passen die Stromproduktion und der Bedarf des Gebäudes nicht so gut zusammen wie die thermische Erzeugung und der Wärmebedarf. Etwa 65,8 % des erzeugten Stroms werden in das Netz eingespeist, 26,9 % werden direkt im Gebäude verbraucht. Der Netzbezug beträgt über die Dauer einer Woche 8,71 kWh oder 4,9 % des Strombedarfs. Die Energieflüsse sind in der nachfolgenden Abbildung 3.10 dargestellt.

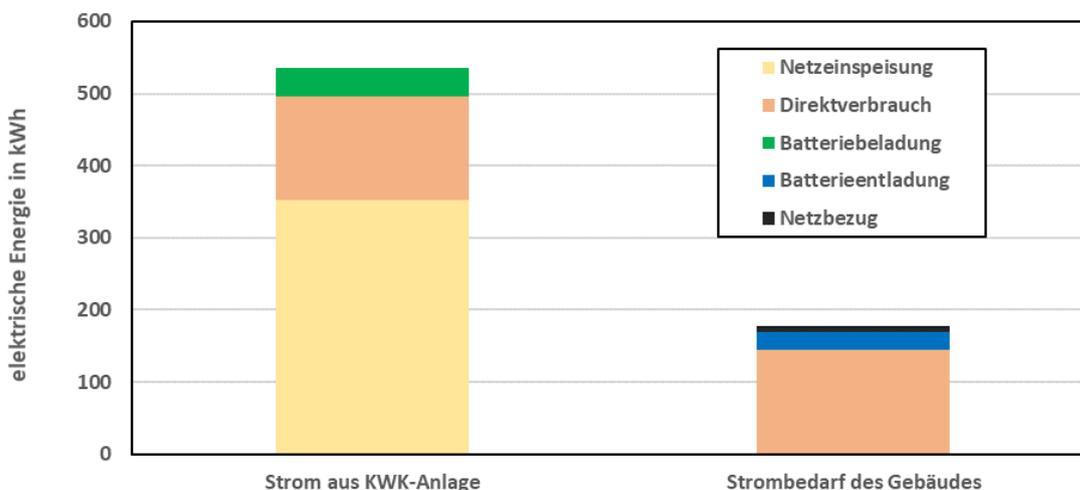


Abbildung 3.10: Verteilung der Stromerzeugung und des Bedarfs

Trotz des deutlichen Überschusses kann die eingesetzte Batterie den Eigenverbrauch steigern. Im Verlauf der Versuchsreihe wird die Batterie mit 38,89 kWh beladen und speist 25,65 kWh in das Gebäude zurück. Demnach werden 7,3 % des von der KWK-Anlage erzeugten Stroms in der Batterie zwischengespeichert, wobei die Entladung der Batterie 14,4 % des Strombedarfs des Gebäudes deckt.

Der durchschnittliche Wechselrichterwirkungsgrad beim Beladen der Batterie liegt bei 83,9 %, der Wirkungsgrad der Entladung erreicht 93,8 %.

Die Ergänzung des KWK-Systems durch einen Batteriespeicher kann helfen, einen Teil des überschüssigen Stroms im Gebäude zu halten, um ihn bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt zu nutzen. Das ist in dem untersuchten Fall gelungen. Trotz des passenden thermischen Profils ist der Strombedarf dieses Objektes für die Strombereitstellung der KWK-Anlage zu niedrig, sodass ein Großteil des Stroms in das öffentliche Netz eingespeist wird.

### 3.2.4 Erkenntnisse aus der Laboruntersuchung

Durch die Untersuchungen im Labor können Optimierungspotenziale ermittelt werden. Alle Speichersysteme werden mit einem Energy Meter ausgeliefert, welches in die Hausanschlussleitung am Übergang vom Haus- in das öffentliche Stromnetz installiert wird. Es misst die aus dem Netz bezogene oder in das Netz eingespeiste Leistung und gibt dem Speichersystem ein Signal zu laden, wenn Strom ins Netz eingespeist wird oder zu entladen, wenn Energie bezogen wird. Sofern der Speicher nicht voll bzw. leer ist soll das System die Leistung am Hausübergabepunkt auf null regeln.

Zwei der untersuchten Speicher werden mit jeweils zwei Energy Metern ausgeliefert. Eines wird wie gewohnt am Übergabepunkt des Gebäudes, das andere an der Anschlussleitung des Stromerzeugers installiert. Eines dieser beiden Systeme führt zu einem fehlerhaften Betrieb des Batteriespeichers.

Abbildung 3.11 zeigt das Verhalten der Brennstoffzelle während der Regeneration des Reformers. Die Brennstoffzelle bezieht rund 800 W aus dem Netz. Gleichzeitig liegt ein Haushaltsverbrauch von etwa 300 W vor. Statt diesen Bedarf von rund 1.200 W zumindest teilweise zu decken, erkennt die Batterie den Bezug der Brennstoffzelle als eine Stromproduktion. Die Batterie verrechnet die vermeintlichen 800 W Strom mit dem Verbrauch von 300 W, und belädt mit der daraus resultierenden Leistung von etwa 500 W.

Wichtiger als die Integration eines elektrischen Speichers kann eine optimierte Auslegung der KWK-Anlagen für den Einsatz in einem Gebäude sein. Eine KWK-Anlage wird in der Regel wärmegeführt betrieben, daher sollte der Wärmebedarf ausreichend hoch sein, um möglichst hohe Laufzeiten zu erreichen. Gleichzeitig sollte der Strombedarf des Gebäudes zu der Stromerzeugung der KWK-Anlage passen. Fällt der Strombedarf deutlich höher aus, sind gegebenenfalls andere Erzeugungsanlagen zu bevorzugen. Gleichzeitig wird eine Batterie kaum Beladen, wenn es keine Überschüsse aus der Erzeugung der Anlage gibt. Auch eine deutlich über dem Bedarf liegende Erzeugung ist nicht optimal. Ein Speicher ist unter Umständen ständig vollständig Beladen und bietet damit nur geringe Flexibilitäten.

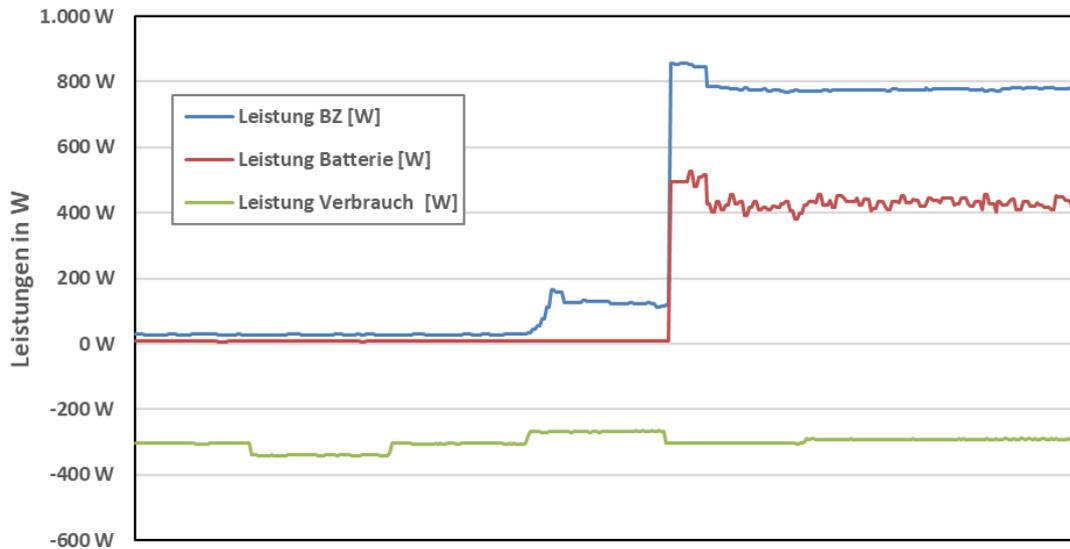


Abbildung 3.11: Fehlerhafte Verhalten der Batterie

Der Energy Meter zur Leitung des Erzeugers kann nicht zwischen einem Bezug und einer Bereitstellung von Strom unterscheiden. Dadurch verhält sich die Batterie immer dann falsch, wenn die Brennstoffzelle Strom benötigt, statt produziert.

Dieses Verhalten tritt bei PV-Anlagen nicht in diesem Maße auf, daher ist das Phänomen vermutlich bislang nicht relevant gewesen. Für den Einsatz von Batteriespeichern mit einer KWK-Anlage sollte auf diese Art der Erzeugungsmessung verzichtet werden. Bei Systemen mit nur einem Energy Meter am Hausübergabepunkt kann dieser Fehler nicht auftreten.

So gut wie alle Speichersysteme in diesem Projekt können fernausgelesen werden. Einige Hersteller bieten eine eigene App für das Mobiltelefon, andere erlauben den Zugriff auf den Speicher über einen Browser oder die Website des Herstellers. Einige Speichersysteme verfügen zusätzlich über Displays an den Batteriespeichern selbst. Sofern diese nur beim Berühren des Bildschirms oder einer Taste aktiviert werden ist davon auszugehen, dass der Energiebedarf für das Display vernachlässigbar ist. Zwei der untersuchten Systeme verfügen über Displays deren Hintergrundbeleuchtung immer an ist und die jeweiligen Betriebsdaten zeigen. Dadurch werden durchgehend einige Watt benötigt. Dieses Verhalten ließe sich durch ein einfache Softwareupdate beheben und die langfristige Effizienz verbessern.

## 4. Integration in die vorhandene Anlageninfrastruktur

*In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die Auswahl der Batteriespeicher für geeignete Referenzobjekte getroffen und deren Installation umgesetzt ist. Hierbei liegt der Fokus darauf, Installations- und Anmeldeschwierigkeiten zu identifizieren. Die im Feld vertretenen Batterien decken dabei das am Markt verfügbare Kapazitätsspektrum ab und sind so gewählt, dass eine hohe Anzahl an Herstellern und Technologien erprobt werden.*

*Als häufigste Ursache von Fehlern im Betrieb der Batterie sind Netzwerkproblem zu nennen. Um dies zu vermeiden, sind andere Informationskanäle notwendig, um Betreiber über Störungen in Kenntnis zu setzen. Ein hoher Anteil der vertretenen Hersteller bietet den Batteriebetreibern über einen Webzugriff die Möglichkeit, die Energieströme im eigenen Haus zu überwachen. Dies trifft bei den AnwenderInnen auf positive Resonanz. Lediglich der Abruf des Ladezustandes der Batterie könnte vereinfacht werden und würde direkt zur weiteren Steigerung der Eigenverbrauchsquote beitragen, da viele AnwenderInnen bereit sind ihre Verbräuche dem Erzeugungsprofil der KWK und Ladezustand des Batteriespeichers anzupassen. Es wird besonders auf aufkommende Herausforderungen, die im Betrieb mit KWK-Anlagen auftreten, eingegangen. Auftretende Problemstellungen im Installationsprozess sind transparent dokumentiert. Aus der Nutzerbetreuung wurden, bezogen auf den Betrieb von KWK-Anlagen, Handlungsempfehlungen abgeleitet, welche die Sicht der AnwenderInnen abbilden. Um die KWK Technologie in Privathaushalten zu etablieren, sind KWK-Anlagen erforderlich,*

- die regulär/schnell/kostengünstig vom Fachhandwerker installiert und gewartet werden können,*
- deren Anschaffungs- und Wartungskosten sich innerhalb der Lebenszeit amortisieren,*
- die einfach angeschlossen werden, ohne Meldepflichten (außer beim Netzbetreiber),*
- die keine Einbußen beim Wärme komfort mit sich bringen,*
- deren Betrieb nicht als unternehmerische Tätigkeit gewertet wird,*
- die mit Gas (ohne Energiesteuer) betrieben werden,*
- deren Energieströme für NutzerInnen leicht abzulesen sind (hierzu zählt auch der Gasbezug oder die Wärmeerzeugung)*
- und eine Vergütung/Verrechnung für eingespeisten Strom (ohne steuerliche Pflichten) erhalten.*

*Nur unter diesen Voraussetzungen werden KWK-Anlagen in großer Anzahl Verbreitung in Privathaushalten finden. Diese Empfehlungen sind für die am Markt aufkommende Brennstoffzellentechnologie zu berücksichtigen. Besonders der zeitliche Aufwand für Installation und Verwaltung der nötigen Betreiberpflichten ist als kritisch zu bewerten und muss reduziert werden.*

## 4.1 Auswahl von Referenzobjekten

Im folgenden Abschnitt sind Auswahlkriterien für die Referenzobjekte sowie der zugehörigen Batteriespeicher beschrieben, welche in Abstimmung zwischen GWI, FH Dortmund, HRW und ICM erarbeitet werden konnten. Die folgenden Auswahlkriterien wurden gemeinsam festgelegt:

- Bereitschaft der NutzerInnen zur Teilnahme am Forschungsvorhaben
- Technische Eignung (Einsatzmöglichkeiten, Erhöhung der Eigenverbrauchsquote/Autarkie)
- Vergleichbarkeit der Objekte bzw. unterschiedliche Einflussfaktoren – Erkennen von Ableitungen/Tendenzen
- Bauliche Eignung (Platzbedarf, Speicher, Anschlussmöglichkeit)
- Motivlage der NutzerInnen
- Funktionalität der Datenübertragung

Im September 2017 wurden alle TeilnehmerInnen des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ per E-Mail oder Briefsendung kontaktiert. In diesem Rahmen wurde über das Nachfolgeprojekt „KWK plus Speicher“ informiert sowie eine Informationsveranstaltung zum Projekt angekündigt. Des Weiteren wurde, falls Interesse an einer Teilnahme besteht, um eine Rückmeldung gebeten. Die Rücklaufquote betrug knapp 50 %. Daraufhin wurden die ca. 40 interessierten TeilnehmerInnen zu einer Informationsveranstaltung durch ein weiteres Anschreiben eingeladen.

Für zusätzliche Informationen wurde in Abstimmung zwischen GWI und ICM ein Projektflyer erstellt, welcher in Anhang 1 einzusehen ist. Darin wurden neben Projekthinhalten und -zielen dargestellt, welche Voraussetzungen für eine Teilnahme am Projekt erfüllt werden müssen. Darüber hinaus wurde dem Flyer für die Teilnehmenden ein Ablaufplan für das Jahr 2017/2018 beigelegt, welcher in Anhang 3 einzusehen ist.

Die o. g. Informationsveranstaltung, an der 32 AnlagenbetreiberInnen teilnahmen, fand am 16.11.2017 statt. Im Rahmen der Veranstaltung informierten das GWI, die FH Dortmund und die ICM über das Projekt und fragten das Partizipationsinteresse seitens der TeilnehmerInnen ab. Dies geschah mithilfe einer von der ICM bereitgestellten Interessenserklärung, mit deren Unterzeichnung sich die KWK-Anlagen BetreiberInnen zu einer individuellen Prüfung der Auswahlkriterien bereit erklärten. Hierzu zählt u. a. die Begehung der Keller der TeilnehmerInnen. Bereits nach der Veranstaltung bekundeten 29 Teilnehmer schriftlich ihr Interesse an einer Projektteilnahme.

Zusätzlich hatten noch weitere 19 Teilnehmende ihr Interesse, die nicht an der Veranstaltung teilnehmen konnten, sodass insgesamt 48 Haushalte ihr Interesse äußerten.

Das schriftlich bekundete Interesse an einer Projektteilnahme war der erste Schritt zur Auswahl geeigneter Referenzobjekte. Im Anschluss an die Informationsveranstaltung, starteten

im Dezember 2017 die Terminvereinbarungen zur Prüfung der baulichen Eignung der jeweiligen Kellerräume durch das GWI. Die Prüfungen der baulichen Eignung der Räumlichkeiten und Anschlussmöglichkeiten aller Interessierten wurden im ersten Quartal 2018 abgeschlossen. Hierbei wurde der Heizungskeller sowie Nebenräume und alternative Aufstellräume inspiziert und die Gegebenheiten dokumentiert. Erfragt wurde ebenfalls, ob weitere Renovierungen am Objekt erfolgt sind oder sich die Nutzerstruktur verändert hat.

Für einen sinnvollen Einsatz des elektrischen Speichers und dessen Bewertung wurden dementsprechend relevante Kennzahlen, wie zum Beispiel die Stromproduktion, der Eigenverbrauch, die Netzeinspeisung und der Netzbezug, evaluiert. Weitere Informationen hierzu sind in Abschnitt 4.2 beschrieben.

Das Team der FH Dortmund erarbeitete einen Vorschlag zur Differenzierung des Auswahlkriteriums „Motive zur Teilnahme am Modellprojekt“. Hierzu wurde der vorliegende Datensatz der Prä-/Post-Befragung aus dem Vorprojekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ hinsichtlich der unterschiedlichen Motivlagen der Nutzenden ausgewertet. In den Ergebnissen zeigte sich, dass die verschiedenen Nutzertypen vor allem durch ökologische und finanzielle Motive gekennzeichnet sind. Diese Erkenntnisse können bei der anschließenden Auswahl der Referenzobjekte genutzt werden, um eine möglichst ausgeglichene Verteilung dieser beiden Motivlagen innerhalb der Gruppe der TeilnehmerInnen zu gewährleisten.

Auf Grundlage der o.g. Kriterien wurden bis zu 20 Interessierte für die Teilnahme am Projekt ausgewählt. Anhand der beschriebenen Kriterien wurde für 31 Objekte der energetische Nutzen einer Batterie durch Simulationen berechnet. Für eine Vorauslegung der Batteriespeicher wurde ein Excel-Tool entwickelt, mit dem eine Bewertung der 5-min Messwerte hinsichtlich der KWK-Stromproduktion, Einspeisung und Eigenverbrauch möglich ist. Hierbei wurde die Steigerung der Eigenverbrauchsquote für eine 2 kWh Batterie sowie einer 15 kWh Batterie berechnet, wobei es sich um die am Markt verfügbaren minimalen und maximalen Speichergroßenkapazitäten für das Segment EFH handelt.<sup>1</sup> Die berechneten Steigerungen für den Eigenverbrauch sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Im Objekttitel ist die verbaute KWK-Technologie sowie der thermische Energieverbrauch aus dem Bilanzjahr 2017 angegeben. Es zeigt sich, dass einige Objekte bereits ohne Batterie hohe Eigenverbrauchsquoten (EVQ) aufweisen, welche aus diesem Grund für den Betrieb mit Batterie ausgeschlossen werden. Weiterhin zeigt sich, dass die Steigerung der EVQ  $\Delta EVQ_{0-2}$  deutlich höher ist als die Steigerung durch den Einbau einer deutlich größeren Batterie von 15 kWh  $\Delta EVQ_{2-15}$ . Im Mittel weisen die Objekte eine EVQ von 51,8 % auf. Durch die Integration einer 2 kWh Batterie wäre im Mittel eine Steigerung der EVQ um durchschnittlich 25,3 % möglich. Durch die Integration einer Batterie mit der Kapazität von 15 kWh würde diese im Vergleich zu einer 2 kWh Batterie um lediglich 4,6 % steigen. Die vorab durchgeführten Simulationen deuten bereits an, dass die in Kombination mit KWK-Anlagen eingesetzten Batterien unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eher klein

---

<sup>1</sup> Stand 2017

dimensioniert sein sollten. Das entspricht den Ergebnissen aus Kapitel 2 und 3. Um das gesamte Marktspektrum abzubilden und auch die Funktionalität mit großen Batterien zu demonstrieren, wurden dennoch unterschiedliche Speichergrößen im Feld installiert.

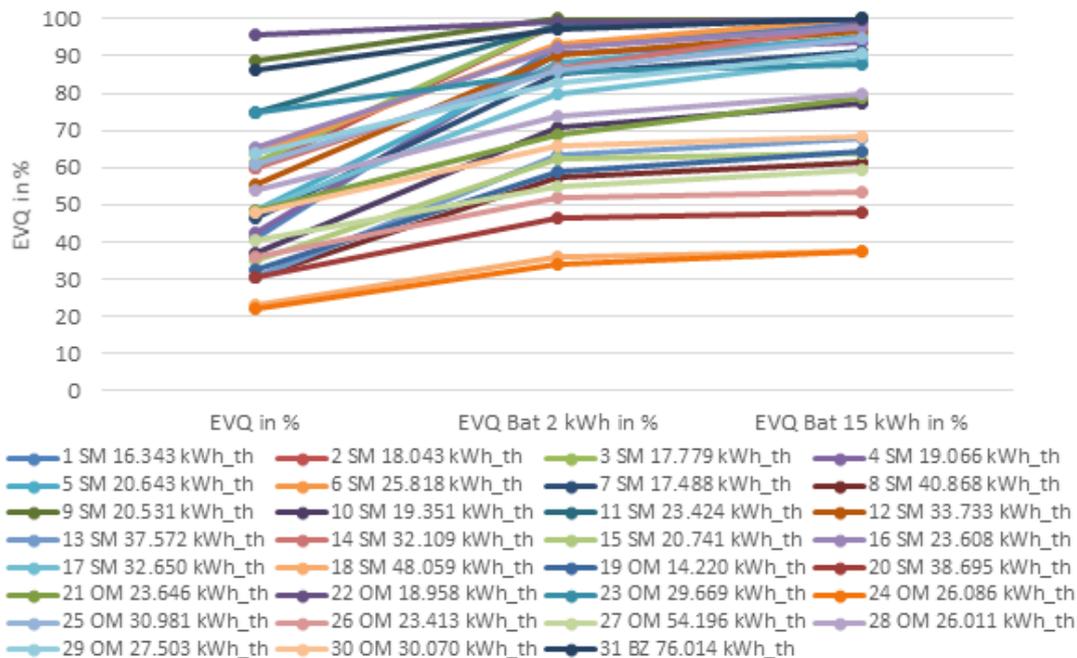


Abbildung 4.1: Simulationsergebnisse für 31 Objekte, welche zur Zuordnung und Dimensionierung der Batteriespeicher genutzt werden. Hierzu wird jeweils die EVQ ohne Batterie, mit einer 2 kWh Batterie sowie einer 15 kWh Batterien in % dargestellt. Hierbei wurden Haushalte von 1-31 nummeriert sowie die KWK-Technologie und der thermische Energieverbrauch des Objektes im Titel aufgeführt.

Eine äquivalente Betrachtung der 31 Objekte wird für den Autarkiegrad durchgeführt, welcher in Anhang 8 dargestellt ist. Im Mittel weisen die Haushalte ohne Batterie einen AG von 41,1 % auf, der sich durch die Installation einer kleinen Batterie um durchschnittlich 20,5 % erhöhen würde. Erhöht man die Batteriekapazität auf 15 kWh, ist im Mittel eine Erhöhung des AG um 3,7 % möglich. Auch unter Berücksichtigung der Autarkie zeigen erste Ergebnisse für die Auslegung, dass eher kleine Batterien in Kombination mit KWK-Anlagen ökonomisch sinnvoll sind.

## 4.2 Systemanalytische Auslegung, Dimensionierung und Zuordnung

In die Erstellung der Ausschreibung fließen die Ergebnisse der in AP 2 durchgeführten Marktrecherche ein. Hierzu zählt der am Markt erkennbare Rückgang von Blei-Säure Batterien und der Anstieg von Lithium Batteriespeichern. [25] Demzufolge handelt es sich bei einem Großteil der Batterien um lithiumbasierte Batteriespeicher. Neben der oben beschriebenen Erhöhung der EVQ und des AG durch verschiedenen Kapazitäten, sind auch die in [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41] beschriebenen Kriterien berücksichtig.<sup>2</sup> Es ist anzumerken, dass es sich um Studien

<sup>2</sup> Bei Teilen der aufgeführten Referenzen wurden Vorgängerversionen betrachtet. Die genannten Quellen können als aktuelle Marktübersicht genutzt werden.

zu Batteriespeichern in Kombination mit PV-Anlagen handelt. Folgende Punkte finden in der Auslegung der Batteriespeicher Berücksichtigung:

- Lade- und Entladewirkungsgrad
- AC-/DC-gekoppelt
- Möglichkeit zur Überwachung/Steuerung per App
- Zyklische Lebensdauer/ Kalendarische Lebensdauer
- Selbstentladerate
- Maximale/Minimale Be- und Entladeleistungen
- Anzahl der Phasen
- Erweiterbarkeit des Batteriesystems auf höhere Kapazitäten
- Anspruch auf Garantie
- Regelgeschwindigkeit

Die Objekte der Mitmachenden mit einer unterzeichneten Bereitschaftserklärung wurden technisch im Detail untersucht. Ein weiteres Auswahlkriterium war die Zuverlässigkeit des Anlagenbetriebes. Damit eine Vergleichbarkeit und im Falle einer Störung ein weiteres System vorhanden ist, wurde ein Konzept entworfen, in dem zwei Objekte mit ähnlichen oder unterschiedlichen Verbrauchskennwerten, mit den gleichen Batteriespeicher ausgestattet wurden. Die finale Zuordnung ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Ausgewählte Haushalte, welche im Projekt um einen Batteriespeicher erweitert wurden. Hierbei sind jeweils paarweise Haushalte mit identischen Batterien ausgestattet. Kriterien sind hierbei die Zuverlässigkeit der KWK-Anlage sowie Strom- und Wärmebedarf der Objekte.

Objekt-paar	KWK	$p_{KWK}^{Nenn}$	Strombedarf in kWh	Wärmebedarf in kWh	Zelltyp Batterie	$C_{Bat}^{Nutz}$ in kWh
1	Otto-Motor	1	2.100	26.086	Lithium	1,98
	Otto-Motor	1	3.855	23.413		
2	Stirling-Motor	1	3.384	16.343	Lithium	3,00
	Stirling-Motor*	1	2.675	37.572		
3	Stirling-Motor	1	3.656	20.643	Blei	5,00
	Stirling-Motor	1	2.634	20.741		
4	Stirling-Motor	1	4.874	33.733	Lithium	3,87
	Stirling-Motor*	1	5.438	23.608		
5	Stirling-Motor	1	6.077	32.109	Lithium	4,80
	Stirling-Motor	1	2.945	19.351		
6	Stirling-Motor	1	3.502	17.488	Lithium	4,00
	Otto-Motor	1	4.348	54.196		
7	Otto-Motor	1	5.303	23.646	Lithium	5,90
	Stirling-Motor	1	4.494	25.818		
8	Otto-Motor	1	4.689	30.070	Blei	6,00
	Stirling-Motor*	1	4.904	32.650		
9	Stirling-Motor **	1	2.972	19.055	Lithium	7,68
	Otto-Motor	1	6.497	30.981		
10	Brennstoffzelle	1,5	11.374	57.020	Lithium	15,00
11	Otto-Motor	4,7	11.614	123.833	Lithium	13,50

\* im Projektverlauf gegen BZ ausgetauscht

\*\* im Projektverlauf um 2,4 kWp PV-Anlage erweitert

### **4.3 Installation der Stromspeicher und der zusätzlichen Messtechnik**

Das Arbeitspaket dokumentiert die Installationen der Stromspeicher und der zusätzlichen Messtechnik. Um Installationsfehler der für das Forschungsvorhaben benötigten Messtechnik zu vermeiden, wurde schon in der Ausschreibung auf eine ausreichende Informationsdarstellung der zu verbauenden Messtechnik geachtet. Vor Beginn der Installation fand zunächst eine Vorbesprechung mit einem Techniker und einem Ingenieur vom GWI sowie dem Fachhandwerker zur Installation der Messtechnik vor Ort statt. Nach der Installation erfolgte die Abnahme ebenfalls über einen Techniker und Ingenieur vom GWI. Die Prüfung ließ sich teilweise nicht am selben Tag Vor-Ort abschließen, da dies voraussetzt, dass alle zu messenden Zustände eintreten. Für das Beladen der Batterie beispielsweise muss der Zustand einer laufenden KWK-Anlage und Überschuss des produzierten Stromes im Haushalt vorliegen.

Zum genaueren Verständnis wurden den Installateuren Vor-Ort der Schaltplan zur Messtechnik erläutert. Viele der Installationen konnten innerhalb eines Tages abgeschlossen werden. Einige Installationen haben mehr als einen Tag gedauert. Keine Installation hat mehr als zwei volle Arbeitstage beansprucht. Weiterhin hat sich die Erfahrung der Installateure mit der verbauten Batterie sowie der zugehörigen Software stark auf die Dauer der Installation ausgewirkt. Durch das Gewicht der Batterie wurden häufig mehr als ein Mitarbeiter benötigt, was sich in den Installationskosten niedergeschlagen hat.

Ein weiterer Faktor war der Zustand des Stromanschlusskastens in dem jeweiligen Objekt, der sich entscheidend auf die Installationsdauer ausgewirkt hat. Für die Einbindung des Stromspeichers sowie die zusätzlich benötigte Messtechnik besteht Platzbedarf. Im Falle von Platzmangel musste ein weiterer Versorgungskasten im Keller oder näherer Umgebung installiert werden. Dies erhöht den Aufwand bei der Installation erheblich. Ob dieser Fall eintritt, hängt davon ab, ob in dem Raum, in dem der Stromanschlusskasten platziert wird, auch Platz für den Batteriespeicher ist oder ob dieser ggf. in einem anderen Raum zu platzieren ist. Im Verlauf der Installationen hat dies in einigen Fällen dazu geführt, dass Löcher in den Nebenraum gebohrt werden mussten. Installationsfehler oder aufgetretene Problematiken in Verbindung mit den KWK-Systemen wurden dokumentiert und zusammengefasst und sind Kapitel 4.4 beschrieben.

### **4.4 Vorbereitung und Durchführung der Inbetriebnahme**

Im Fokus dieses Arbeitspaketes steht die Prüfung und Auswertung der durchgeführten Installationsarbeiten sowie die Plausibilisierung der zusätzlich verbauten Messtechnik. Hierbei wurden alle Installationsarbeiten fotografisch dokumentiert, insbesondere die Erweiterungen der bestehenden Verteilerkästen und die Standorte von Batteriespeichern und Wechselrichtern. Darüber hinaus wurde geprüft, ob der GWI Stromzähler der Batterie richtig konfiguriert ist, der Wechselrichter der Batterie netzwerkfähig ist und wenn ja, ob dieser korrekt mit dem

Netzwerk verbunden ist. Folgende Problemstellungen wurden während der Inbetriebnahme oder des Anlagenbetriebes identifiziert und zum Großteil behoben:

- Bei einem Hersteller ist kurz nach Projektbeginn die NutzerInnen-App ausgefallen, so dass keine Energiebilanzen mehr eingesehen werden konnten. Die Funktionalität wurde bis zum Projektende nicht wiederhergestellt und man konnte nur über den Speicher selbst oder Webzugriff Energieflüsse/ SoC einsehen.
- Eine Batterie mit der Kapazität von 1,98 kWh hat zu Beginn des Betriebs öfter in den Standby Modus geschaltet und wurde nicht mehr be- oder entladen. Dies musste der Nutzende manuell beheben. Ursache war eine anfänglich falsche Verkabelung.
- Häufig haben Wechsel der Internetrouter dazu geführt, dass Batterieausfälle aufgetreten sind, wenn BetreiberInnen nicht daran gedacht haben, diese Wechselrichter neu mit dem Internet zu verbinden. Bei Aufbau der Internetverbindung gab es erhebliche Unterschiede in der Nutzerfreundlichkeit. Bei einigen Objekten musste ein weiterer Technikereinsatz bezahlt werden, um die Wechselrichter erneut mit dem WLAN zu verbinden. Die hierfür anfallenden Kosten wirken sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Batteriespeichersystems aus und sind möglichst zu vermeiden.
- Bei beiden Batteriemodellen der Nutzkapazität 4 kWh traten anfänglich ein fehlerhaftes Be- und Entladeverhalten auf. Beide Batterien haben nur mit voller Leistung be- und entladen. Dies führte teilweise zu zusätzlicher Beladung aus dem Netz, aber auch zur Entladung ins Stromnetz. Besonders problematisch ist, dass dieser Fehler im Webzugriff des Herstellers nicht ersichtlich war und nur über die GWI Messtechnik detektiert werden konnte. Ohne diese wäre die fehlerhafte Beladung nicht aufgefallen und Nutzer und Installateur wären von einem korrekten Betrieb ausgegangen, da die Batterie zum richtigen Zeitpunkt be- und entladen wurde.
- Bei einem Batteriemodel mit 4,8 kWh Nutzkapazität führten verpasste Softwareupdates zum kurzzeitigen Ausfall der Batterie. Die Projekterfahrung zeigt, dass die Betreiber selbst die Anlagen sehr unterschiedlich überwachen. Einigen fallen Fehler direkt auf und einigen fallen Fehler selbst nicht auf.
- Besonders bei den softwareseitigen Updates sind automatische Updatefunktionen sehr nutzerfreundlich und werden von einigen Herstellern genutzt. Ist dies nicht der Fall, ist bei den AnwenderInnen, die Emails oder den Webzugriff nicht regelmäßig einsehen, die Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage hoch.
- Für einen Batteriespeicher mit der Nutzkapazität 5 kWh (Zelltyp Blei) ist zu Beginn des Betriebes häufiger in Störung getreten und hat daraufhin, trotz hohe SoC nicht mehr entladen. Als Grund hierfür konnte ein Fehler in der Kommunikation zwischen Stromzähler- und Wechselrichter identifiziert werden. Dieser wurde durch Tauschen des Switches behoben.
- Bei beiden Modellen der Nutzkapazität 6 kWh (Zelltyp Blei) wurde über die gesamte Betriebsdauer immer wieder hoher Netzbezug der Batterie festgestellt, welche trotz hohem SoC der Batterie auftrat. Der Fehler wurde bei keiner der im Feld installierten Batterien behoben und hat zu Ausbau der Batterien geführt.

Eine Übersicht der oben beschriebenen Problemstellungen während der Installation und des Betriebs der Batteriespeicher ist in Anhang 10 gegeben.

Neben der Installation und Inbetriebnahme der Batterien, wird auf die Installation von Mikro-KWK-Anlagen eingegangen. Vor und bei der Inbetriebnahme von Mikro-KWK-Anlagen sind unterschiedliche Betreiberpflichten zu erfüllen. Dazu gehören der Antrag für den Netzanschluss, die Abstimmung des Messkonzeptes, Planung der Inbetriebnahme, Meldepflicht bei Inbetriebnahme, Abnahme der Abgasführung, Meldung Inbetriebnahme, Registrierung im Marktstammdatenregister, Meldung der Erzeugungszähler beim Eichamt, Regelung der Vergütungszahlung, Nachweis der Verwendung von Fördermittel und Beantragung stromsteuerlicher Versorgererlaubnis. Die Schritte wurden von der ASUE in einem übersichtlichen Leitfaden zusammengefasst [42]. Es sind weiterhin Hinweise zur Planung sowie Hinweise zum Betrieb von KWK-Anlagen in Anhang 11 aufbereitet.

## 4.5 Betrieb und Monitoring aller Anlagen

Zum Betrieb und Monitoring der installierten Anlagen wurde am GWI eine Auswertungsinfrastruktur aufgebaut, mit welcher die Energieströme der Objekte, der KWK-Anlagen und die der Batterie ausgewertet werden. Die Messdaten erreichen das GWI jeweils täglich in Form einer csv-Datei, welche die Daten aller Anlagen des vorherigen Tages enthält. Die Rohdaten werden dann jeweils in einer Datenbank für die Rohdaten sowie in eine Datenbank für bereinigte Daten importiert. Jeder Messpunkt, der in die Auswertung eingeht, wird über ein Prüfintervall auf Plausibilität geprüft. Fehlerhafte Werte werden automatisiert ausgeschlossen. Besonders thermischen Energiemengenzähler sind fehleranfällig. Die Datenauswertung findet in Python und Excel statt. Die verwendete Datenbankstruktur, welche zur Verwaltung und Auswertung der Daten genutzt wird, ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

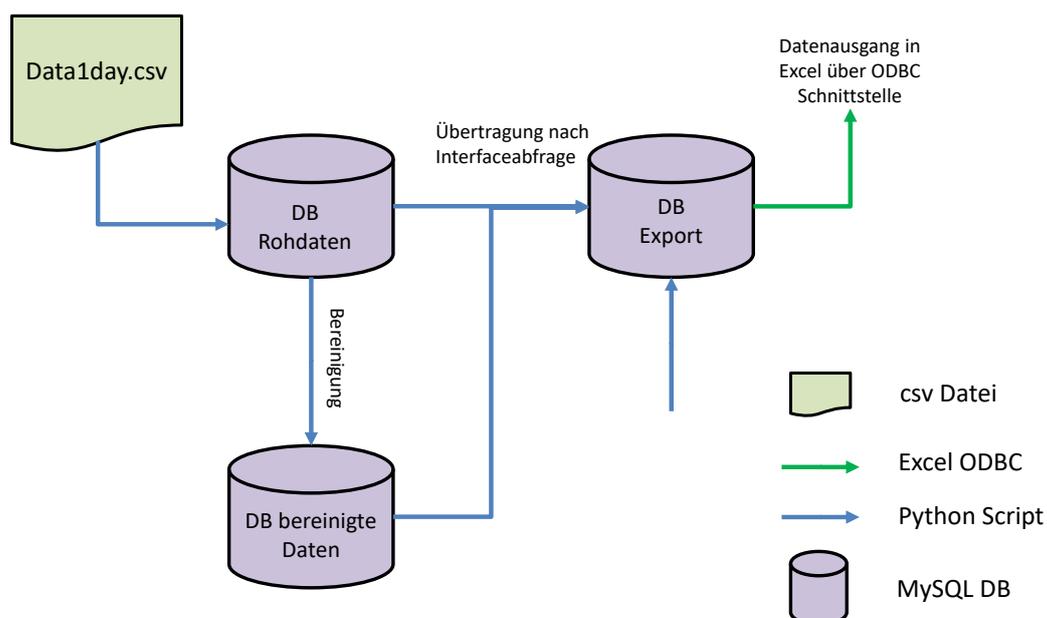


Abbildung 4.2: GWI Datenbank Infrastruktur, welche genutzt wird, um die auflaufenden Messdaten zu plausibilisieren und auszuwerten.

Im Projektverlauf wurden Monatsauswertungen erstellt, um den korrekten Betrieb der KWK-Anlagen und Batterien sicher zu stellen. Drei stirlingmotorische KWK-Anlagen wurden während der Projektlaufzeit ausgebaut und gegen Brennstoffzellen gewechselt. Weiterhin traten bei einigen Anlagen Ausfälle auf, sodass die Batterie nicht betrieben werden konnte. Längere Ausfälle der KWK-Anlage haben zum Ausschluss der Objekte aus der Gesamtauswertung geführt. Ein Beispiel für die Monatsprofile eines Objektes mit einer 1,5 kW Brennstoffzelle sowie einer Batterie der Nutzkapazität 15 kWh ist in Anhang 7 dargestellt. Im dargestellten Monatsprofil für den Zeitraum Oktober 2019 erzeugten die KWK-Anlage 1.491 W im Mittel, welcher zu einem Anteil von 100 % selbst verbraucht wird. Der Objektverbrauch beträgt 1.779 kWh, welcher zu einem Anteil von ca. 60 % aus KWK-Erzeugung und Batterie gedeckt werden kann. Die KWK-Anlage wurde im Betrachtungszeitraum nicht heruntergefahren. Der mittlere Verbrauch es Objektes beträgt 2.392 W, der mittlere Netzbezug 948 W. Im betrachteten Monat wird die Batterie mit 144 kWh beladen und mit 110 kWh entladen. Im betrachteten Monat tritt keine Netzladung auf.

## 4.6 Betrieb und erweitertes Monitoring bei Anlagen mit Stromspeicher

Im Rahmen der Installation der Batteriespeicher wurde ein weiterer Stromzähler verbaut, welcher die Messdaten an die Datenbankinfrastruktur am GWI überträgt. So können die Batterien mit einem separaten Zähler überwacht und die auftretenden Energie- und Leistungsflüsse ausgewertet werden. Diese wurde im Rahmen von Monatsauswertung gemacht. Neben der energetischen Auswertung der Batterie, wurde das Verhalten der Batterien zeitlich ausgewertet. Hierbei wurde jedem 5-Minuten Messpunkt eine der in Tabelle 4.2 beschriebenen Batterieaktivitäten zugewiesen.

Tabelle 4.2: Batterieaktivitäten welche jedem Messpunkt der Batterieprofile zugeordnet werden.

Batterieaktivität	Definition
Bat vollständig entladen (SoC=0)	Batterie gibt trotz Verbrauch keine Leistung ab.
Bat Beladung-Netz	Batterie wird aus dem Netz geladen, um minimalen SoC zu halten. Tritt auf, wenn Batterie beladen wird, obwohl kein KWK-Überschuss vorhanden.
Bat Beladung-KWK	Batterie wird aus KWK-Überschuss beladen.
Bat Beladung KWK + Entladung	Tritt auf, wenn Batterie beladen wird, um im gleichen 5-Minuten Zeitschritt entladen wird.
KWK deckt Verbrauch ohne Überschuss	KWK-Erzeugung > 0 aber keinen Überschuss.
Bat Entladung (Teil- oder Volldeckung)	Batterie wird entladen.

Batterie vollständig beladen	KWK-Erzeugung > 0 und es wird ins Netz eingespeist.
Andere Kategorie	Batterie ohne Aktivität im 5-Minuten Zeitschritt: weil SoC=1 oder SoC=0 oder kein Verbrauch vorliegt.

Die Kategorisierung ermöglicht zu bewerten, inwieweit die Batterie, abhängig vom Erzeugungsverhalten der KWK-Anlage, be- und entladen wird. Hieraus lässt sich ableiten, in welchen Objekten die Technologiekombination vorteilhaft bzw. unvorteilhaft funktioniert. Im Folgenden werden die Batteriezustandsdiagramme von unterschiedlichen Objektpaaren miteinander verglichen. Hierbei ist der für den Abschlussbericht gewählte Bilanzierungszeitraum für CO<sub>2</sub>- und Wirtschaftlichkeitsberechnung 01.10.2019 bis 30.09.2020 dargestellt, da in diesem Zeitraum die größte Anzahl an Anlagen bilanzierbar ist.

Das erste betrachtete Objekt ist mit einer ottomotorischen KWK-Anlage der Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie mit der Nutzkapazität von 1,98 kWh ausgestattet. Der Jahresverbrauch beträgt im Bilanzzeitraum 2.538 kWh und die KWK-Erzeugung ca. 4.700 kWh. Das Zustandsdiagramm der Batterie sowie die monatlich auftretende KWK-Erzeugung, der Netzbezug sowie die Netzeinspeisung des Objektes, sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Aufgrund eines verhältnismäßig geringen Energieverbrauches gegenüber der KWK-Erzeugung in der Heizperiode, ist die Batterie zwischen November und März zu 50 % der Zeit vollgeladen (SoC=1). Über die Hälfte der KWK-Erzeugung wird in dieser Zeit ins Netz eingespeist. Während der Sommermonate Juni, Juli und August ist die Batterie zu hohen zeitlichen Anteilen vollständig entladen.

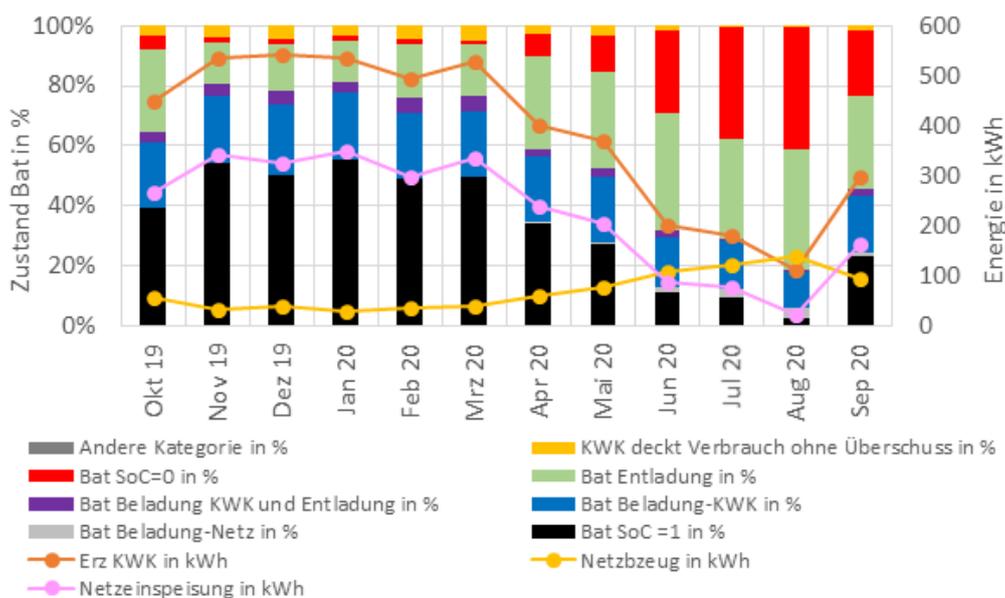


Abbildung 4.3 Zeitliche Verteilung der Batterieaktivitäten je Monat von Oktober 2019 bis September 2020 für ein Objekt in dem eine 1 kW ottomotorische KWK-Anlage sowie eine 1,98 kWh Batterie verbaut sind.

Bedingt durch die rein wärmgeführte Steuerung der KWK-Anlage, wird der SoC der Batterie bei den Betriebszeiten nicht berücksichtigt, was unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht

optimal ist. Der dargestellte Haushalt könnte in der Heizperiode weitere Energie aus der Batterie ins Netz einspeisen, wenn Versorgungsengpässe durch z.B. Wärmepumpen/ Elektrofahrzeuge auftreten. In den Sommermonaten ist die Batterie oft leer und könnte weitere Energie aus dem Netz aufnehmen.

Im Folgenden wird das Objektpaar betrachtet, in welchem auch eine 1 kW ottomotorische KWK-Anlage sowie eine 1,98 kWh Batterie verbaut ist. Die KWK-Erzeugung beträgt ca. 4.640 kWh, wovon 1.770 kWh ins Netz eingespeist werden. Der Jahresverbrauch des Objektes beträgt 4.100 kWh. Das Zustandsdiagramm des Vergleichsobjektes ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Es stellt sich ein ähnlicher Zustand ein. Die Batterie ist in den Wintermonaten zu ca. 40 % voll beladen (SoC = 1), was ca. 10 % weniger ist als beim ersten Objekt. In der Sommerperiode liegt der Wert, bei dem die Batterie voll entladen ist (SoC = 0), bei ca. 70 %, was deutlich unter dem Wert des Vergleichsobjektes liegt. Dies ist auf die geringere KWK-Erzeugung in den Sommermonaten zurückzuführen. Weiterhin tritt in den Monaten Juni bis September eine Batteriebeladung aus dem Netz auf. In der Heizperiode tritt eine hohe Netzeinspeisung auf. Dies ist damit zu begründen, dass die Batterie zu einem hohen zeitlichen Anteil voll beladen ist.

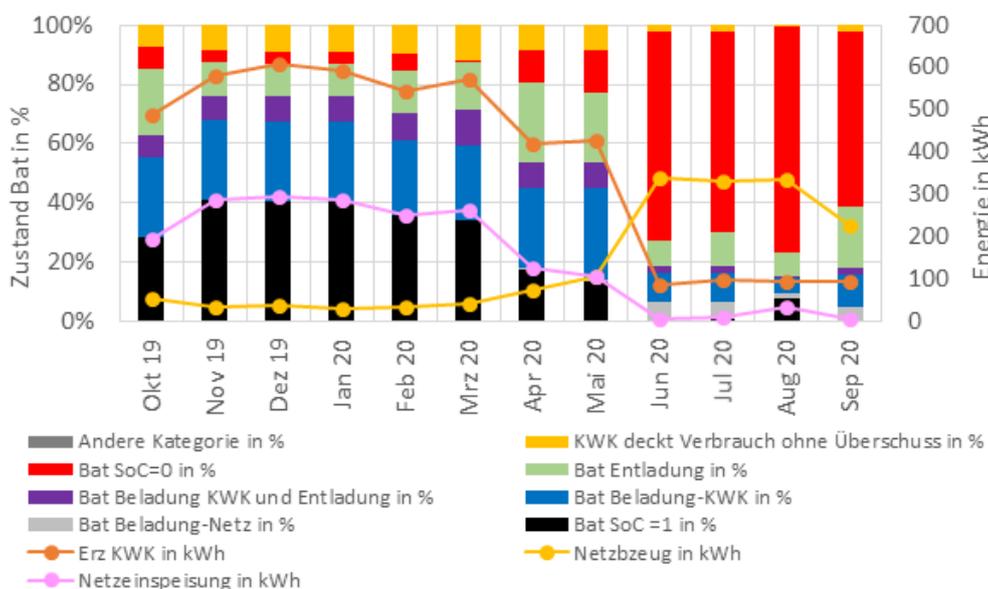


Abbildung 4.4 Zeitliche Verteilung der Batterieaktivitäten nach Monat von Oktober 2019 bis September 2020 für das Vergleichsobjekt Objekt, in welchem eine 1 kW ottomotorische KWK-Anlage sowie eine 1,98 kWh Batterie verbaut sind.

Im Folgenden wird das Batteriezustandsdiagramm eines Objektes betrachtet, welches mit einer 1 kW stirlingmotorischen KWK-Anlage sowie einer 5,9 kWh Batterie ausgestattet ist, dargestellt in Abbildung 4.5. Der elektrischen Jahresverbrauch beträgt 4.665 kWh und die KWK-Erzeugung im Bilanzzeitraum ca. 3.550 kWh. Im Vergleich zu den zuvor betrachteten ottomotorischen KWK-Anlagen, ist das Verhältnis von KWK-Erzeugung zu Stromverbrauch deutlich geringer. Dies resultiert in einem deutlich geringeren Anteil an Zeitpunkten, in dem die Batterie vollständig beladen ist (SoC = 1). In der Heizperiode stellt sich ein Zustand ein, in dem die

Batterie zu unter 20 % der zeitlichen Anteile voll beladen ist sowie ca. unter 10 % der Zeit voll entladen ist (SoC = 0). In 40 % der Zeit findet eine Beladung der KWK-Anlage statt. In einem deutlich geringeren zeitlichen Anteil von ca. 15 % des jeweiligen Monats in der Heizperiode, wird die Batterie entladen. Der sich hier einpendelnde Zustand kann als günstig beschrieben werden, da die Batterie zu einem hohen zeitlichen Anteil be- und entladen wird. Weiterhin kann die Batterie große Teile der KWK-Überschüsse zwischenspeichern. Die Einspeisung ist auch in den Wintermonaten gering.

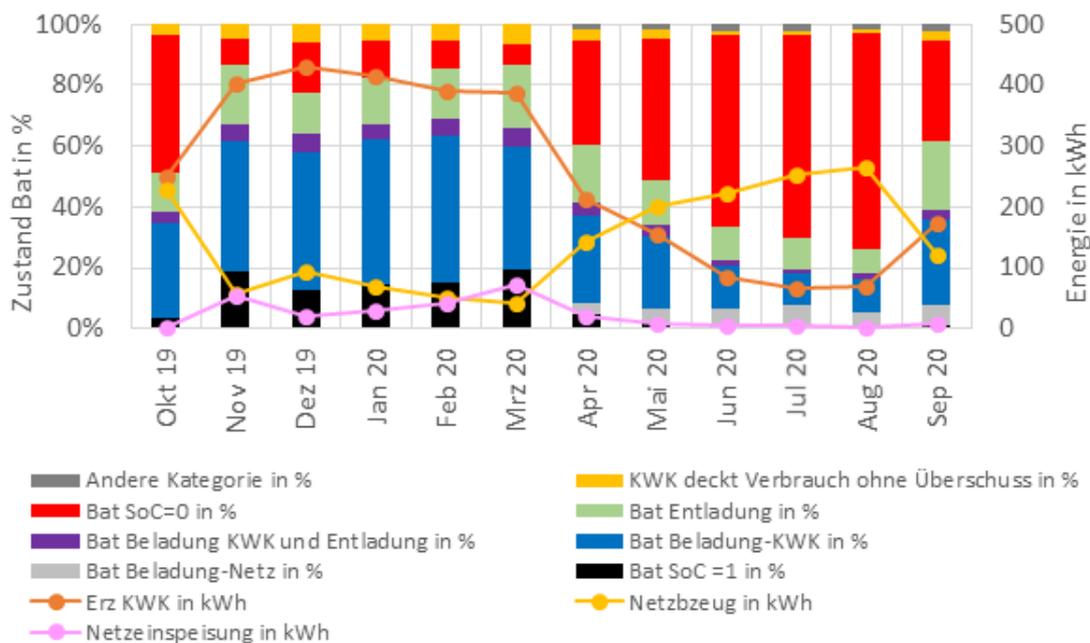


Abbildung 4.5 Zeitliche Verteilung der Batterieaktivitäten pro Monat von Oktober 2019 bis September 2020 für das Vergleichsobjekt Objekt in dem eine 1 kW stirlingmotorische KWK-Anlage sowie eine 5,9 kWh Batterie verbaut sind.

## 4.7 Nutzerbetreuung und Service

Über den gesamten Projektzeitraum wurden die NutzerInnenbetreuung/der Service seitens GWI und ICM weitergeführt und dokumentiert. Zuzüglich zu der unter AP 4.1 genannten Informationsveranstaltung für die Auswahl der Referenzobjekte und der Bereitstellung entsprechender Vorabinformationen, wurden im Herbst 2017 zahlreiche Anliegen potenziell interessierter AnlagenbetreiberInnen bearbeitet. Anfragen wurden, soweit möglich, vom Team der ICM beantwortet oder, soweit erforderlich, mit MitarbeiterInnen des GWI besprochen und abgestimmt. Das GWI bearbeitete im Rahmen der NutzerInnenbetreuung technische Fragestellungen in Bezug auf die KWK-Systeme.

Im ersten Halbjahr 2019 befasste sich die ICM u.a. mit den Betreiberpflichten im Kontext des Marktstammdatenregisters. Das Marktstammdatenregister (MaStR) ist Anfang 2019 online gegangen. Bei der Meldung der KWK-Anlagen als auch der Batterien hat das GWI unterstützt.

Die ICM wertete die Information aus und fasste die wesentlichen Aspekte in einem Schreiben zusammen. Dieses Schreiben wurde mit den Projektpartnern abgestimmt und dann von ICM

am 26. März 2019 an die TeilnehmerInnen versandt. Daraus resultierende telefonische Rückfragen konnten von Seiten der ICM geklärt werden. Das Schreiben dient dem Zweck, die TeilnehmerInnen über ihre Registrierungspflichten zu informieren und Hinweise auf weitere Informationsquellen zu geben (s. Anhang 4).

Zum Ende des Projektes traten vermehrt Fragen zur Kombinationsmöglichkeit von KWK plus Speicher mit Photovoltaik-Anlagen auf. Die ICM bereitete daraufhin in Abstimmung mit dem GWI ein entsprechendes Schreiben vor, welches die Projektposition gegenüber dieser Kombinationsmöglichkeit klärte und weitere Unterstützung anbot. Das vorbereitete Schreiben zur Kombinationsmöglichkeit KWK + Batteriespeicher + PV wurde im Februar 2020 an die Projektteilnehmenden versandt (s. Anhang 5).

Abschließend wurden die Herausforderungen der ProjektteilnehmerInnen gesichtet und zusammengetragen. Mit der Zusammenstellung wird ein Statement aus Sicht der Privathaushalte formuliert, welches die benötigten regulatorischen Weichenstellungen darstellt.

Zu diesem Zweck wurde die Kommunikation mit den AnlagenbetreiberInnen aus der gesamten Projektlaufzeit gesichtet und ausgewertet. Die Nachrichten sind authentisch und belegbar. Inhaltlich folgt die Zusammenstellung nach den Themenbereichen: Inbetriebnahme, Betrieb, Wartung, Finanzen, Wirtschaftlichkeit, Bürokratie, Netzdienlichkeit. Damit ergibt sich eine Sammlung von etwaigen Hemmnissen und daraus resultierende Handlungsempfehlungen.

#### 4.7.1 Inbetriebnahme / Betrieb / Wartung

Aspekt	Die Zuständigkeiten bei Inbetriebnahme der KWK-Anlagen sind aufgrund mehrerer beteiligten Gewerke nicht immer ersichtlich. Es fehlt die Rolle eines Koordinators. Die Dokumentation des Herstellers liefert nicht alle relevanten Informationen, z.B. die Zählernummer des internen Zählers (wenn vorhanden).
Auszug Schreiben Projektteilnehmende	[...] Die Anlage wurde am 27. Mai 2014 durch einen Servicetechniker ... in Betrieb genommen. Aufgrund von Störungen des ... Motors musste bisher viermal ein ... Techniker gerufen werden, um die unterschiedlichen Fehler zu beseitigen! Des Weiteren wurde die 5000 Betriebsstunden Wartung vom Service durchgeführt, dabei wurde auch die Firmware der Anlage aktualisiert! Die Weiterleitung der Störmeldungen gestalten sich jedes Mal schwierig, da offensichtlich keiner der Beteiligten die nötigen Informationen hatte. [...]
These ICM	Die Inbetriebnahme und der Betrieb der Mikro-KWK Anlagen muss mindestens den Erwartungen entsprechen, die mit einer Gas-Brennwerttherme üblicherweise erfüllt werden. Das bedeutet, die Technologie muss ausgereift sein, die Inbetriebnahme und Meldungen standardisiert stattfinden oder der gesamte Prozess muss wesentlich vereinfacht werden.
Aspekt	Installationsanforderungen und Anforderungen der Hersteller stimmen nicht überein.
Auszug Schreiben	[...] es gibt eine Heizungsverordnung, die eine Wasserbefüllung gemäß VDI 2035 empfiehlt! Dies ist kein Zwang. Der Betrieb ist auch unter Abweichungen möglich. Nun

Hersteller (A_2016_02_28)	möchten Sie einen Vollwartungsvertrag mit unserem Unternehmen abschließen. Hier bestehen wir [...] auf die Einhaltung der VDI 2035. [...]
These ICM	Die Vollwartungsverträge der Hersteller fordern Systembedingungen, die bei der Installation nicht erforderlich sind. Die VDI Installationsanforderungen an die Anlagen sollten mit den Anforderungen aus Wartungsverträgen übereinstimmen. Die Betriebskosten (Wartung- und Reparaturen) für die Mikro-KWK Anlagen dürfen die üblichen Betriebskosten einer Gas-Brennwerttherme nicht wesentlich übersteigen. Das Handwerk muss in der Lage sein, die Mikro-KWK Anlagen nicht nur zu installieren, sondern auch zu warten (Häufig keine Herstellerzulassung vorhanden, so dass der private Kunde keine zertifizierten Fachbetriebe findet).
Aspekt	Die Bedienung der Anlagen ist nicht immer zeitgemäß.
Auszug Schreiben Projekt-teilnehmende (A_2017_05_04; A_2015_10_23_2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wenig komfortable Bedienung – bei einigen Herstellern fehlt schlichtweg eine Fernbedienung bzw. eine Einbindung in das Heimnetzwerk</li> <li>- Es gibt keine „einfache“ nutzbare Information über den Zustand der Anlage, um möglichst den selbsterzeugten Strom nutzen zu können (läuft der Motor, liegt eine Störung an)</li> <li>- Es fehlt schlichtweg eine Störmeldeleuchte oder ein akustisches Störsignal. Den Ausfall der Anlage bemerkt man erst, wenn das Wasser o. die Heizung kalt wird! [...]</li> </ul>
These ICM	Die Mikro-KWK Anlage muss ihre Betriebsweise über Internet / App visualisieren und steuerbar machen. Die Betriebsweise einer Mikro-KWK Anlage muss den synchronisierten Bedarf von Wärme und Strom abdecken (Lastabhängige Betriebszeiten ohne Komfortverlust bei der Wärme).

Weiter kam es zu Beschwerden dahingehend, dass die Anlagen nicht richtig liefen und die Motoren getauscht werden mussten. Es fanden sich keine Handwerker für die Wartung. Die Wartungskosten betragen das doppelte bis dreifache der Wartungskosten einer Gasbrennwerttherme. Die Gebühren für Zähler und Abrechnung wurden als „unangemessen“ und „zu hoch“ empfunden.

Die Zuverlässigkeit der motorischen KWK-Anlagen, welche im Projekt überwacht wurden, ist als ein zentrales Problem zu sehen, welches auch von den BetreiberInnen so empfunden wurde. Dies spiegelt auch die Marktsituation wider. Der Ausfall einer KWK-Anlage, wenn eine Batterie installiert wurde, ist energetisch/wirtschaftlich besonders ungünstig, da diese direkt von der KWK-Erzeugung abhängt.

#### 4.7.2 Finanzen / Wirtschaftlichkeit

Aspekt	Die Verpflichtungen als KWK-AnlagenbetreiberIn gegenüber Hauptzollamt und Finanzamt sind unangemessen. Die Formulare des Hauptzollamtes orientieren sich an Großanlagen, z.B. Angabe in MW bzw. MWh.
Auszug Schreiben Projekt-teilnehmende	[...] Das ist wirklich eine Hilfe. Weder das FA noch der Steuerberater sind irgendwie in der Lage eine Entscheidung zu treffen. Es kennt sich mit den KWK Anlagen kein Steuermensch wirklich aus, 10 Fachleute – 10 verschiedene Aussagen [...]

(B_2016_02_12)	
Auszug Schreiben Projekt-teilnehmende (B_2015_10_05)	Speziell die Erstellung einer Gewinn- und Verlustrechnung für die Einkommensteuererklärung
Auszug Schreiben Projekt-teilnehmende (B_2016_02_23)	[...] Sollte ich mal ein großes Kraftwerk bauen und in Betrieb nehmen wollen, bin ich in Steuererstattungsanträgen dann schon mal geübt. Für Otto-Normalverbraucher ist das eine schier unüberwindbare Hürde. [...]
These ICM	Der Betrieb einer Mikro-KWK Anlage darf nicht als unternehmerische Tätigkeit eingestuft sein. Der Betreiber einer Mikro-KWK Anlage muss dementsprechend von allen unternehmerischen Pflichten befreit sein (Einnahmeüberschussrechnung, Umsatzsteuer, Angaben in der Einkommensteuererklärung, usw.)

Aspekt	Es wird nichts unversucht gelassen, die KWK-AnlagenbetreiberInnen mit Verpflichtungen zu belegen.
Auszug Schreiben Projekt-teilnehmende (B_2016_02_14)	am Samstag den 13.02.16 wurden wir von einem Schreiben (s. Anlage) der IHK überrascht, in der wir gem. der Information der Finanzverwaltung in Bottrop angeblich gewerblich tätig sind. Da es sich nur um den Betrieb der Mikro-KWK-Anlage handeln kann, stellt sich mir die Frage ob man grundsätzlich damit ein Gewerbe betreibt und man somit bei der IHK beitragspflichtig ist.
Auszug Schreiben IHK	[..] durch die Finanzverwaltung erhielten wir die Information, dass Sie in Bottrop gewerblich tätig sind. Gemäß § 2 Abs. 1 des Industrie- und Handelskammergesetzes (IHKG) ist jeder Gewerbetreibende Pflichtmitglied der regional zuständigen Industrie- und Handelskammer. Einzige Ausnahme sind die reinen Handwerksbetriebe, da diese der Handwerkskammer angehören. Zur Feststellung der IHK-Zugehörigkeit benötigen wir jedoch noch nähere Angaben, welche Sie uns bitte auf beiliegendem Antwortschreiben vermerken. Gemäß § 9 Abs. 1 des Industrie- und Handelskammergesetzes sind wir berechtigt, die erforderlichen Daten bei Ihnen zu erheben. Sollte es sich bei Ihren Einkünften um freiberufliche Einkünfte nach § 18 Einkommenssteuergesetz handeln, bitten wir um entsprechende Mitteilung und Übersendung eines Nachweises.  Für eine baldige Erledigung und Rücksendung herzlichen Dank im Voraus [...]
These ICM	Die Finanzverwaltung sollte Betreiber von Mikro-KWK Anlagen nicht an die IHK melden.

Aspekt	Die Inanspruchnahme der KWK-AnlagenbetreiberInnen durch steuerrechtliche Anforderungen ist unangemessen hoch. Der Aufwand belastet beide Seiten unnötig im Verhältnis zu den resultierenden Steuerzahlungen / Steuererstattungen). Zusätzlich müssen die Gasmengen differenziert werden (KWK-
--------	---

	Anlage oder Gasbrennwerttherme) da nur für die KWK-Anlage eine Erstattung der Energiesteuer gegeben ist.
Auszug Schreiben Hauptzollamt (C_2016_01_27)	[...] Um Ihren Antrag bearbeiten zu können, benötige ich noch weitere Unterlagen/Angaben von Ihnen: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Das Inbetriebnahmeprotokoll</li> <li>2. Die Rechnung für das gesamte, im Kalenderjahr 2014 bezogene Erdgas</li> <li>3. Unterlagen zu Punkt 6, 7, 8, 9 und 10 des Zusatzblattes</li> <li>4. Nachweis der Hocheffizienz (z. B. Gutachten, Eingangsbestätigung des BAFA)</li> <li>5. Bestandsermittlung [...]</li> </ol>
These ICM	Der Bezug an Gas für die Gesamtanlage (Mikro-KWK Anlage und Spitzenlasttherme) sollte von der Energiesteuer vollständig befreit sein (§ 53a EnergieStG). Dann ist keine Antragstellung auf Energiesteuerrückerstattung beim Hauptzollamt mehr erforderlich. Die Trennung zwischen Gas, welches in der Mikro-KWK Anlage, und dem Gas, welches in der Spitzenlasttherme verbrannt wird, entfällt dadurch. Komplizierte Berechnungen oder zusätzliche Zähler werden vermieden. Damit würde auch das Erfordernis zur Synchronisierung der Rechnungslegung des Gaslieferanten mit dem steuerlichen Erklärungszeitraum (Kalenderjahr) entfallen. Die zusätzliche Rechnungsstellung ist mit Kosten verbunden.

Aspekt	Ein wirtschaftlicher Betrieb der KWK-Anlagen ist nicht möglich. Damit ist die unternehmerische Absicht in Frage gestellt.	
Auszug Schreiben Projektteilnehmende (D_2016_08_09)	<b>Ausgaben (Beispiel)</b> Das sind Mehrkosten von ca. 775€ bzw. 650€ Dazu kommen in der Folge Wartungskosten von ca. 700€ (Anmerkung: pro Jahr)	<b>Einnahmen (Beispiel)</b> Demgegenüber stehen Einnahmen von eingesparten Stromkosten 500 € eingespeister Strom 492 € erstattete Energiesteuer 106 € Summe Einnahmen 1098 €.
These ICM	Die Mehrkosten (Anschaffung) einer Mikro-KWK Anlage gegenüber einer Gas-Brennwerttherme müssen durch die Einspeisevergütung und durch die teilweise Substitution des Netzbezugs innerhalb von ca. 10-15 Jahren (Betriebsdauer) mindestens abgegolten sein.	

### Einspeisevergütung

Aspekt	Die Höhe und Zusammensetzung der Vergütung des eingespeisten Stroms ist für die niedrigen produzierten Mengen zu kompliziert. Die Gutschriftanzeigen und die Berechnung der Einspeisevergütung sind trotz Erklärung unverständlich.
Auszug Bericht	[...] Hinzu kommt, dass die Ablesung in der Regel vierteljährlich ansteht, da die Vergütung des produzierten und eingespeisten Stroms anhand des EEX-Börsenpreises erfolgt, der jeweils für drei Monate festgesetzt wird. Die beschriebene quartalsweise Meldung

100 KWK [43]	der Stromproduktion und –einspeisung wirft bei den Anlagenbetreibern weitere Fragen und Unverständnis auf. Dies resultiert in erster Linie daraus, dass diese vierteljährlichen Erträge in einer jährlichen Abrechnung zusätzlich mit monatlichen Abschlägen verrechnet werden, die durch den Netzbetreiber im Voraus ausgezahlt wurden. Diese Logik folgt erneut dem Betrieb von großen KWK-Kraftwerken, in denen monatlich erhebliche Beträge erwirtschaftet werden und dabei eine jährliche Abrechnung einem Vorschuss an den Netzbetreiber entspräche. Bei den Kleinanlagen sind die monatlichen Abschläge vergleichsweise gering und sind zum Zeitpunkt der Auszahlung eher ohne wirtschaftliche Bedeutung. Im Gegenteil führen diese monatlichen Abschläge bei den Anlagenbetreibern zu einem gesteigerten Klärungsbedarf, welcher sich in einem zeitlichen Mehraufwand bezüglich Beratung und Abrechnung niederschlägt [...]
These ICM	Eine Vereinfachung der Vergütung des eingespeisten Stroms ist erforderlich. Im Idealfall könnte es eine einfache Verrechnung geben (Bezug zu Einspeisung) – die eingespeisten kWh werden einfach mit den Strombezug verrechnet! Gegebenenfalls faktorisiert z.B. 2 eingespeiste kWh : 1 bezogene kWh.

### Messstellenbetrieb – Nettostromerzeugung

*„Kein Bestandsschutz: Bisher konnten die Betreiber kleiner BHKW entsprechend § 8 Abs. 1 Satz 4 KWKG 2012 den erzeugten und in das Netz eingespeisten Strom selbst messen, ohne dabei Messstellenbetreiber im Sinne der §§ 21b bis 21h EnWG sein zu müssen. Konkret besagte diese Regelung: „Betreiber von KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis einschließlich 100 Kilowatt sind abweichend [...] selbst zur Anbringung der Messeinrichtungen berechtigt.“ ... Der Erzeugungszähler hingegen, der die für den KWK-Zuschlag maßgebliche Nettostromerzeugung des BHKW erfasst, steht jedoch regelmäßig im Eigentum von BHKW-Betreibern. Da dieser Zähler obligatorisch ist, wird diese Messeinrichtung zumeist bereits bei der Herstellung von Blockheizkraftwerken als sogenannter geeichter „Hutschienenzähler“ im Steuerschrank des BHKW installiert und anschließend vom BHKW-Betreiber genutzt. Diese seit Einführung des KWKG vor über 10 Jahren bestehende Praxis wurde jedoch im KWKG 2016<sup>3</sup> nicht berücksichtigt!“*

...

#### *Die Übergangsvorschrift*

*§ 35 Abs. 9 i. V. m. § 14 Abs. 1 KWKG 2016 hebt die beschriebene Regelung mit Wirkung zum 1. Juli 2016 auf. Ab diesem Zeitpunkt muss der Messstellenbetrieb unter Beachtung aller Anforderungen der §§ 21b bis 21h EnWG sowie weiterer Vorschriften vorgenommen werden. Grundzuständig für die Messung ist damit der örtliche Verteilnetzbetreiber. BHKW-Betreiber können aber auch einen unabhängigen Messstellenbetreiber beauftragen oder die Messung in der Rolle eines ordentlichen Messstellenbetreibers selbst vornehmen.“ [44]*

<sup>3</sup> KWKG2020 wurde zum Erstellzeitpunkt des Berichtsteils noch nicht berücksichtigt.

Aspekt	Es wird versucht, die Erzeugung von vergleichsweise geringen Strommengen in den KWK-Anlagen mit Anforderungen an den Messstellenbetrieb zu verbinden, die in Relation völlig unverhältnismäßig sind.
Anforderungsschreiben (E_2019_06_05)	<p>[...] Nach den von Ihnen eingereichten Unterlagen endete die Eichfrist Ihres oben genannten Stromzählers 2017. Es ist daher notwendig, den Zähler gegen einen den Vorgaben des Messstellenbetriebsgesetzes entsprechenden, geeichten Zähler zu wechseln.</p> <p>Sofern Sie zukünftig selbst Betreiber der Messstelle sein möchten, weisen wir drauf hin, dass Sie in diesem Fall gemäß § 10a Satz 3 EEG selbst für die Einhaltung der Vorgaben des MsbG Sorge tragen müssen. Die hiervon betroffenen Pflichten umfassen u.a. die Registrierung als Messstellenbetreiber beim BDEW, den Abschluss eines Messstellenrahmenvertrages mit grundzuständigen Messstellenbetreiber und die vollständige, fristgerechte und verschlüsselte Kommunikation in den dafür vorgesehenen und vorgeschriebenen elektronischen Datenformaten. [...]</p>
Auszug Schreiben Projektteilnehmende (F_2019_08_13)	<p>[...] Diese Clearingstelle hat eine Empfehlung herausgegeben, wonach Bestandskunden die vor der Neufassung des MsbG in 2016 Messstellen einer Anlage nach dem EEG/KWK Gesetz betrieben haben auch weiterhin den Messstellenbetrieb in gleicher Art und Weise fortführen können wie bisher. Also auch ohne eine Registrierung als Messstellenbetreiber beim BDEW.</p> <p>Dazu wurden auch im Internetportal dieser Clearingstelle umfangreiche Stellungnahmen diverser Organisationen veröffentlicht.</p> <p>Beispielhaft weise ich auf die Stellungnahme des Bundesverbandes Kraft-Wärme-Kopplung e.V. hin. Darin wird klar und deutlich die Weiterführung des Messstellenbetriebes durch den Betreiber der Einspeiseanlage als sinnvoll und gesetzeskonform herausgestellt. [...]</p>
These ICM	<p>Es sollte nur eingespeister Strom vergütet/verrechnet werden (nicht der eigenerzeugte eigenverbrauchte). Dann besteht keine Notwendigkeit einer geeichten Ermittlung der Nettostromerzeugung (2-Richtungszähler des Netzbetreibers reicht aus).</p> <p>Oder die Ermittlung der Nettostromerzeugung erfolgt durch den KWK Betreiber mit einem geeichten Zähler, ohne dass an ihn die Anforderungen wie an einen Messstellenbetreiber gestellt werden.</p> <p>These 1 wird favorisiert, da so keine weiteren Kosten für die AnlagenbetreiberInnen entstehen und der Gesamtaufwand reduziert wird.</p>

### 4.7.3 Bürokratie: Marktstammdatenregister

Die erforderliche Registrierung der KWK-Anlagen und der E-Speicher im Marktstammdatenregister bereitete keine besonderen Schwierigkeiten. Die Internetseiten sind gut strukturiert und es gibt zahlreiche Hilfestellungen.

### 4.7.4 E-Speicher

Grundsätzlich gestaltet sich der Betrieb eines Batteriespeichers weniger komplex als der einer KWK-Anlage, da weniger Gewerke beteiligt sind. Trotzdem treten Hürden auf, auf die im Folgenden eingegangen wird. Auftretende Herausforderungen, die bei der Inbetriebnahme des Batteriespeichers aufgetreten sind, sind in Abschnitt 4.4 beschrieben. Hierbei ist besonders auf das vorschriftsgemäße Abschalten der KWK-Anlage zu achten. Das ist besonders bei

Brennstoffzellen relevant, führte aber im Projektverlauf auch bei einer motorischen KWK-Anlage zu einem Schadensfall. Im Regelfall kommt ein Elektroinstallateur, der mit KWK-Anlagen nicht zwangsläufig vertraut ist. In diesem Fall müssen die Objektbesitzer selbst auf diesen Umstand hinweisen.

Im Projektverlauf hat sich herausgestellt, dass sich besonders softwareseitige Probleme im Betrieb mit Batterien eingestellt haben. Hierzu zählen verpasste Updates, die zur Störung der Batterie führten. Vom Wechselrichter automatisch durchgeführte Updates würden dieses Problem beheben. Weiterhin führte wiederholt der Tausch von WLAN Routern dazu, dass Teilnehmer die Internetanbindung ihres Wechselrichters selbst trennten, das nicht bemerkten und dies zu einer Störung führte. Die so verursachten Störungen wurden teilweise von den Betreibern, die ihren Batteriespeicher nicht täglich kontrollieren, nicht bemerkt. Um dieses Problem anzugehen müssten anderen Kontaktwege, also der Webzugriff, gewählt werden. Vielen Betreibern würde ein automatisierter Anruf oder eine SMS mit der Information entgegenkommen. Aktuell ist der Betrieb der Anlagen für nicht internetaffine Menschen schwer. Die Handlungsbereitschaft der Betreiber ist bei auftretenden Störungen sehr hoch, jedoch kann ohne die nötige Information nicht gehandelt werden.

Ein Abruf des Batterieladezustands (SoC) über Smartphone/Ampelsystem, welches angibt, ob die Batterie Energie für einen zusätzlichen Verbrauch bereitstellen kann, wäre hilfreich. Viele Projektteilnehmer achten sehr auf den Füllstand Ihrer Batterie, um ihren Eigenverbrauch zu erhöhen, wenn das einfach möglich ist. Ist hierfür jedoch ein Gang in den Keller oder das Hochfahren des PCs nötig, ist es oft eine Hürde. Die durch den Nutzenden beeinflussbare Erhöhung des Eigenverbrauchs durch die Batterie würde sich unmittelbar positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Batterie auswirken. Die hierfür nötigen Informationen sind den NutzerInnen möglichst einfach bereitzustellen. Dies schafft weiterhin eine höhere Identifizierung mit der Anlage und schafft Bewusstsein für die Funktion der Batterie.

Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass viele am Markt verfügbaren Wechselrichter für PV-Anlagen überdimensioniert dimensioniert sind. Dies führt zu einer nicht optimalen betriebsweise. Grundsätzlich positiv zu bewerten ist, dass einige Wechselrichter dafür ausgelegt sind mehrere Erzeugungseinheit (z.B. KWK-Anlage + PV) zu managen. Aktuell gibt es allerdings keinen Hersteller, der ein Batteriesystem inklusive Wechselrichter für eine KWK-Anlage ausgelegt hat. Der hierfür nötige Wechselrichter müsste auf eine Nennleistung von ca. 500 W ausgelegt werden.

## 5. NutzerInnen-Analyse

*Bereits im Rahmen des Vorgängerprojektes „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ wurde eine NutzerInnenbefragung durchgeführt. Diese wird in diesem Projekt „KWK plus Speicher“ weitergeführt. Die Fragen geben Aufschluss über innerpsychische Merkmale der teilnehmenden Haushalte, wie z.B. den Einstellungen und Intentionen zum Energiesparen, der Motivation zur Beteiligung an dem Projekt sowie heizrelevante Verhaltensweisen. Die Befragung ist als prä-/post-Befragung angelegt und wurde jeweils vor und nach der Heizperiode durchgeführt.*

*So ist es möglich, die im Projekt auftretenden Änderungen des NutzerInnenverhaltens in einer Langzeiterfassung zu erfassen und resultierende Einstellungseffekte durch die Anwendung von Mikro-KWK-Anlagen (plus Speicher) aufzuzeigen. Des Weiteren können Hemmnisse und Treiber für die Installation sowie Vor- und Nachteile des Betriebs der Anlage aus NutzerInnenperspektive identifiziert werden, die für die nutzerorientierte Weiterentwicklung und Förderung der Verbreitung der Anlagen im Anwendungsfeld Privathaushalt von Bedeutung ist.*

*Zusammenfassend ist zu beobachten, dass sich die Teilnehmenden im Laufe der Zeit weniger mit der Bedienung der KWK-Anlagen beschäftigen mussten. Ebenso wurde ein Rückgang beim Vornehmen von Einstellungsänderungen beobachtet. Gerätewartungen wurden vom Hersteller nach Betriebszeit bemessen und sind daher unterschiedlich bei den Teilnehmenden gewesen. Dennoch gab es Teilnehmende, die ihre Anlagen gar nicht warten ließen (z.B. aufgrund mangelnder Fachfirmen in der Nähe). Insgesamt sind die Teilnehmenden mit den technischen Merkmalen über den gesamten Befragungszeitraum der KWK-Anlage zufrieden. Die KWK-Anlagen haben im Bereich Intention und Wissen unterschiedliche Auswirkungen, wohingegen die Einstellung der Teilnehmenden und Norm sich nicht verändern.*

*Bei administrativen Prozessen spiegeln sich hingegen die prozessbedingten Schwierigkeiten in der Zufriedenheit der Teilnehmenden wider. Diese bezieht sich v.a. auf die zu beantworteten Steuerfragen und Beantragung der Energiesteuerrückerstattung und der KWK-Förderung. Teilnehmende mit wenigen bürokratischen Erfahrungen stellten die vielen administrativen Prozesse vor Herausforderungen, die negativ ins Gewicht zur Bewertung von KWK-Anlagen fielen. Die aktuellen Daten des Batteriespeichers wurden den Teilnehmenden über eine App oder den Zugang zu einem Onlineportal angezeigt. Diese Art des Monitoring zum Überblick des eigenen Nutzungsverhaltens traf auf positives Feedback.*

*Aus persönlichen Interviews der Teilnehmenden ging hervor, dass nur bedingt eine Empfehlung für KWK-Anlagen ausgesprochen werden würde, durch die Batterie jedoch die Zufriedenheit mit der Stromeigennutzung deutlich anstieg.*

## 5.1 Standardisierte Langzeiterfassung des NutzerInnenverhaltens

Mit dem hier durchgeführten Projekt wurde es erstmals möglich, eine Langzeiterfassung des NutzerInnenverhaltens durchzuführen und somit langfristige Verhaltensänderungen und Einstellungseffekte durch die Anwendung von Mikro-KWK-Anlagen identifizieren zu können. Ebenso konnten Hemmnisse und Treiber für die Installation sowie Vor- und Nachteile des Betriebs der Anlagen aus der Perspektive der NutzerInnen erhoben werden, die für die nutzerorientierte Weiterentwicklung und Förderung der Diffusion von Mikro-KWK-Anlagen im Anwendungsfeld Privathaushalt von Bedeutung ist.

Die zweite Erhebung der Post-Messung bei den 66 Haushalten des Projektes „100 Mikro-KWK-Anlagen“ wurde im März/April 2015 durchgeführt. Darauf aufbauend wurde angestrebt, die 66 Haushalte für die Langzeitmessung zu gewinnen und im Abstand von jeweils einem Jahr erneut zu befragen. Der Fokus der standardisierten Erfassung lag auf strom- und heizbezogenen psychologischen Variablen.

Im Mai 2018 wurde diese Langzeitbefragung im Rahmen des Projekts „KWK plus Speicher“ weitergeführt. In Koordination zwischen FH Dortmund und ICM wurden die Fragebögen in Rohfassung an ICM übermittelt. Dort wurden den jeweiligen Fragebögen Nutzer-IDs zugeordnet und die Adressen in das, von der FH Dortmund erstellte, persönliche Anschreiben eingefügt. Außerdem wurde den Fragebögen jeweils eine Einverständniserklärung beigelegt.

Anfang Juni wurde eine E-Mail zur Erinnerung an die MitmacherInnen durch die ICM gesendet. Bis Ende Juli 2018 kamen insgesamt 51 Fragebögen zurück an die ICM. Um den Datenschutz der MitmacherInnen zu gewähren, wurden die Einverständniserklärungen bei der ICM gesammelt und die Fragebögen gesondert der FH Dortmund übermittelt.

Im Juni 2019 wurden die ProjektteilnehmerInnen postalisch angeschrieben und um die erneute Teilnahme an der Langzeitbefragung gebeten. Dem Anschreiben beigelegt waren: der Fragebogen der FH Dortmund, ein DIN A5 Umschlag für den Fragebogen, eine Einverständniserklärung, ein an ICM frankierter Rückumschlag. Die Inhalte des Anschreibens und das Vorgehen insgesamt waren mit den Projektpartnern im Vorfeld abgestimmt.

Die Teilnehmer waren gebeten in einer Frist von drei Wochen den Fragebogen auszufüllen. Zum Ablauf der Frist am 21.06.2019 lagen 23 Fragebögen vor, die im ungeöffneten Umschlag von der ICM an die FH Dortmund weitergeleitet wurden.

Um die Rücklaufquote zu erhöhen, wurden die TeilnehmerInnen nach Ablauf der Frist von der ICM angerufen und gebeten, sich noch an der Langzeitbefragung zu beteiligen. Dadurch konnte die Rücklaufquote deutlich erhöht werden.

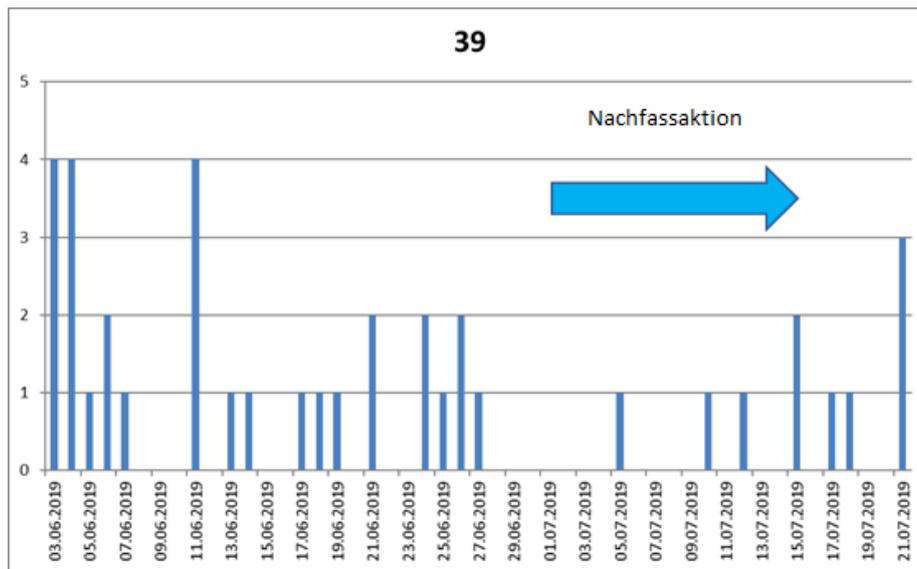


Abbildung 5.1 Eingang der Fragebögen mit telefonischer Nachfassaktion.

Im August 2019 mussten einige Projektteilnehmer erneut postalisch angeschrieben werden, da im Rücklauf der Fragebögen das Deckblatt (mit Fragen auf der Rückseite) nicht mit zurückgesendet worden war. Alle erneut angeschriebenen TeilnehmerInnen haben daraufhin das Deckblatt noch ausgefüllt, sodass für die Langzeitbefragung alle Antworten ausgewertet werden konnten.

### 5.1.1 Haushaltstruktur und Wohnsituation

Die meisten teilnehmenden Haushalte bestanden aus zwei verheirateten Personen. Kinder unter 18 Jahren gehörten in sieben Haushalten dazu. Die Teilnehmenden sind größtenteils Angestellte oder RentnerInnen/ PensionärInnen und 42,4 % verfügen über ein Haushalts-Nettoeinkommen von über 4.000 Euro, dargestellt in Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1 Haushaltsstruktur der KWK-Haushalte, die an allen Befragungszeitpunkten teilgenommen haben zum Zeitpunkt t4 (n = 33)

	Anzahl	Relativer Anteil (%)
<i>Bewohner*innen</i>		
Alleinlebend	1	3,0
Zwei Personen	14	42,4
Drei Personen	6	18,2
Vier Personen	6	18,2
Fünf Personen	5	15,2
Sechs Personen	1	3,0
<i>Mitbewohner*innen</i>		
Ehepartner*in	27	81,8
Nicht verheiratete*r Lebenspartner*in	3	9,1

Mutter/ Vater	6	18,2
Sohn/ Tochter (einschl. Kinder des Partners, der Partnerin)	14	42,4
<i>Kinder &lt; 18 Jahre</i>		
ja	7	
1 Kind	3	
2 Kinder	1	
4 Kinder	1	
<i>Arbeitsverhältnisse<sup>1</sup></i>		
Angestellte/r	13	39,4
ArbeiterIn	1	3,0
Selbständige/r	6	18,2
RentnerIn, PensionärIn	13	39,4
<i>Monatliches Haushaltseinkommen (netto) in €<sup>2</sup></i>		
1.001-1.500	1	3,0
1.501-2.000	0	0
2.001-2.500	4	12,1
2.501-3.000	4	12,1
3.001-3.500	2	6,1
3.501-4.000	5	15,2
>4001	14	42,4

Bei den Gebäuden handelte es sich größtenteils um Mehrfamilienhäuser (42,4 %), in denen eine Wohnung zur Miete bewohnt wird. Ein Energieausweis ist nur bei einem Objekt vorhanden. Jeweils einem Drittel der Teilnehmenden stehen zwischen 100 und 149 qm und 150 bis 199 qm Wohnfläche zur Verfügung. 10 % bewohnen unter 100 qm, 21 % zwischen 200 und 250 qm und 12 % verfügen über mehr als 250 qm. In der Wohnung halten sich die meisten Bewohner zwischen zwölf und achtzehn Stunden (39,4 %) sowie zwischen sechs und zwölf Stunden (36,4 %) auf. Jeweils 12 % halten sich bis zu sechs Stunden oder zwischen 18 und 24 Stunden in der Wohnung auf. Die beschriebenen Parameter sind Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2 Wohnsituation der KWK-Haushalte, die an allen Befragungszeitpunkten teilgenommen haben zum Zeitpunkt t4 (n=33)

	Anzahl	Relativer Anteil (%)
<i>Gebäudeart</i>		
Einfamilienhaus	4	12,1
Doppelhaushälfte	8	24,2
Wohnung im Mehrfamilienhaus	14	42,4
<i>Energieausweis vorhanden</i>		
Ja	1	3,0
nein	29	87,9
<i>Wohnart</i>		
Eigentum	13	39,4
Miete	15	45,5
<i>Wohnfläche (qm<sup>2</sup>)</i>		
unter 100	3	9,1
100-149	10	30,3
150-199	10	30,3
200-299	7	21,2
250 und mehr	4	12,2
<i>Aufenthaltsdauer in der Wohnung</i>		
0-6 Stunden	4	12,1
6-12 Stunden	12	36,4
12-18 Stunden	13	39,4
18-24 Stunden	4	12,1

### 5.1.2 Umgang und Zufriedenheit mit der KWK-Anlage

Von den zur Verfügung stehenden Anlagen wurden in den Haushalten, die an allen vier Befragungszeitpunkten teilgenommen haben, 13 mit einem Otto-Motor und 19 mit einem Stirling-Motor betrieben. Eine Anlage basierte auf einer Brennstoffzelle und wird, da es ein Einzelfall ist, bei den weiteren Analysen nicht berücksichtigt. Zu Umgang und Zufriedenheit mit der KWK-Anlage wurden verschiedene Daten zu den vier Erhebungszeitpunkten erhoben.

Die Beschäftigung mit der Anlage wurde anhand der Häufigkeiten der Beschäftigung mit der Bedienungsanleitung und Vorgenommenen Änderungen an den Einstellungen der Anlage erfasst.

Die Häufigkeit der Beschäftigung mit der Bedienungsanleitung hat im Verlaufe des Projektes leicht abgenommen. Zum Zeitpunkt t2, also ein halbes Jahr nach Inbetriebnahme der Anlage, gaben von den Befragten 17,9 % an sich oft und 7,1 % sich sehr oft (öfter als 2-mal pro Monat)

mit der Bedienungsanleitung zu befassen, zum Zeitpunkt t3 noch 11,8 % und 3,9 % und zum Zeitpunkt t4 10,3 % oft und niemand mehr sehr oft (s. Abbildung 5.2).

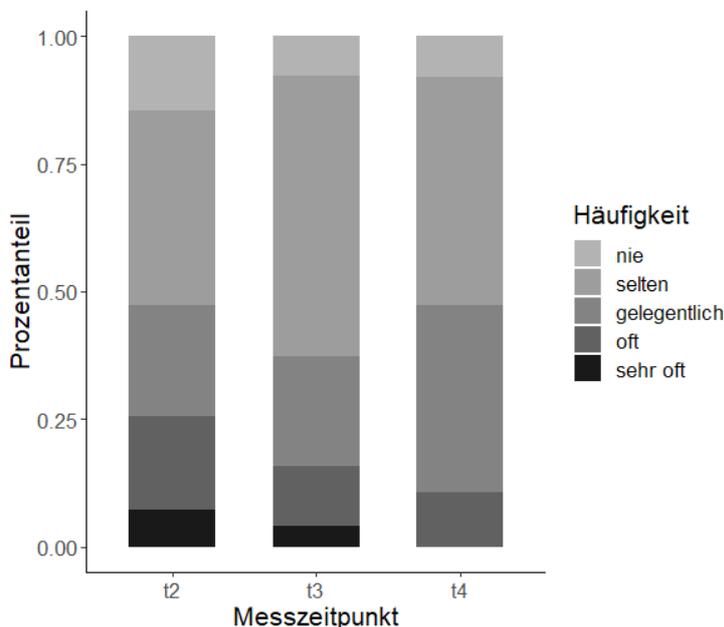


Abbildung 5.2 Wie häufig haben Sie sich seit der Installation/seit Ende des Projektes mit der Bedienungsanleitung Ihrer KWK-Anlage befasst?

Auch die Häufigkeit vorgenommener Einstellungsänderungen an der Anlage nahm insgesamt leicht ab. Während zu t2 und t3 noch 25 % angaben, nie Einstellungen vorzunehmen, waren es bei der letzten Messung t4 38 %. Dabei blieb der Anteil derer die oft Einstellungen vornehmen über alle Messzeitpunkte bei ca. 5 % konstant Einstellungen.

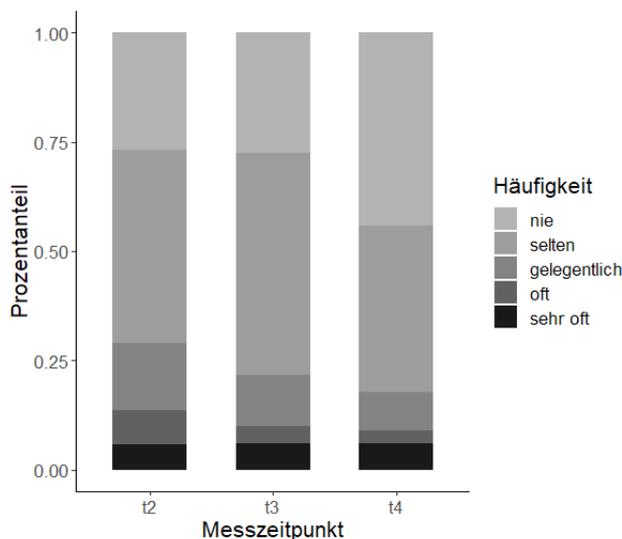


Abbildung 5.3 Wie häufig nehmen Sie Einstellungen an Ihrer KWK-Anlage vor?

Die Wartungsintervalle wurden in der dritten und in der vierten Befragung abgefragt. Die meisten lassen ihre Anlage einmal pro Jahr warten. Weniger als einmal pro Jahr lassen 15,4 %

ihre Anlage warten. Grund dafür ist, dass das Wartungsintervall gemäß dem Wartungsvertrag des Herstellers nach Betriebszeit bemessen wird (z.B. 6.000 Stunden), was innerhalb eines Jahres nicht zwingend erreicht wird. Auffällig ist, dass 7,7 % die Anlage gar nicht warten lassen. Gründe hierfür liegen u.a. darin, dass es für manche schwierig ist vor Ort eine Fachfirma zu finden, die für die Wartung der spezifischen Anlage zertifiziert ist.

Die Zufriedenheit mit der KWK-Anlage wurde über sechs Fragen zu Bedienung und Verständlichkeit der Anlage erfasst. Insgesamt sind die Befragten mit der KWK-Anlage zufrieden, wobei sich keine Änderungen über die Messzeitpunkte feststellen lassen. Abbildung 5.4 stellt die Zufriedenheit der Teilnehmer zu unterschiedlichen Befragungszeitpunkten dar.

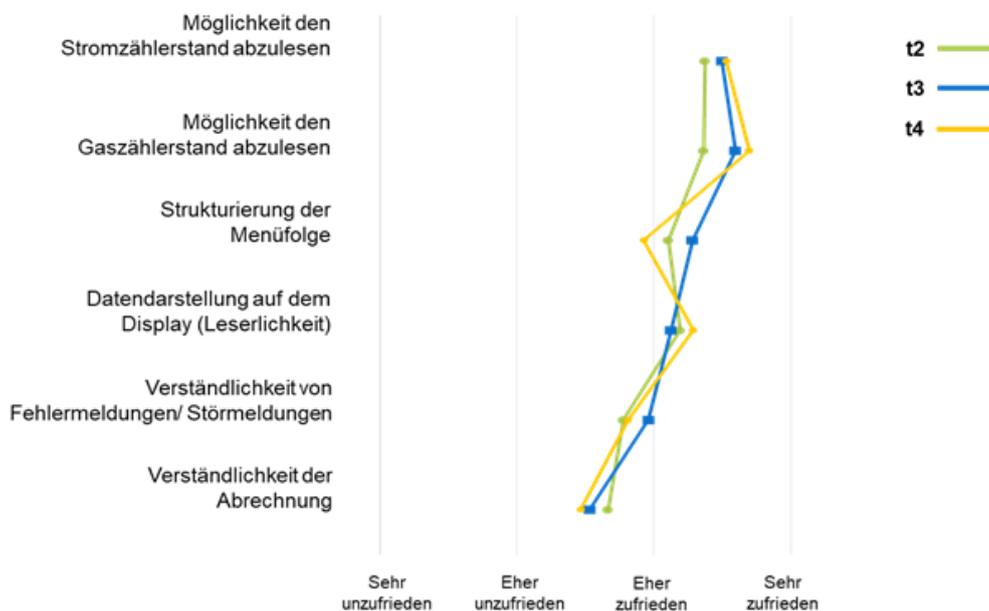


Abbildung 5.4 Zufriedenheit mit den technischen Merkmalen der KWK-Anlage

### 5.1.3 Einfluss der Anlage auf Einstellungen, Intention und Verhalten

Über die schon beschriebenen vier Messzeitpunkte wurden längsschnittlich die Entwicklungen der vier psychologischen Variablen *Einstellung*, *Norm*, *Intention* und *Wissen* zu den Themen Klimaschutz, Energiesparen und sparsames Heizverhalten gemessen.

Mit *Einstellung* ist hier gemeint, wie stark positiv oder negativ eine Person die Themen Energiesparen und sparsames Heizen bewertet, also die emotionale Haltung zu diesen Themen.

Unter *Norm* wird hier nur eine zusammengefasste (Gesamt-)Norm einer Verpflichtung zum Energiesparen und sparsamen Heizen berichtet, welche sich im Detail aus drei Arten zusammensetzt. Dies umfasst

- wie sehr sich eine Person persönlich zum Energiesparen und sparsamen Heizen verpflichtet fühlt (personale Norm),
- die Wahrnehmung der sozialen Erwartungshaltung, die von anderen signifikanten Personen an die eigene Person gestellt wird (subjektive Norm)

- und die wahrgenommene Verpflichtung, die sich aus dem direkt beobachtbaren Verhalten von Menschen im Umfeld ergibt (deskriptive Norm).

*Intention* ist das Ausmaß der Absicht Energie zu sparen und sparsam zu heizen, was auch die Suche eines ökologischen Stromanbieters beinhaltet.

*Wissen* umfasst die bewusste Kenntnis des tatsächlichen Energieverbrauchs im eigenen Haushalt, dass sparsamer Energieverbrauch und Heizen das Klima schützen kann, sowie das Wissen um mögliche finanzielle Ersparnisse dadurch.

Es wurde angenommen, dass diese Variablen sich durch die Installation und den Umgang mit der KWK-Anlage verändern könnten, wenn sich die Teilnehmenden mit den Möglichkeiten des Energiesparens durch die KWK-Anlage beschäftigten. Da sich über die generelle Sparsamkeit der Anlage hinaus auch aktive Kontrollmöglichkeiten durch Einstellen und Anpassen der Anlage boten, wurde zusätzlich die *Wahrgenommene Verhaltenskontrolle* erhoben, d. h. wie sehr sich die Teilnehmenden (durch die Anlage) befähigt fühlen ihren Energieverbrauch selbst zu beeinflussen.

Die Variablen wurden im Rahmen der Erhebungen per schriftlichem Fragebogen mit den in Tabelle 5.3 aufgeführten Fragen erhoben.

Tabelle 5.3 Fragebogenitems zur Erhebung der psychologischen Variablen

Psychologische Variable	Fragebogenitems
Einstellung	Ich finde Energiesparen gut.
	Wenn ich in der Wohnung trotz einer Raumtemperatur, die mir normalerweise genügt, friere, stelle ich lieber die Heizung an als mich wärmer anzuziehen.
	Ich finde sparsames Heizen gut
	Mir ist es wichtig, dass in meinem Haushalt mit Heizung sparsam umgegangen wird.
Norm	Ich fühle mich persönlich verpflichtet, durch einen geringen Energieverbrauch einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.
	Ich fühle mich persönlich verpflichtet, durch ein sparsames Heizverhalten einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.
	Menschen, die mir wichtig sind, finden es gut, wenn ich sparsam heize.
	Menschen, die mir wichtig sind, finden es gut, wenn ich Energie im Haushalt spare.
	In meiner Familie wird darauf geachtet, Energie zu sparen.
	In meinem Freundeskreis wird darauf geachtet, Energie zu sparen.
	In meiner Familie wird darauf geachtet, sparsam zu heizen.
	In meinem Freundeskreis wird nicht darauf geachtet wenig zu heizen.
Intention	Meine Absicht ist es, meinen Energieverbrauch zu reduzieren.

	Ich habe mir vorgenommen, möglichst wenig Energie zu verbrauchen.
	Meine Absicht ist es, zukünftig weniger zu heizen.
	Ich habe mir vorgenommen, möglichst wenig zu heizen.
	Ich habe die Absicht, umweltfreundlich erzeugten Strom zu beziehen.
Wissen	Ich fühle mich gut darüber informiert, wie ich durch meine Energienutzung das Klima schützen kann.
	Ich fühle mich gut darüber informiert, wie ich durch mein Heizverhalten das Klima schützen kann.
	Ich weiß über meinen Energieverbrauch im Haushalt gut Bescheid.
	Ich weiß darüber Bescheid, wie in meinen Haushalt geheizt wird.
	Ich weiß, dass ich durch einen sparsamen Energieverbrauch Geld sparen kann.
	Ich weiß, dass ich durch ein sparsames Heizverhalten Geld sparen kann.
Wahrgenommene Verhaltenskontrolle	Für mich ist es schwer, Energie einzusparen.

Die folgenden Ergebnisse basieren auf 33 der teilnehmenden Haushalte, welche an allen vier Erhebungen vor der Installation (t1), ein halbes Jahr danach (t2), sowie 4 Jahre (t3) und 5 Jahre (t4) nach Inbetriebnahme teilgenommen haben. Die Vergleiche zwischen den Messzeitpunkten wurden mit einfaktoriellen Varianzanalysen mit Messwiederholung statistisch überprüft. Die gemittelten Ergebnisse der psychologischen Variablen zu Energiesparen und sparsamen Heizen sind in Abbildung 5.5 aufgezeigt.

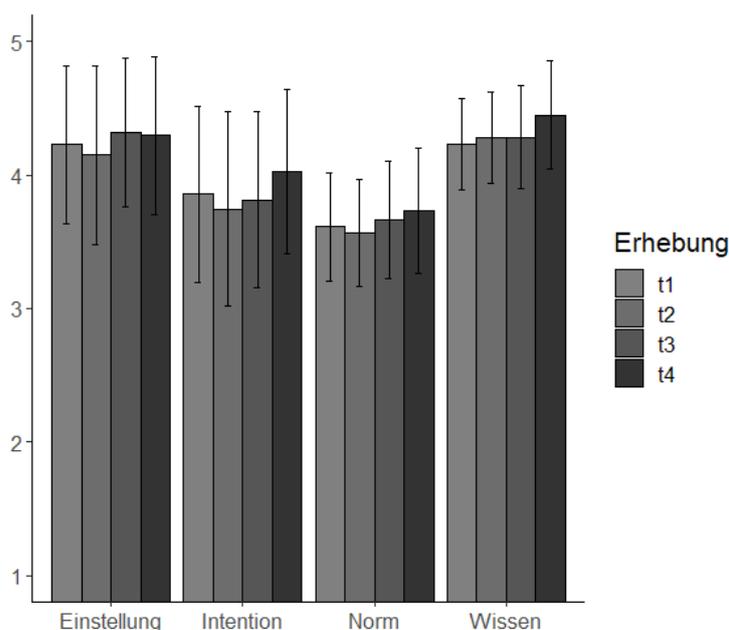


Abbildung 5.5 Mittelwerte der Ausprägung der psychologischen Variablen zu allen Messzeitpunkten mit Standardabweichung

Für die Einstellung konnten keine statistisch signifikanten Änderungen festgestellt werden, auch wenn für das Einzelitem "Ich finde sparsames Heizen gut" eine Steigerung über die Messzeitpunkte zu finden war. Die Intention steigt erst zu t4 nach der zusätzlichen Installation der Energie-Batteriespeicher. Dieser Effekt wird vor allem durch die Absicht zusätzlich umweltfreundlich erzeugten Strom zu beziehen bewirkt. Für die Norm sind keine statistisch signifikanten Entwicklungen zu finden. Die Variable Wissen steigt erst zu t4 signifikant an, wobei hier Steigerungen für alle drei Wissensbereiche (Klimaschutz, Haushaltsverbrauch, Geldsparen) feststellbar sind. Für die Wahrgenommene Verhaltenskontrolle (im Diagramm nicht aufgeführt), konnte keine Veränderung festgestellt werden.

Zusammenfassend sind in den psychologischen Variablen durch die KWK-Anlagen vor allem im Bereich Intention und Wissen Effekte zu finden, während Einstellung und Norm sich nicht verändern. Die von Anfang an hohe Einstellung, die bei Teilnehmenden an einem solchen Projekt zu erwarten ist, bot nicht viel Potenzial zu weiterer Steigerung. Eine Veränderung der ökologischen Norm lässt sich durch die Nutzung einer KWK-Anlage ohne entsprechende begleitende normzentrierte Kommunikationsmaßnahme nicht erreichen. Dass die Beschäftigung mit der Anlage eine Wissenssteigerung bewirkt ist wenig überraschend, weil die Anlage zusätzliche Informationen bietet und die Auseinandersetzung mit dem Thema Energieverbrauch und sparsames Heizen das entsprechende Wissen erhöht. Dass damit eine Steigerung der Intention einhergeht, also der Absicht sich weiter mit den Themen zu beschäftigen, ist auch mit der von Anfang an hohen positiven Einstellung erklärbar, die für die nötige Aufgeschlossenheit sorgt. Um den Einfluss einer Technikaffinität oder -aversion auszuschließen, die eventuell einen Einfluss auf die erhobenen psychologischen Variablen haben könnte, wurde zu t3 mit der Kurzskala zur Technikbereitschaft von [45] die Technikbereitschaft der Teilnehmenden erhoben. Es konnten dabei allerdings keine Zusammenhänge mit den psychologischen Variablen festgestellt werden.

#### **5.1.4 Zufriedenheit mit den administrativen Prozessen**

Die administrativen Prozesse bereiteten den Teilnehmenden Schwierigkeiten, was sich auch in deren Bewertung widerspiegelt: Der Zeitaufwand für die Ablesung der Zählernummer und der Zählerstände für die EVNG wird als eher passend bewertet. Als eher zu hoch im Zeitaufwand werden die Beantwortungen von Steuerfragen für das Hauptzollamt, die Beantragung der Energiesteuerrückerstattung, die Beantragung der Einspeisevergütung und die Beantragung der KWK-Förderung bewertet (s. Abbildung 5.6).

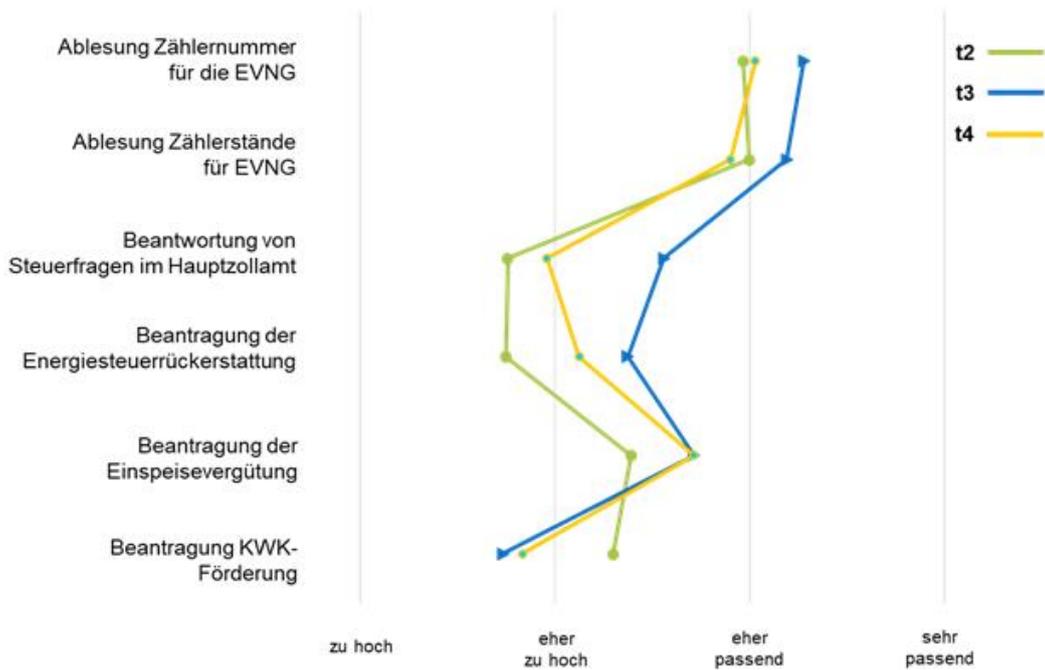


Abbildung 5.6 Beurteilung des Zeitaufwandes für Anmeldung, Ablesung und Anträge (Mittelwerte)

Die Bewertung der Anmelde- und Ableseprozesse wurde nach dem Prinzip von Schulnoten vorgenommen. Während die Anmeldungen bei der BAFA und bei der EVNG sowie die Ableseungen für die EVNG mit gut bis befriedigend bewertet werden, wird die Anmeldung beim Hauptzollamt und die Ableseung für das Hauptzollamt eher mit noch befriedigend und ausreichend bewertet (s. Abbildung 5.7).

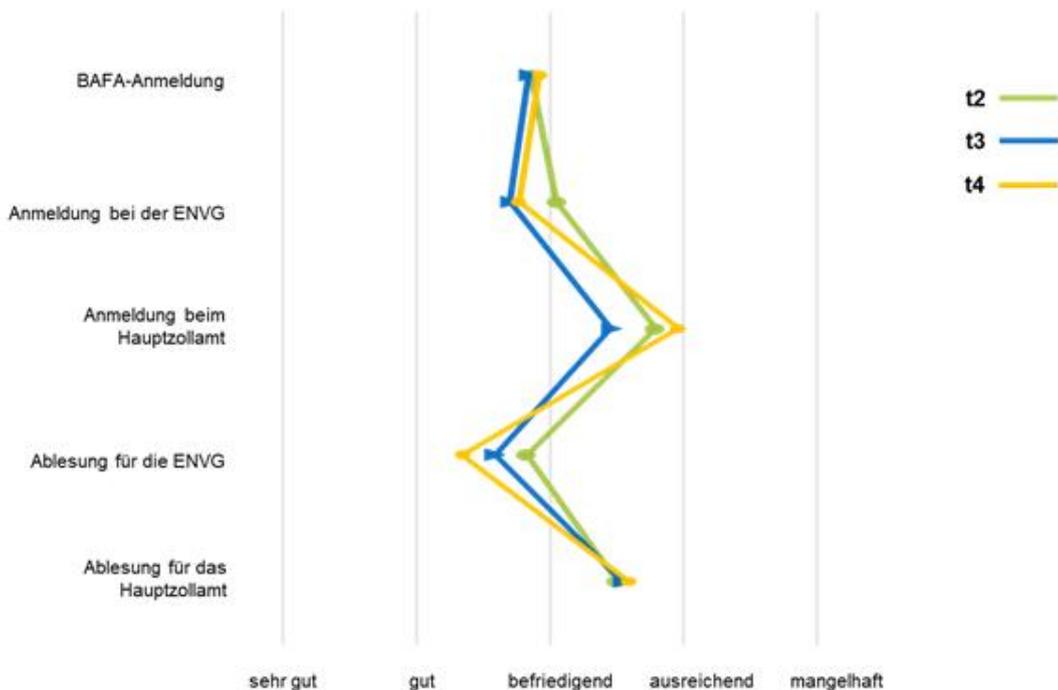


Abbildung 5.7 Mittelwerte der Bewertung der Anmelde- und Ableseprozesse

## 5.2 Problemzentrierte Interviews zur Implementierung der Speicher

Im Rahmen des hier durchgeführten Projektes wurden in 20 Referenzobjekten Stromspeicher integriert. Dies bedeutete eine technische Veränderung der KWK-Anlage, die auch auf das Nutzerverhalten Einfluss nahm. Insgesamt wurde mit der Integration eine verbesserte Ausnutzung der KWK-Anlagen angestrebt. Aus sozialwissenschaftlicher Sicht und für die nutzerorientierte Bewertung der Anlagen ist es von Interesse, auch hier die möglichen Einflüsse auf das NutzerInnenverhalten sowie die wahrgenommenen Vor- und Nachteile der Integration und des Betriebs der Anlagen zu identifizieren.

Nachdem die 20 Teilnehmenden des Projektes „KWK plus Speicher“ die Nutzungsvereinbarungen unterzeichnet hatten, wurden über die ICM die jeweiligen Kontaktdaten (ohne ID) übermittelt. So erfuhr die FH Dortmund nicht, welche ID zu welchem Mitmacher gehörte, konnte aber gleichzeitig mit den Beteiligten persönliche Interview-Termine vereinbaren.

Die Möglichkeit eines persönlichen Gesprächs über die eigenen Erfahrungen wurde von den Teilnehmenden sehr begrüßt.

Die Interviews schärften zum Teil die Ergebnisse der standardisierten Befragung und erbrachten auch wichtige Erkenntnisse, die in die vierte Befragungswelle mit aufgenommen werden konnten. Zudem wurde durch die Befragungen bestehende Wünsche und Bedürfnisse der Projektteilnehmenden ersichtlich, auf die im weiteren Projektverlauf eingegangen werden konnte. So wurde in der ersten Befragung von vielen Teilnehmenden der Wunsch geäußert, einen Überblick über die Performanz der eigenen Anlage im Vergleich mit den anderen Anlagen zu bekommen. Das GWI griff diesen Wunsch auf und erarbeitete für jede Anlage ein Informationsblatt, das sie den Teilnehmenden postalisch zusendete.

In der zweiten Befragungsrunde ein halbes Jahr nach Inbetriebnahme fragten die Teilnehmenden nach Möglichkeiten, PV-Anlagen in die Anlagen integrieren zu können und diesbezüglich weitere Informationen und Beratungen zu bekommen. Von der Erweiterung mit einer PV-Anlage versprechen sich die Teilnehmenden einen weiteren Schritt hin zu größerer Energieautarkie, da diese den Strombedarf im Sommer decken und den Batteriespeicher, der in dieser Zeit von der KWK-Anlage nicht gefüllt werden kann, auslastet. Im Rahmen des 3. Statustreffens am 18.11.2018 wurde vereinbart, dass diesem Wunsch dahingehend entsprochen werden soll, dass die Teilnehmenden über einen Infobrief darüber informiert werden, dass die Anlagen mit dem Batteriespeicher möglichst ein Jahr ohne weitere Zusatzmodule laufen sollen und für das nächste Jahr eine Informationsveranstaltung für die Erweiterung mit PV-Anlagen anvisiert ist. In Anhang 12 ist ein Ausschnitt aus einem Interview zu finden.

Eine Empfehlung für die KWK-Anlage würden einige nur bedingt aussprechen. Durch den Batteriespeicher ist die Zufriedenheit mit der Stromeigennutzung gestiegen. Der Einbau des Batteriespeichers lief bei den meisten Teilnehmenden ohne Probleme und ohne, dass weitere Umbaumaßnahmen notwendig waren.

TN: *„lief im Großen und Ganzen problemlos. Also Terminabsprache war wunderbar und die kamen vorbei. Gute Leute auf jeden Fall, sehr kommunikativ, über E-Mail und Telefon. Also es gab kleinere Problemchen, es musste eine Stromleitung noch gelegt werden. Ich war aber nicht immer zu hause. Aber das lief immer alles wunderbar. Und wir hatten jetzt auch keine Probleme bei der Installation.“*

Mit dem Batteriespeicher bekamen die meisten Teilnehmenden eine App oder den Zugang zu einem Internetportal, über das sie die aktuelle Stromerzeugung, den Ladestand der Batterie, und den eigenen Verbrauch inklusive Bezug aus dem Netz beobachten können. Dies begeistert insbesondere die technikaffinen Menschen und erleichtert auch das eigene Monitoring und Nutzungsverhalten.

TN: *„Also das ist ja ein ganz schönes System, ich habe eine App auf dem Handy, kennen Sie das? Das ist super! Die läuft auch super. [...] Und dann können Sie sehen, was viel informativer ist als das, was ich jemals vorher hatte, ich kann jetzt sehen, wird jetzt Energie geliefert von der Anlage, dann steht hier 700 Watt zum Beispiel, wie viel verbrauche ich gerade und wie viel beziehe ich aus dem Netz. Und das hier ist der Ladezustand von der Batterie, dem Akku. Das ist sehr informativ und es gibt dann auch noch wunderbare Darstellungen über den zeitlichen Verlauf direkt da drunter. Und hier sehen Sie über den Tag, was habe ich ins Netz eingespeist - also da speise ich eigentlich gar nichts ein - was speise ich in den Akku ein, was speise ich in meinen Haushalt ein, und wie viel muss ich aus dem Netz beziehen.“*

Eine Herausforderung bieten die administrativen Prozesse. Insbesondere dann, wenn Teilnehmende in ihrem bisherigen Leben keine großen Erfahrungen im Umgang mit Formularen gemacht haben. Vor allem die Anmelde- und Abrechnungsprozesse sowie die Kommunikation mit dem Zoll bereiteten Schwierigkeiten. So änderten sich von einem zum nächsten Jahr Formulare, ohne dass darüber im Vorfeld der Abrechnungen informiert wurde, so dass die Teilnehmenden die Abrechnung z.T. doppelt erledigen mussten. Ausschnitte der Interviews sind in Anhang 13 einzusehen.

Ein Problem, das im Projektverlauf gelöst werden konnte, betraf die Abrechnungszyklen der EVNG und des Hauptzollamtes, die sich im Stichtag unterschieden. Hier konnte im Laufe des Projektes nachjustiert werden, und durch Einwirken der ICM die Stichtage für die Abrechnung der EVNG an den Stichtag des Hauptzollamtes angeglichen werden.

Für einige ältere Teilnehmende war es eine ungewohnte Herausforderung, dass sie durch die aus der KWK-Anlage erzielten Einnahmen als unternehmerisch Tätige eingestuft werden und nun erstmals einen Steuerberater hinzuziehen müssen. Dabei bestehen unterschiedliche Informationen darüber, ob ein Gewerbe angemeldet werden muss, oder nicht. Hier würden sich die Teilnehmenden ein vereinfachtes Verfahren wünschen, da sie die Anlage ja primär zum Zweck der Eigenversorgung betreiben und nicht um Gewinne zu erzielen.

TN: *“Und das Finanzamt. Diese Einkommenssteuerrückerstattung, dieser Antrag. Da müssten sie auch mal etwas anregen, dass das für uns nicht gilt. Es ist ja klar, wir wollen*

*keinen Gewinn machen. Und es ist ja auch klar, dass wir die nächsten noch sechs Jahre keinen Gewinn machen. [...] Die verlangen immer eine Gewinn- und Verlustrechnung von uns. Und ich meine, der Stromerzeugung steht ja der Gaseinsatz entgegen, der viel höher ist als das, was an Stromkosten wieder eingespart wird. Von daher ist ein Gewinn nicht möglich. Ist ja keine Photovoltaikanlage, die keine Kosten verursacht und nur Strom produziert. Und wir konnten natürlich den Anschaffungspreis, den Arbeitspreis, solche Wartungssachen, alles darlegen. Also es ist auch klar festgelegt.“*

*TN: “Also die ganze Bürokratie ist schon nervig. Und kostet auch. Für die Steuererklärung haben wir einen Steuerberater, der auch alle unserer Sachen macht und der macht dann auch eine Steuererklärung dafür. Und dann sind schnell 150 bis 200 Euro weg. Das müsste anders gehandhabt werden. Das ist zu umständlich.“*

Im Februar 2019 wurde in Deutschland das Marktstammdatenregister eingeführt und aktiviert. Hier sind auch die Mitmacher des KWK Projektes aufgefordert, alle Stromproduzierenden und -Batteriespeichernden Anlagen zu registrieren. Die Registrierung der Batteriespeicher wurde größtenteils von den Installateuren vorgenommen, oder so vorbereitet, dass die Teilnehmenden nur noch wenige Handgriffe selbst tun mussten.

*TN: “Das hat für mich der Installateur übernommen. Er hat mir mehrere PDF-Dateien geschickt, diese Unterlagen, die er schon vorausgefüllt hat, mit den Daten und technischen Daten der Anlage usw. Und ich musste eigentlich nur Gegenchecken und ihm dann unterschrieben wieder zurückschicken. Das hab ich dann auch gemacht per Mail und Fax und dann hat er das alles für mich gemacht und dann lief das auch.“*

Die KWK-Anlagen mussten die Teilnehmenden selbständig eintragen. Auch hier berichteten vor allem Menschen mit weniger Erfahrung mit bürokratischen Prozessen, dass sie größere Schwierigkeiten hatten. Welchen Nutzen das Marktstammdatenregister hat und warum es dieses zusätzliche Werkzeug braucht, ist vielen nicht klar.

*TN: “dann habe ich mich hingesezt und habe vier Stunden gebraucht, um die beiden Sachen komplett da reinzukriegen. Und da hatte ich sowas von die Schnauze voll. [...] Ich versteh wirklich nicht, warum man das jetzt gemacht hat. Heute im Zeichen von Digitalisierung [...] Und bei der BAFA, die haben die ganzen Unterlagen von der Heizung gehabt. Es wäre doch ein leichtes gewesen, dass zu übertragen in ein Marktstammdatenregister. Aber nein, St. Bürokratius hilft, da hat wieder jemand gedacht, ich mach mal ein neues Register. Das war wirklich haarsträubend. Ich weiß jetzt nicht, ob ich das richtig gemacht habe. [...] Und vor allem auch die Zeit, die man dafür aufwendet. Ich versteh das nicht. Das ärgert mich an den ganzen Sachen. Das ist mehr Behördenkram als alles andere.“*

*TN: “Ich frage mich nur, warum man alles dem Staat melden muss, dass man da jetzt einen Akku eingebaut hat, das leuchtet mir nicht ein. Die Sinnhaftigkeit. Sinnvoll wäre*

*es natürlich zu wissen, wo habe ich KWK-Anlagen installiert und wo habe ich Batteriespeicher installiert, um zu gucken, ob das Einwirkung auf das Netz hat. Aber ich glaube nicht, dass die das damit akkurat erfassen können.“*

Schwierigkeiten bei der Eingabe der KWK-Anlage in das Markstammdatenregister bereitete den Teilnehmenden vor allem die geforderten Daten.

*TN: “Der Batteriespeicher war ja jetzt ganz neu, da war das gar nicht so schwierig. Weil der ja auch schon eine vorläufige Meldung hatte. Darauf konnte ich aufbauen. Bei dem anderen, was ich da alles Eingeben musste. Ich musste in der ganzen Bedienungsanleitung für Fachhandwerker nachgucken, welche Angaben ich da machen musste. Und das, ne... ich hab mir die Sachen von der BAFA nämlich genommen und dachte, da stünde alles drin. Ne, da stand längst nicht alles drin.“*

Insgesamt spiegeln die Interviews die Befragungsergebnisse wider und bestätigen den Eindruck, dass die Teilnehmenden mit der KWK-Anlage größtenteils zufrieden sind. Hervorzuheben ist, dass der erhöhte Verwaltungsaufwand einigen Teilnehmenden Schwierigkeiten bereitete und zu Frustration führte. Zudem bestehen Zweifel bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Anlage in Anbetracht der hohen Anschaffungskosten, insbesondere wenn kein Batteriespeicher integriert ist.

### **5.3 Synthese und Reflexion der Ergebnisse im Gesamtprojekt**

Die Ergebnisse der Langzeitbefragung und der problemzentrierten Interviews wurden im gesamten Projektteam reflektiert:

Im Rahmen des zweiten Statustreffens wurden die Ergebnisse aus den ersten drei Befragungszyklen im Projektteam vorgestellt, diskutiert und von den Projektpartnern Anregungen für weiter Auswertungen gegeben.

Die vorhandenen Messdaten des GWI zum Strombedarf und zur Stromeigennutzung wurden zum Nachweis verhaltensbezogener Effekte herangezogen und vor dem Hintergrund der durch die Befragung gewonnenen Daten analysiert. Dadurch konnten die erzielten deutlichen Einsparungen im Strombedarf besser erklärt werden.

Aus der Verschneidung der Messdaten des GWI und den Befragungsergebnissen der FH Dortmund sind zwei Veröffentlichungen in Fachzeitschriften hervorgegangen.

Die Analyse verhaltensbasierter Effekte hinsichtlich des Wärmebedarfs erwies sich als schwierig. Die erzeugte Primärenergie wird zu einem Teil von der KWK Anlage selbst benötigt und wird nicht komplett in Wärme für die Heizungsanlage und Warmwasseraufbereitung genutzt. Da der Verbrauch der KWK-Anlagen an Primärenergie abhängig von Umgebungsparametern ist, kann nur ein grober Wert auf der Grundlage technischer Daten der Anlagen errechnet werden. Gleiches gilt für die Berechnung der Einsparungen: Für die ursprünglichen Anlagen können lediglich Literaturwerte herangezogen werden. Auch ist es schwierig den Verlust durch Abwärme rechnerisch zu beziffern. Damit ergibt sich eine grobe Schätzung der gewonnenen Einsparungen, nicht aber ein exakter Rechenwert wie beim Strombedarf.

## 6. Modellierung und Simulation

*In diesem Kapitel ist ein Modell zur Abbildung von Energieströmen in Gebäuden erstellt worden, welches unterschiedliche KWK-Systeme sowie Batteriespeicher abbildet. Abgeleitet aus einer Matrix von unterschiedlichen KWK-Technologien, Lastprofilen von Referenzobjekten wurden Jahressimulationen für die zwei unterschiedlichen Betriebsweisen (strom- und wärmegeführt) durchgeführt, welche ein umfassendes Bild über Einsatzpotenziale von KWK-Anlagen geben. Die betrachteten Systeme umfassen otto- und stirlingmotorische KWK-Anlagen sowie brennstoffzellenbasierte (PEM und SOFC) Systeme. Die betrachteten Batteriespeicher umfassen Lithium-Ionen sowie Blei-Säure Batterien. Die simulativ abgebildeten energetischen Kenngrößen werden genutzt, um wirtschaftliche Aspekte der Systeme zu beleuchten. Die Simulationsergebnisse quantifizieren die durch die Batterien erreichbare Steigerung der Eigenverbrauchsquote und des Autarkiegrades. Weiterhin kann die Steigerung der Eigenverbrauchsquote durch die stromorientierte Betriebsweise in unterschiedlichen Gebäudetypen abgebildet werden. Darüber hinaus wurde die benötigte Betriebsstundenzahl der Systeme zum Erreichen der Netzparität für beide Betriebsarten dargestellt. Dies hat gezeigt, dass die KWK-Systeme, die ohne Batterie betrieben werden, zu aktuellen Konditionen wirtschaftlicher sind als KWK-Anlagen, die um eine Batterie erweitert wurden.*

*Zur Betrachtung der Wechselwirkungen von KWK-Anlagen und elektrischen Speichern in beliebigen Quartieren ohne gebäudescharfe Messdaten, werden synthetische Strom- und Wärmelastprofile benötigt. Die vorgestellte Methodik berücksichtigt den Einfluss des Bewohnerverhaltens auf die Energieverbräuche. Durch die Generierung von Stromlastprofilen und dazugehörigen Anwesenheitsprofilen wird ein in sich konsistenter Datensatz erzeugt. Mit quartierspezifischen thermischen Simulationen kann so eine Datenbasis für kombinierte Betrachtungen des Strom- und Wärmesektors eines Quartiers geschaffen werden.*

*Um den Einfluss auf das Netz quantifizieren zu können, wurde eine Regelung für motorische und Brennstoffzellen KWK-Systeme entwickelt, welche die Anlagen aus Sicht des Netzes steuert. Die entwickelte Regelung nutzt den Freiheitsgrad, den der thermische Speicher bietet, um positive und negative Residuallasten zu reduzieren. Die Simulationsergebnisse wurden auf technische und ökologische Aspekte hin ausgewertet und zeigen, wie stark sich die fiktive Umrüstung der 100 KWK-Anlagen auf die Residuallast der Stadt Bottrop auswirken würde. Anhand der Volllaststunden ist zu erkennen, dass sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Technologien ergeben. Motorische Anlagen können flexibler auf die Anforderungen des Stromnetzes reagieren als Brennstoffzellen. Die untersuchten SOFC-Systeme können aufgrund ihrer unterschiedlichen Lastbereiche ebenfalls gut auf die Residuallast reagieren. Die Netzdienlichkeit der PEMFC-Systeme kann durch eine Prognose der Residuallast erhöht werden, um diese bei einem Stromüberschuss ausgeschaltet zu lassen. Die Batterie stellt neben den KWK-Anlagen ebenfalls eine wichtige Komponente zur Abdeckung der Residuallast dar. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Energiebereitstellung der Nutzer sind bei der netzdienlichen Fahrweise der Mikro-KWK-Anlagen etwas geringer als bei der wärmegeführten Fahrweise.*

## 6.1 Modellierung und Simulation des Systems

### 6.1.1 Auswahl Lastprofile und Modellentwicklung

Die für die Gebäudesimulation verwendeten Daten stammen aus den vermessenen Objekten im Feld. Die Auflösung der 5min-Werte wird beibehalten, um möglichst viele Werte für eine tabellarische Implementierung der Verbräuche in Modelica zu gewährleisten. Kumuliert über ein Jahr, ergeben sich für die acht gewählten Objekte für die Simulationen die in Tabelle 6.1 dargestellten Jahreswerte.

Tabelle 6.1 Betrachtete Objekte mit Nutzern und Verbrauchsdaten

Nr.	IWU Typ	Personen	Elek. Last in kWh <sub>el</sub> /a	Heizlast in kWh <sub>th</sub> /a	TWW in kWh <sub>th</sub> /a
1	RH C	2	2.318	18.912	1.295
2	RH D	4	3.573	16.637	1.405
3	MFH J	5	4.511	21.733	2.723
4	RH H	3	3.494	14.573	1.844
5	EFH I	4	3.350	17.739	22.135
6	RH H	6	11.950	49.408	3.601
7	EFH E	2	4.432	25.712	7.188
8	MFH E	4	3.187	35.636	4.077

Durch die Auswahl der Gebäude soll ein Querschnitt des Wohnbestandes abgebildet werden. Hierbei werden verschiedene Häusertypen (EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaus, MFH = Mehrfamilienhaus), verschiedene Gebäudealter, unterschiedliche Anzahlen an Hausbewohnern und Unterschiede der Wärmelast und Stromlast abgebildet. In die Simulation gehen die elektrische Last, die Heizlast sowie der TWW-Verbrauch ein.

Die technischen Daten der betrachteten KWK-Systeme sind in Tabelle 6.2 zusammengestellt. Die Betriebsdaten wurden den Herstellerangaben der KWK-Anlage, des thermischen Speichers und des Spitzenlastkessels (SLK) entsprechend übernommen. Weitere technische Daten wurden mit Messdaten aus dem Projekt ene.field ergänzt [46]. Bei KWK-Anlagen ohne integrierten SLK oder thermischen Speicher wurde sich an der Leistung bzw. Speichergröße einer ähnlichen Anlage orientiert.

Tabelle 6.2: Technische Daten der untersuchten Systeme für die gewählten Referenzobjekte – Simulationsdaten

Anlage	$\dot{Q}_{KWK} / P_{KWK}$ in kW <sub>th</sub> / kW <sub>el</sub>	$\eta_{th} / \eta_{el}$	$\dot{Q}_{SLK}$ in kW <sub>th</sub>	$V_{Speicher}$ in m <sup>3</sup>	$C_{Bat}^{Nenn}$ in kWh
Otto	2,5 / 1	0,66 / 0,26	35	500	6,5
Stirling	5,5 / 1	0,75 / 0,13	13,1	774	3,3
PEMFC 1	0,7 / 0,3	0,63 / 0,31	21	560	4,8
PEMFC 3	1,1 / 0,75	0,55 / 0,37	17,9	215	16,0
SOFC 1	0,6 / 0,7	0,39 / 0,46	23,4	215	10,1
SOFC 3	0,85 / 1,5	0,33 / 0,55	24,3	500	6,0

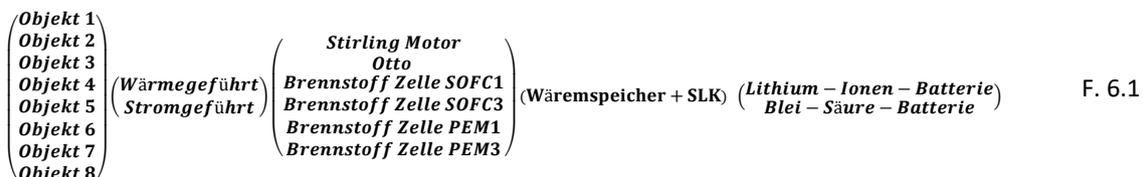
Im Rahmen der Modellierungsarbeit wurde ein allgemeingültiges KWK-Modell erstellt, welches für die unterschiedlichen Technologietypen unterschiedlich parametrisiert wird. Bei der Regelung wurden drei verschiedene Ansätze zur Regelung der Anlagen verwendet und implementiert. Die unterschiedlichen Regelungsoptionen, die für KWK-Anlagentypen (ottomotorische KWK-Anlagen, sowie SOFC- und PEMFC-basierte KWK-Anlagen) eingesetzt werden könnten, werden im Folgenden kurz erläutert.

Wärmegeführte Regelung: die KWK-Anlage wird ausschließlich nach dem Wärmebedarf des Objektes geregelt. Der Wärmebedarf wird zu jeder Zeit abgedeckt. Hierbei erfolgt das Ein- und Ausschalten der Anlage über Grenztemperaturen des Speichers. Die Regelung wird bei motorischen KWK-Anlagen eingesetzt.

Stromgeführte Regelung: bei der stromgeführten Regelung von KWK-Anlagen wird diese nur bei Strombedarf angeschaltet. Hierbei entsteht Wärme, die nicht immer direkt genutzt werden kann. In diesem Fall wird der Pufferspeicher erwärmt und gibt die nicht benötigte Wärme bei Bedarf wieder ab. Wird die Wärme hingegen über einen Notkühler an die Umgebung abgegeben, ist der Effizienzgewinn einer KWK-Anlage nicht mehr gegeben was energetisch unvorteilhaft ist. Diese Regelungen werden allerdings zum jetzigen Stand in Bereichen der privaten Hausenergieversorgung nicht eingesetzt.

Stromorientierte Regelungen: Im Fall der stromorientierten Regelung wird grundsätzlich die wärmegeführte Regelung angewendet, jedoch deckt die Anlage den elektrischen Bedarf, wenn die Speichertemperatur eine weitere Wärmeaufnahme zulässt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die KWK-Anlage der elektrischen Last folgen kann, solange die Wärme vom Speicher aufgenommen werden kann. So kann eine Steigerung der Eigenverbrauchsquote erreicht werden, welche allerdings auch in höheren Speicherverlusten resultiert. Ob die Vorteile die Nachteile überwiegen, wird im Folgenden analysiert. Die Ergebnisse der Erprobung der beschriebenen Regelung auf dem Prüfstand werden in Abschnitt 7.1 näher erläutert.

Durch eine systematische Untersuchung der Korrelationen zwischen den unterschiedlichen Teilsystemen sind Ansätze zur synergieoptimierten Auslegung und zu adaptiven Betriebsweisen aller Teilsysteme im Anwendungsbereich des Wohngebäudebestands qualitativ und quantitativ aufzuzeigen. Jedem der Lastprofile der acht Objekte werden unterschiedliche Versorgungstechnologien und Regelungen zugeordnet, welche F. 6.1 zu entnehmen sind. So ergeben sich insgesamt 96 Jahressimulationen je Betriebsweise.



### KWK-Systemmodell und Nutzer Lastprofile

Zunächst wurde ein Modell für ein KWK-System mit einer Wärmesenke<sup>4</sup> in Modelica entwickelt und auf Plausibilität geprüft. Das Gesamtmodell verfügt über eine KWK-Anlage, einen thermischen Speicher, einen Spitzenlastkessel, zwei Wärmesenken (Warmwasser und Heizlast), ein elektrisches Lastprofil sowie eine externe Regelungseinheit und Peripherie-Geräte eines hydraulischen Systems. Die Modellierung des Gesamtmodelles wurde einmal ohne und einmal mit elektrischem Speicher erstellt.

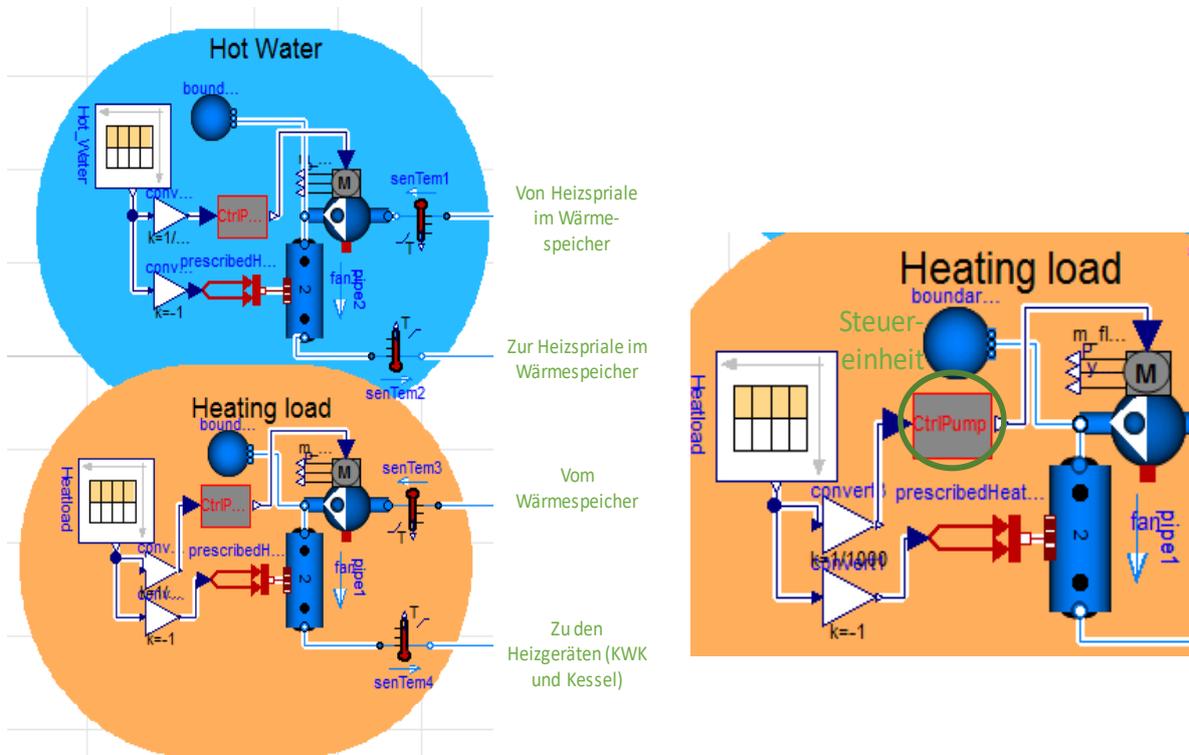
Es wurden motorische KWK-Anlagen mit einer wärmegeführten Regelung auf Basis von Speichertemperaturen modelliert. Für die auf Hochtemperaturbrennstoffzellen basierenden KWK-Technologien wurde ein eigenes Regelungsmodell entwickelt. Dieses basiert auf der Regelung der motorischen Anlagen. Allerdings wurden hier technische Besonderheiten, wie die Wärmeabfuhr bei geringer Wärmebelastung bei SOFC-Anlagen, berücksichtigt. Außerdem verfügt das Modell auf Brennstoffzellenbasis über eine einstellbare Mindestausschaltzeit. Basierend auf Herstellerangaben und Feldtestergebnissen sind zwei ottomotorische, zwei stirlingmotorische und eine SOFC-Anlage als KWK-System-Modell erstellt worden.

Das Spitzenlastkesselmodell ist eine Erweiterung des Teilmodells für einen Wärmeerzeuger. Das Modell des Wärmeerzeugers ist ein einfach gehaltenes Modell mit einem Wärmetauschervolumen. Im Spitzenlastkesselmodell muss zusätzlich die Steuerung implementiert werden, mit der der durch den Kessel bereitzustellende Wärmestrom bestimmt wird.

Die benötigte Wärmemenge (entsprechend der Wärmelastprofile) wird in jedem Zeitschritt abgefragt und mittels Wärmetauscher gedeckt. Zur Abbildung der Deckung des Warmwasserbedarfs wurde ein sekundärer Wasserkreislauf modelliert, welcher Wärme mittels modellierter Heizspirale aus dem Warmwasserspeicher herauszieht. Die Heizlast wird im primären Kreislauf zwischen Wärmespeicherrücklauf und Heizgerätevorlauf abgeführt und ist analog

<sup>4</sup> Welche das Referenzobjekt sowie Nutzerverhalten gleichzeitig darstellt.

zur Warmwassersenke aufgebaut. Die Daten in der Verbrauchstabelle für die konkrete Wärmelast unterscheidet sich, je nach simuliertem Objekt. Die Umsetzung der Wärmesenkenmodelle ist in Abbildung 6.1 dargestellt.



a) Der blaue Bereich beschreibt die profilbasierte Wärmesenke des Trinkwarmwassers inklusive Pumpe „pump1“ und dem hinterlegten Profil in „Hot\_Water“. Die Wärme wird über ein Wärmetauschermodell „pipe2“ abgeführt. Analog dazu ist die Wärmesenke des Heizbedarfes im orangefarbenen Bereich dargestellt.

b) Der grün-eingekreiste Block ist die beschriebene Steuereinheit, die als Eingangsparameter die profilbasierte Wärmelast besitzt und den berechneten Massenstrom als Ausgangssignal an die Pumpe (rechts oben) weiterleitet.

Abbildung 6.1: Warmwasser und Heizlast (a) und Wärmesenke der Heizlast (b)

Das Stromlastprofil wird ebenfalls tabellarisch mittels Matrix in das System überführt. Hier kann die elektrische Last direkt an das KWK-System-Modell übergeben werden. Vorteil dieser Modellierungsvariante im Vergleich zum physikalischem Gebäudemodell ist der simple Aufbau und damit kurze Rechenzeit, die Präzision der Last und die Möglichkeit der schnellen Änderung des Lastprofils. Zusätzlich zum gesteuerten Wärmetauscher ist es notwendig, die Pumpe lastabhängig zu betreiben. Aufgrund der Möglichkeit, den Massenstrom abhängig von der Wärmelast zu steuern, können die Temperaturdifferenzen von Vor- und Rücklauftemperatur konstant gehalten werden. Hierfür wird in der entwickelten Steuereinheit die gewünschte Temperaturdifferenz eingestellt. Innerhalb der Steuereinheit wird der wärmelastabhängige Massenstrom berechnet und an die Pumpe weitergeleitet.

Durch die Entwicklung eines KWK-Systems um einen elektrischen Speicher kann die bereitgestellte elektrische Energie des KWK-Systems vom objekt- und nutzerseitigen Strombedarf zeitlich entkoppelt werden. Für die Modellintegration erfolgt im ersten Abschnitt die Grundlagendefinition für die allgemein betrachteten lithium-basierten Stromspeicher. Die interne Batterieregulierung charakterisiert das Speicherverhalten in einem allgemeinen Ansatz. Eine

Batteriezelle muss zunächst modelliert und dann in Dymola simuliert werden, damit sich die relevanten Verhältnisse der Zelle gut betrachten lassen. Bei den elektrischen Speichern werden die Modelle auf drei wesentliche Ebenen aufgeteilt: die elektrische Modellierung, die thermische Modellierung (eindimensionales, dynamisches Wärmemodell des Zellkerns) sowie das Alterungsmodell (Modell zur Berechnung der Alterungsfaktoren der Gesamtkapazität).

Die Systemregelung stellt die Schnittstelle zwischen den Teilsystemen dar, sowohl in der Batterie („Batterie-Management-System“) als auch im ganzen System („System Control Unit“). Der systemische Regelungsansatz ist allerdings auf einer wärmegeführten Betriebsweise des KWK-Systems aufgebaut. Durch den adaptiven Aufbau und die Kompatibilität zwischen den unterschiedlichen Regelungsansätzen ist die Regelung fähig, auch ein stromorientiertes KWK-System zu steuern.

### 6.1.2 Modellvalidierung

Als erstes wird das KWK-System inkl. Spitzenlastkessel und Wärmespeicher gekoppelt mit dem Wärme- und Strombedarf validiert. Hierzu werden Messergebnisse und Simulationsergebnisse über einen Zeitraum von einem Jahr verglichen. Das Jahr wurde auf drei charakteristische Wochen aufgeteilt, um den Vergleich zu vereinfachen. Diese sind Sommer, Übergang und Winter. Die Validierung des KWK-Systems wurde anhand der Wärme und Stromproduktion des Systems vorgenommen. Wird hinsichtlich der zeitlichen Dynamik der elektrischen und der thermischen Leistungen ein hohes Maß an Korrelation erreicht, so ist auch von einer Validierung der zugrunde liegenden Regelungslogiken auszugehen. Im Validierungsprozess wurden sowohl die absolute Produktionsmenge als auch die Zeitpunkte und Leistungshöhen der Wärme verglichen.

Da im untersuchten Fall der Wärmespeicher bei korrekter Parametrisierung ein gleiches Verhalten aufweisen soll, wird auch eine ähnliche Wärmenachführung bzw. Wärmeproduktion erwartet. Nach erfolgreicher Simulation und der Datenverarbeitung konnten die in Tabelle 6.3 dargestellten Ergebnisse ermittelt werden, welche die Abweichung zwischen Simulation Messung darstellen.

Tabelle 6.3 Ergebnisse Wärmenachführung Messung und Simulation

Periode	Wärmeerzeugung KWK Messung in kWh <sub>th</sub>	Wärmeerzeugung KWK Simulation in kWh <sub>th</sub>	Abweichung der Simulation in %
Sommer	121	120,89	-0,1
Übergang	326	317,69	-2,6
Winter	906	897,36	-1,0
Kumuliert	1353	1335,94	-1,3

Es fällt auf, dass die Simulation der Sommertage mit dem geringsten Wärmebedarf den Messdaten in Bezug auf Wärmeproduktion mit der kleinsten Abweichung von nur 0,1 % fast exakt

entspricht. Übergangstage und Wintertage sind mit der Abweichung von -2,6 % bzw. -1,0 % nah an den Messdaten. Da hier mit den approximierten Werten für die Wärmelast von Trinkwarmwasser die größten Unsicherheiten zu finden sind, ist die höhere Abweichung als moderat zu bewerten. Dies kann unter anderem an den Wärmeverlusten liegen, zu denen ebenfalls keine Messdaten vorliegen. Während es im realen Betrieb auch zu Leitungsverlusten kommen kann, wird im Modell nur der Wärmespeicher als Verlustquelle modelliert. Leitungsverluste sind in der Regel in Bezug auf die Verluste im thermischen Speicher sehr gering.

Neben der absoluten Produktionsmenge sind auch die Zeitpunkte und Leistungshöhen der Wärme entscheidend. Abbildung 6.2 stellt den zeitlichen Verlauf der Wärmeerzeugung in Simulation und Messung dar und zeigt, dass das Wärmeerzeugungsmodell dem realen Verhalten entspricht.

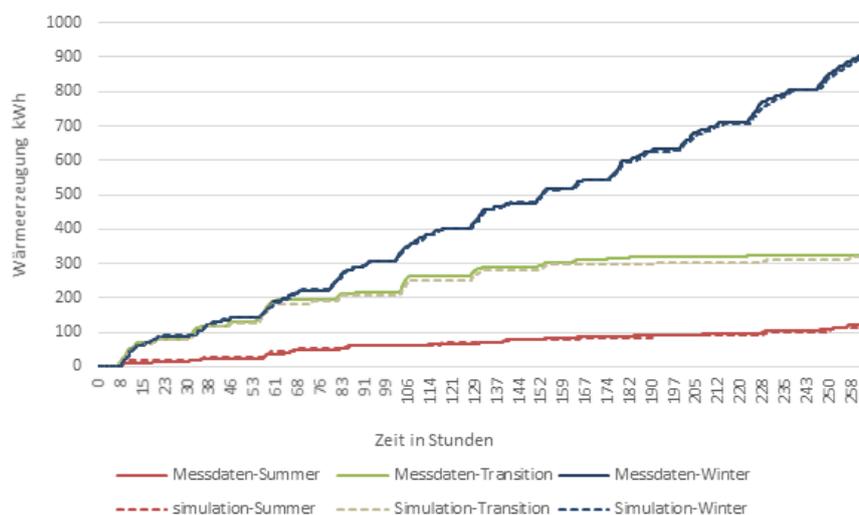


Abbildung 6.2 Kumulierte Wärmeerzeugung der KWK-Anlage in Messung und Simulation

Ferner ist zu erkennen, dass die Wärmeerzeugung zwischen Simulation und Messung in allen drei betrachteten Zeiträumen weitestgehend identisch ist. Die größte Abweichung tritt hier im Übergangszeitraum auf, wie es auch schon bei der Betrachtung der absoluten Wärmemenge der Fall war. Abschließend ist festzuhalten, dass das Modell der Realität in Bezug auf Wärmeproduktion ausreichend gut entspricht.

Weiterhin ist das KWK-Systemmodell mit Batterie zu validieren. Die Modellvalidierung wurde anhand der in F. 6.2 dargestellten Bilanzgleichung durchgeführt, welche in dem Stromverbrauch des Objektes ( $E_{HH}^{Verbrauch}$ ) resultiert. Dieser wird bilanziell ermittelt aus der KWK Stromerzeugung ( $E_{KWK}^{Erz}$ ), dem Netzbezug ( $E_{HH}^{Bezug}$ ), der Entladung der Batterie ( $E_{Bat}^{DC}$ ), der Einspeisung ins Stromnetz ( $E_{HH}^{Einspeisung}$ ), der Beladung der Batterie ( $E_{Bat}^{CH}$ ) sowie dem unterschied des Ladezustandes der Batterie ( $\Delta E_{Bat}^{SoC}$ ).

$$E_{HH}^{Verbrauch} = E_{KWK}^{Erz} + E_{HH}^{Bezug} + E_{Bat}^{DC} - E_{HH}^{Einspeisung} - E_{Bat}^{CH} - \Delta E_{Bat}^{SoC} \quad \text{F. 6.2}$$

Die Unterschiede zwischen Messung und Simulation sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Hierbei tritt eine Fehlerspanne zwischen -0,42 % und -4,38% auf.

Tabelle 6.4: Bilanzieller Vergleich zwischen Simulation und Messstand aller Wochen

	24.01.2019	05.02.2019	03.03.2019	03.04.2019	03.05.2019	03.06.2019	03.07.2019
	31.01.2019	12.02.2019	10.03.2019	10.04.2019	10.05.2019	10.03.2019	10.07.2019
Simulation in kWh	35,90	53,64	50,18	59,30	73,80	55,47	82,28
Messstand in kWh	36,05	55,29	52,48	61,57	76,77	57,76	84,55
Abweichung in %	-0,42	-2,99	-4,38	-3,69	-3,87	-3,96	-2,69

Die größte Abweichung zwischen der Simulation und dem Messstand liegt bei 4,38 %. Diese Abweichung kann auf die folgenden Faktoren zurückgeführt werden:

- Fehlerspanne im thermischen Modell
- Getroffene Annahmen zur Ermittlung des Trinkwarmwassermodells
- Getroffene Annahmen zur Ermittlung der thermischen Speicherverluste im Pufferspeichermodell
- Getroffene Annahmen zur Ermittlung der Be- und Entladeverluste im Batteriespeichermodell
- Abweichung in Teillastwirkungsgraden in Messung und Simulation

Die Fehlerspanne wird für die folgenden Analysen als ausreichend genau betrachtet.

### 6.1.3 Modellbezogene Bewertungsaspekte und Ergebnisse der Simulation

Für eine detaillierte Analyse des Betriebsverhaltens der im Projekt eingesetzten KWK-Systeme und Batterien werden die installierten Systeme unter verschiedenen Gesichtspunkten untersucht. Hierbei wurden 96 Jahressimulationen pro Betriebsart durchgeführt, um die folgenden Aspekte zu untersuchen:

- Wärmegeführte und stromorientierte Betriebsweise
- Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad ohne und mit Batterie
- Lebensdauer, SOH (engl. State Of Health) der Batterie nach einem Jahr
- Netzparität
- Gesamtenergetische Abdeckung

Für jeden bewerteten Parameter wird in diesem Bericht ein exemplarisches Simulationsergebnis für ein ausgewähltes Objektmodell präsentiert. Die Eckdaten des Objektes (Objekt 1) wurden in Tabelle 6.1 dargestellt. Eine Beschreibung der Eigenverbrauchsquote und dem Autarkiegrad ist Kapitel 7.4 zu entnehmen. Die Lebensdauer SOH (engl. State Of Health) der Batterie ist ein Parameter, welcher den Verlust an Nutzkapazität bezogen auf den Neuzustand der Batterie angibt. Dieser wird genutzt, um den Zeitpunkt einer anfallenden Ersatzinvestition festzustellen, um die Batterie weiter zu betreiben. Weiterhin muss die Reduktion an Nutzkapazität

bei Simulationen über längere Zeiträume berücksichtigt werden, um die Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern korrekt abzubilden. Ein Überblick über unterschiedliche Ansätze zur SOH Bestimmung ist in [47] gegeben. Die Bestimmung des SOH der Batterie wird im Modell über ein Zyklenzahl-Modell abgebildet. Hierbei wird die vom Hersteller angegebene Zyklenzahl bis zum EoL (End of life = Lebensende) der Batterie mit durch Batterie Be- und Entladung erreichten Zyklen abgeglichen und direkt auf die Nutzkapazität der Batterie bezogen. Ferner wird die benötigte theoretische Anzahl an Volllaststunden bestimmt, welche erreicht werden müsste, um Netzparität zu erreichen. Netzparität gilt üblicherweise als erreicht, wenn die Stromgestehungskosten von dezentralen Versorgungssystemen, denen der öffentlichen Versorgung entsprechen.

Die Kennzahl gibt somit Auskunft darüber, ab wie vielen Betriebsstunden, der Betrieb der Anlage wirtschaftlich ist. Hierzu wurden sämtliche Kosten und Erlöse auf den aktuellen Strompreis und der elektrischen Nennleistung der Anlage bezogen. Eine geringe Anzahl an Volllaststunden bei der Netzparität weist auf eine gute Wirtschaftlichkeit hin.

### **Simulationsergebnisse – Eigenverbrauchsquote (EVQ) und Autarkiegrad**

Die Ergebnisse zeigen, dass die EVQ beim Einsatz einer Batterie deutlich erhöht wird, dargestellt in Abbildung 6.3. Die EVQ ist bei allen Technologien bei stromgeführter Betriebsweise höher, als wenn sie wärmegeführt betrieben werden. Zwar ist die EVQ bei PEMFC-Anlagen hoch, aber der Unterschied in beiden Betriebsweisen am geringsten. Die Begründung liegt an dem konstanten Betriebsverhalten der PEMFC-Anlagen und geringerer elektrischer Leistung. Je nach Hersteller tritt weiterhin eine Regenerationsphase nach festgelegter Betriebszeit auf. Ist diese erreicht, wird die PEMFC-Anlage eine gewisse Zeit ausgeschaltet. Somit lassen sich die PEMFC-Anlagen weniger in ihrer Betriebsweise beeinflussen als motorische KWK-Anlagen. Im Fall des SOFC-Systems ist die Eigenverbrauchsquote niedrig. Es zeigt sich eine deutliche Steigerung, wenn das System mit einer Batterie gekoppelt wird. Diese verhält sich je nach KWK-Betriebsart unterschiedlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die SOFC-Anlagen mit größerer elektrischer Leistung und einen großen Anteil davon eingespeist. Dies verringert schließlich die Eigenverbrauchsquote, weil diese aus der Differenz zwischen der elektrischen Erzeugung und Einspeisung berechnet wird, wie bei der SOFC3-Anlage. Es ist auch zu erkennen, dass die Eigenverbrauchsquote mit der Lithium-Batterie in allen Fällen größer ist als bei der Blei-Batterie.

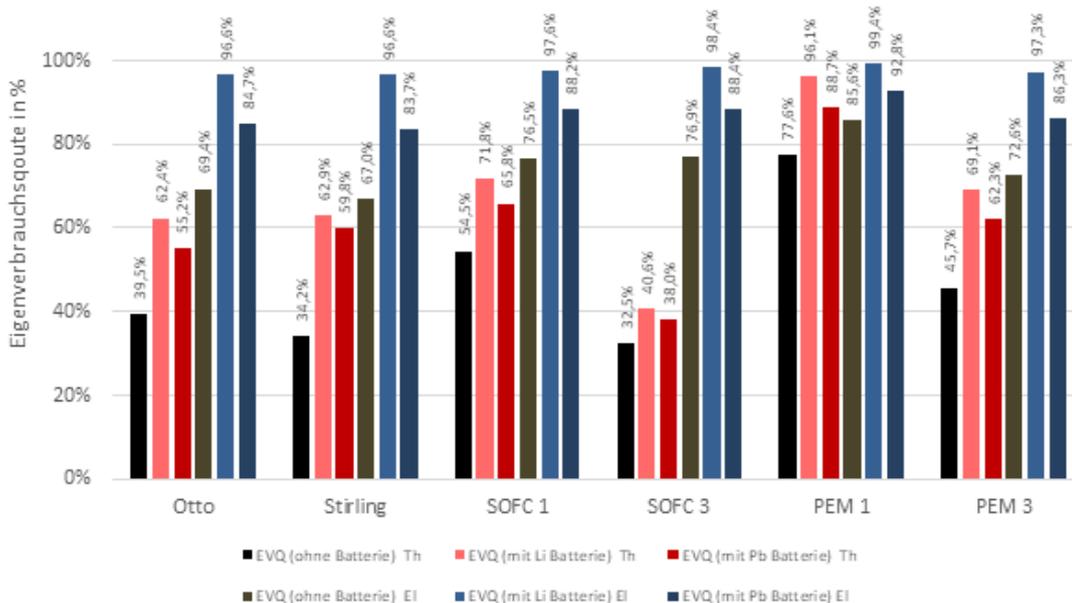


Abbildung 6.3 Exemplarische Darstellung für die bestimmten Eigenverbrauchsquoten für Anlagen, welche ohne und mit Batterie sowie wärmegeführt oder stromorientiert betrieben werden.

Die Tabelle 6.5 zeigt die Simulationsergebnisse der Eigenverbrauchsquoten in Abhängigkeit des Wärmebedarfs und der unterschiedlichen KWK-/Batterie-Systeme. Die KWK-Systeme werden hierbei alle wärmegeführt betrieben.

Tabelle 6.5: Tabellarische Übersicht der Eigenverbrauchsquoten der betrachteten Referenz-KWK-Systeme

	Eigenverbrauchsquoten in %															
	Lithiumbatterie								Bleibatterie							
PEM 3	69,0	72,4	70,7	52,4	71,4	72,6	67,9	99,8	62,3	64,7	61,7	46,0	68,6	65,2	58,7	97,0
PEM 1	96,1	97,3	97,4	92,7	96,4	96,2	96,4	100	88,7	89,7	87,9	81,7	92,0	90,3	88,5	99,9
SOFC 3	40,5	37,0	35,5	25,2	40,4	37,9	36,8	91,0	38,0	35,5	33,4	24,5	39,1	35,7	35,0	82,5
SOFC 1	71,8	70,7	67,5	68,9	72,9	71,6	63,5	99,7	65,8	64,9	60,7	47,7	71,4	66,0	57,7	97,4
Stirling	62,9	66,8	63,7	49,5	64,8	63,3	53,6	99,1	59,8	63,2	58,4	46,3	60,5	61,7	51,6	95,4
Otto	62,3	63,4	60,4	47,2	63,7	66,5	59,7	99,4	55,2	55,3	52,6	41,2	60,5	58,9	50,4	95,4
Wärmebedarf in kWh	≤16.000	≤18.000	≤19.000	≤20.000	≤24.000	≤32.000	≤39.000	≤53.000	≤16.000	≤18.000	≤19.000	≤20.000	≤24.000	≤32.000	≤39.000	≤53.000

Der Autarkiegrad konnte durch die Kombination mit einem Batteriespeicher deutlich erhöht werden. Die erreichten Steigerungen, welche durch den Einsatz einer Batterie sowie den

Wechsel zu einer stromorientierten Betriebsweise erreicht werden konnten, sind in Abbildung 6.4 quantifiziert.

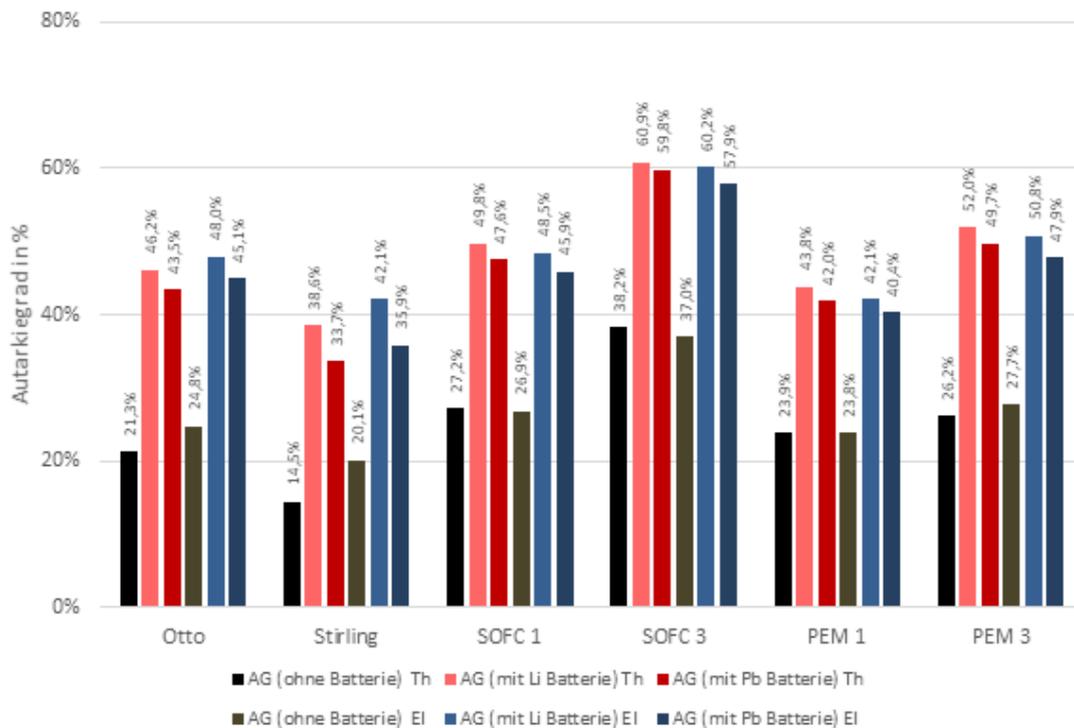


Abbildung 6.4 Exemplarische Darstellung über erreichbare Autarkiegrade für wärmegeführten und stromorientierten Betrieb von KWK-Anlagen mit und ohne Batterie.

Tabelle 6.6 zeigt die Simulationsergebnisse des Autarkiegrades in Abhängigkeit des Wärmebedarfs und der unterschiedlichen KWK-/Batterie-Systeme.

Tabelle 6.6: Tabellarische Übersicht des Autarkiegrades der betrachteten Referenz-KWK-Systeme

	Autarkiegrad in %															
	Lithiumbatterie								Bleibatterie							
PEM 3	52,0	58,3	65,4	69,2	65,1	67,3	70,3	45,9	49,7	55,6	62,7	69,2	64,3	65,2	67,5	45,3
PEM 1	43,8	45,4	51,1	63,5	42,5	48,6	59,5	20,4	41,9	43,3	48,6	63,5	41,3	46,9	57,7	20,4
SOFC 3	60,9	68,5	73,9	83,1	75,6	83,0	83,3	76,2	59,8	67,8	73,2	83,1	75,3	83,6	83,0	75,2
SOFC 1	49,8	59,8	66,3	89,4	69,3	72,6	76,7	47,1	47,6	57,6	64,5	74,9	69,0	71,3	75,2	46,5
Stirling	38,6	48,9	52,1	58,8	52,8	58,4	58,5	47,9	33,7	42,5	45,8	53,4	49,0	53,1	53,2	40,9
Otto	46,2	56,4	60,2	67,0	60,5	65,5	62,8	49,1	43,5	52,9	57,2	64,4	59,5	62,9	59,0	48,1
Wärmebedarf in kWh	≤16.000	≤18.000	≤19.000	≤20.000	≤24.000	≤32.000	≤39.000	≤53.000	≤16.000	≤18.000	≤19.000	≤20.000	≤24.000	≤32.000	≤39.000	≤53.000

## Simulationsergebnisse - State of Health

Weiterhin wird der der SOH der Batterie mit unterschiedlichen KWK-Technologien nach einem Jahr betrachtet. Der SOH der Batterie zeigt die verbleibende Nutzkapazität der Batterie nach einem simulierten Betriebsjahr an. Abbildung 6.5 quantifiziert den SOH der Batterie bei wärmegeführter und stromorientierter Betriebsweise der Batterie.

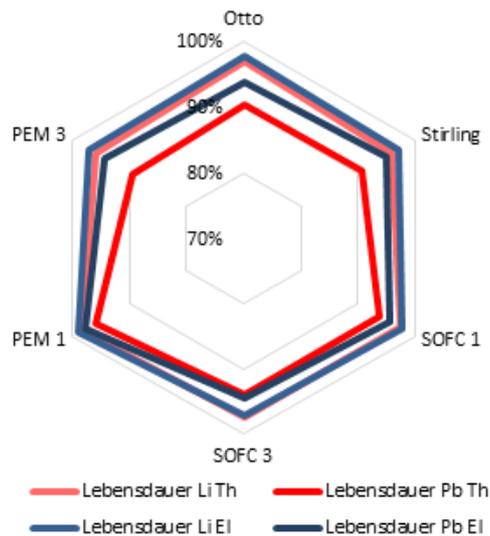


Abbildung 6.5 Exemplarische Darstellung der SOH der simulierten Batterien nach einem Betriebsjahr mit unterschiedlichen KWK-Technologien und Betriebsarten

Besonders stark ist die Reduktion der Nutzkapazität für die dargestellte Bleibatterien für wärmegeführte Betriebsweise. Auch für eine Bleibatterie mit stromorientiert betriebenen KWK-Anlagen tritt ein verhältnismäßig hoher Verlust an Nutzkapazität auf. Der SOH nach einem Betriebsjahr fällt für die lithium-basierten Batterien deutlich höher. Dies gilt für beiden Betriebsarten.

## Simulationsergebnisse - Netzparität

Im Folgenden wird betrachtet, ob die simulierten Systeme die Netzparität im Betrieb erreichen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die KWK-Systeme ohne Batterie wirtschaftlicher sind als KWK-Systeme, welche um eine Batterie erweitert wurden. Durch den Einsatz von Batterien sind die Anlagenkosten, Installationskosten bzw. Stromgestehungskosten um einen Betrag gestiegen, der durch die Batterien nicht erwirtschaftet werden kann. Die einzige KWK-Anlage, die trotz der Batterieausrüstung eine Wirtschaftlichkeit aufweist, ist die SOFC3-Anlage. Dieses Verhalten ist in beiden Betriebsarten ähnlich.

Abbildung 6.6 stellen die zu erreichenden der Netzkapazität nötigen Betriebsstunden der KWK-Anlagen dar. Vergleicht man den Betrieb mit lithium- und bleibasierten Batteriespeichern ergeben sich ähnlich hohe Paritätsbetriebsstunden. Dies ist damit zu begründen, dass die Bleibatterien in der Anschaffung günstiger sind, jedoch häufiger eine Ersatzinvestition getätigt werden muss.

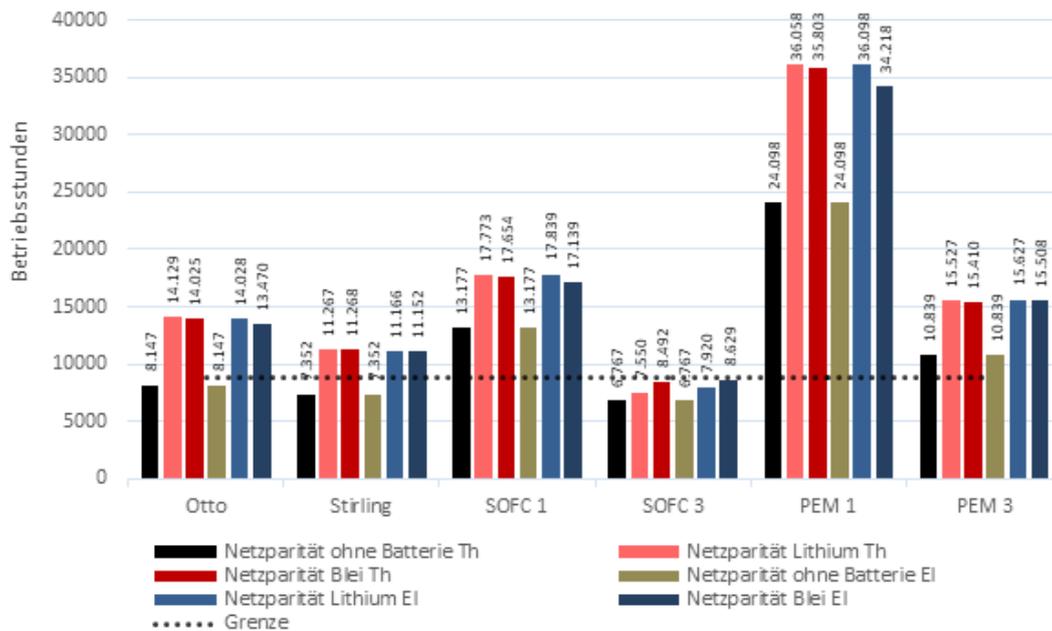


Abbildung 6.6 Exemplarische Darstellung über nötige Betriebsstunden zum Erreichen einer Netzparität unterschiedlicher KWK-Technologien für wärmegeführte und stromorientierte Betriebsweise sowie den Betrieb mit und ohne Batterie.

## 6.2 Entwicklung einer Methodik zur Generierung synthetischer Wärme- und Stromlastprofile unter Berücksichtigung des Einflusses der Bewohner auf die Energiebedarfe

Für eine Analyse der Wechselwirkungen zwischen KWK-Anlagen und elektrischen Speichern ist die Kenntnis über die zeitlich aufgelösten Energiebedarfe in Wohngebäuden notwendig. Gängige Summenlastprofile wie Standardlastprofile (SLP) werden durch eine Mittelung der Bedarfe einer Vielzahl an Haushalten erzeugt. Lastspitzen oder Zeiträume ohne Verbrauch werden dabei herausgefiltert, deshalb sind diese für eine detaillierte Betrachtung der Wechselwirkungen innerhalb eines Haushaltes nicht geeignet. Um auch Quartiere bewerten zu können, in denen keine detaillierten Messdaten zu den einzelnen Gebäuden vorliegen, werden hochaufgelöste synthetische Lastprofile benötigt. Hierzu wurde eine Methodik zur Generierung synthetischer Lastprofile entwickelt, bei dem der Einfluss des Bewohnerverhaltens auf die Energiebedarfe berücksichtigt wird.

Bei der Betrachtung von sektorenübergreifenden Technologien ist zudem ein konsistenter Datensatz, welcher sowohl Strom- als auch passende Wärmedaten umfasst, wichtig. Dabei sind beliebige Kombinationen von Bewohnerprofilen mit unterschiedlichsten Gebäudecharakteristiken denkbar. Statt eine begrenzte Anzahl von Profilen zu generieren, wurde im Rahmen des Projektes daher der Fokus darauf gelegt eine Methodik zu schaffen, mit der später für beliebige Szenarien und Quartiere Strom- und Wärmedaten erzeugt werden können.

Zur Abbildung des Bewohnerverhaltens wurden geeignete Markov-Ketten mittels Markov-Monte-Carlo-Simulation erzeugt. Zunächst wurden dabei Ketten zur Bestimmung der Anwe-

senheit der Bewohner erzeugt. Für Zeitbereiche, in denen die Bewohner anwesend sind, wurden weitere Ketten bestimmt, welche die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen unterschiedlichen Tätigkeiten beinhalten. Anhand dieser Ketten lassen sich unter Berücksichtigung der vorhandenen Haushaltsgeräte und deren Verbrauchscharakteristik Stromprofile generieren.

Anhand der Anwesenheitsprofile können detailliertere Gebäudesimulationen durchgeführt werden. So können die Zeitreihen z.B. zu einer genaueren Abbildung des Lüftungsverhaltens der Bewohner verwendet werden, indem nur bei Anwesenheit mindestens einer Person ein Luftaustausch mit der Außenluft angenommen wird. Zudem können die Solltemperatur der Räumlichkeiten in Gebäudesimulationen in Abhängigkeit der Anwesenheit der Bewohner angepasst werden. Gerade im Hinblick auf eine zunehmende Verbreitung von SmartHome-Systemen, ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Anwesenheit auf den Wärmebedarf in Wohngebäuden für zukünftige Analysen zunehmen wird.

Mit dieser Methodik passt das Anwesenheitsprofil immer zum zugehörigen Stromprofil. Somit lassen sich konsistente Datensätze für Strom- und Wärmebedarfe für beliebige Quartiere erzeugen.

### 6.2.1 Erzeugung der Anwesenheits- und Verhaltensprofile

Die Strom- und Anwesenheitsprofile werden mittels Markov-Monte-Carlo-Simulation erzeugt. Markov-Ketten beschreiben die Wahrscheinlichkeiten für den Wechsel zwischen verschiedenen Zuständen.

Bei einem Markov-Prozess 1. Ordnung hängt der Wechsel einen Zustand  $Z(t+1)$  nicht vom vorherigen Zustand  $Z(t-1)$  oder weiter zurückliegenden Zuständen ab, sondern nur vom aktuellen Zustand  $Z(t)$ .

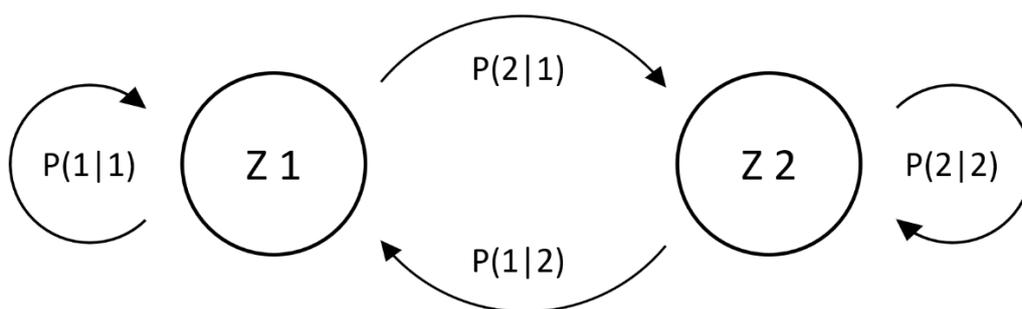


Abbildung 6.7: Schematische Darstellung einer Markov-Kette mit den Übergangswahrscheinlichkeiten  $P$  zwischen zwei Zuständen  $Z1$  und  $Z2$

Die Wahrscheinlichkeit für einen Wechsel zwischen einem Zustand  $Z1$  in einen Zustand  $Z2$  kann dabei durch die Übergangswahrscheinlichkeit  $P(2|1)$  beschrieben werden (vgl. Abbildung 6.7). Analog können auch Ketten für komplexere Systeme mit deutlich mehr unterschiedlichen Zuständen abgebildet werden. Dieser stochastische Prozess kann genutzt werden, um zeitliche Trajektorien von Vorgängen zu erzeugen. Anhand von vorhandenen Daten

(Messdaten, Statistiken, o.ä.) lassen sich die Matrizen der Übergangswahrscheinlichkeiten bilden. Führt man anschließend eine Simulation durch, in der in jedem Zeitschritt der nächste Zustand in Abhängigkeit des aktuellen Zustandes und unter Berücksichtigung der Übergangswahrscheinlichkeit zufällig bestimmt wird, erhält man zufällige Profile. Diese sind einerseits individuell unterschiedlich, während andererseits der zeitliche Verlauf des Mittelwerts einer großen Anzahl an Profilen wieder das ursprünglich zugrunde gelegte Verhalten der ausgewerteten Daten widerspiegelt.

Die Methodik zur Generierung der Lastprofile im Rahmen dieses Projektes beruht auf solchen Markov-Ketten. Grundlage für die Erzeugung der benötigten Markov-Ketten bilden die Scientific Use Files der Erhebung zur Zeitverwendung 2012/2013 [48]. Diese Erhebung beinhaltet Befragungen von Bewohnern zu ihrem Verhalten. Durch eine Auswertung der Daten konnten die benötigten Markov-Ketten erzeugt werden. Das Verhalten von Personen ist zeitinhomogen. So ist z.B. die Wahrscheinlichkeit früh morgens das Haus zu verlassen an Werktagen höher als am Wochenende. Daher wurden jeweils separate Ketten, aufgeteilt nach Jahreszeit (Winter/Sommer), Typtag (Wochentag, Samstag, Sonntag) und Arbeitsverhältnis, unter Berücksichtigung der Uhrzeit erzeugt. Feiertage werden dabei als Sonntage berücksichtigt.

Die erzeugten Ketten basieren nur auf Einpersonenhaushalten. Da die statistische Relevanz für die Erzeugung von Ketten für Haushalte mit mehr Personen nicht ausreicht, wird für Mehrpersonenhaushalte eine auf den Einpersonenhaushalten beruhende Methodik gewählt. Eine genauere Beschreibung der Änderungen an der Methodik für Mehrpersonenhaushalte findet sich im Abschnitt 6.2.3.

Für die Erzeugung der Anwesenheitsprofile werden Markov-Ketten benötigt, die die Wahrscheinlichkeiten für den Wechsel zwischen An- und Abwesenheit beschreiben. Uneindeutige Angaben der Befragten wurden durch Auswertung weiterer Angaben zu den Tätigkeiten (z.B. Spazieren oder Radfahren) korrigiert.

Für die Verhaltensprofile bilden die Markov-Ketten die Übergänge zwischen den energetisch relevanten Beschäftigungen ab.

Es werden elf Beschäftigungshauptgruppen unterschieden. Diese setzen sich aus den Kategorien „Schlafen“, „nicht elektrisch (ohne Schlafen)“ und neun Beschäftigungshauptgruppen, bei denen ein elektrischer Stromverbrauch vorliegen kann (Spülen, Bügeln, Musik hören, sich waschen und anziehen, Putzen, Verwendung von Computer/Smartphone, Mahlzeiten zubereiten, Wäsche waschen und Fernsehen), zusammen. Die Beschäftigungshauptgruppen sind für Haupt- und Nebenbeschäftigungen gleich.

Es wird angenommen, dass jeder Bewohner, wenn er anwesend ist und nicht schläft, zeitgleich einer Haupt- und einer Nebenbeschäftigung aus den Beschäftigungshauptgruppen nachgehen kann. Bei der Erzeugung der Markov-Ketten für die Hauptbeschäftigung wurden nur die Zeitschritte in der Befragung ausgewertet, in denen kein Wechsel zwischen An- und Abwesenheit erfolgt. Zur Bestimmung der Hauptbeschäftigung bei Wechsel von ab- in anwesend wurde

eine Trajektorie erstellt, die die Wahrscheinlichkeiten für das Ergreifen der einzelnen Hauptbeschäftigungen unter Berücksichtigung von Jahreszeit, Typtag und Arbeitsverhältnis der Person beinhaltet.

Analog wird bei den Nebenbeschäftigungen vorgegangen. Hier ist eine Bestimmung einer neuen „Startbeschäftigung“ sowohl bei einem Wechsel zu anwesend als auch bei jedem Wechsel der Hauptbeschäftigung notwendig. Entsprechend erfolgte die Bestimmung der Verteilung neben den übrigen Einflussfaktoren auch in Abhängigkeit der jeweiligen Hauptbeschäftigung.

Die Erzeugung der Profile erfolgt sequenziell. Zunächst wird die Anwesenheitstrajektorie des Haushaltes bestimmt. Die Anwesenheit für den ersten Zeitschritt wird zufällig anhand der Verteilungen aus der Zeitverwendungserhebung bestimmt. Dabei beziehen sich die Startwerte immer auf 4 Uhr morgens (erster Zeitpunkt eines Tages in der Befragung). Des Weiteren wird nur der Typtag unterschieden, für einen Sonntag liegt die Wahrscheinlichkeit anwesend zu sein z.B. bei etwa 87,6 %. Die Anwesenheit für alle weiteren Zeitschritte wird anhand der Wechselwahrscheinlichkeiten aus der für den Tag und Haushalt gültigen Markov-Kette bestimmt. Welche Markov-Kette benötigt wird ergibt sich, wie oben beschrieben, aus dem Beschäftigungsverhältnis des Bewohners, der Jahreszeit und dem Typtag.

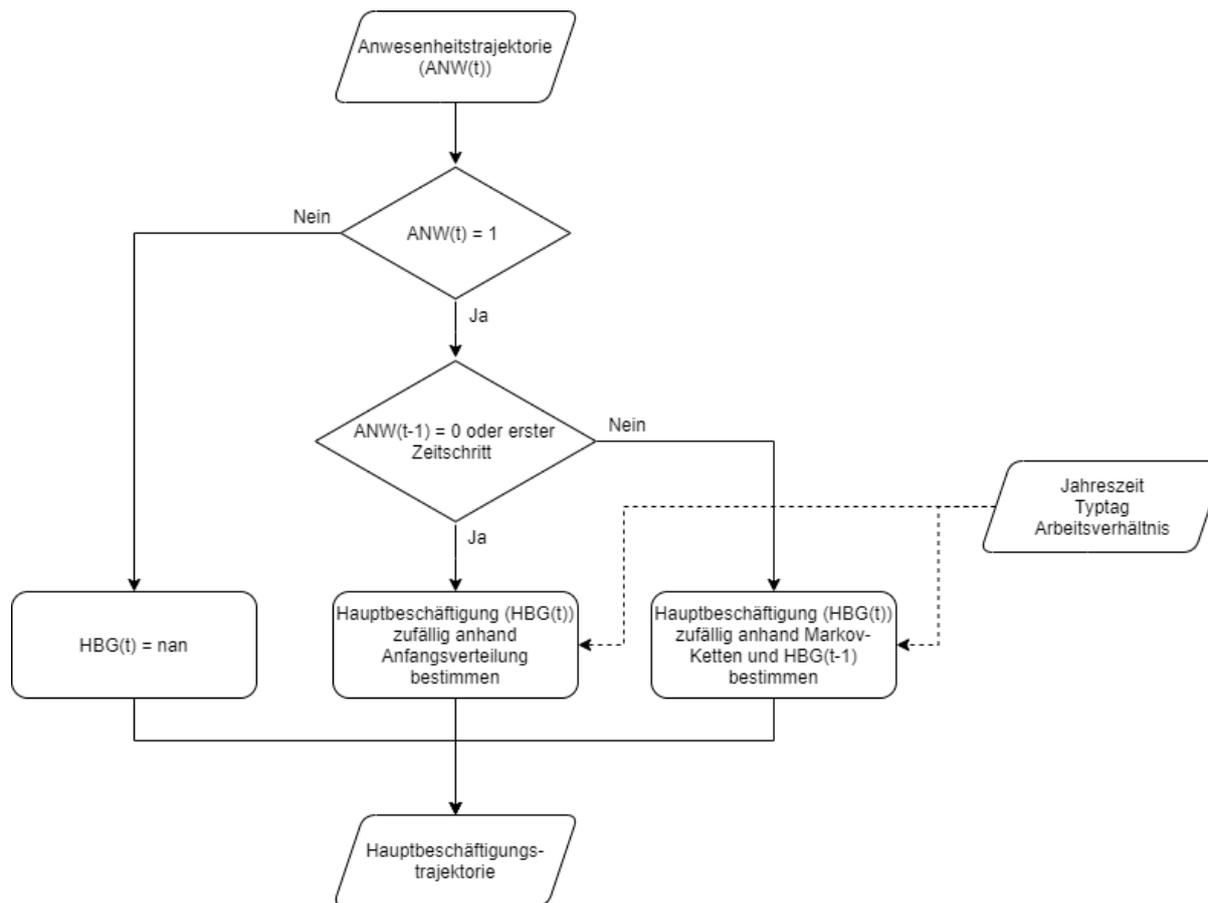


Abbildung 6.8: Vereinfachtes Ablaufdiagramm der Erzeugung der Hauptbeschäftigungstrajektorie für einen Zeitschritt

Anhand der Anwesenheitstrajektorie kann dann die Hauptbeschäftigung für jeden Zeitschritt bestimmt werden. Abbildung 6.8 zeigt einen vereinfachten Ablaufplan der Erzeugung eines Profils für die Hauptbeschäftigung. Die Erzeugung der Hauptbeschäftigungstrajektorie erfolgt analog zur Anwesenheitstrajektorie. Allerdings wird hier in jedem Zeitraum die Anwesenheit geprüft. Ist der Bewohner abwesend, wird keine Hauptbeschäftigung ausgeführt. Für jeden Wechsel von ab- zu anwesend ist erneut eine Initialisierung der Hauptbeschäftigung anhand der Trajektorie mit den Wahrscheinlichkeiten für das Ergreifen der Beschäftigungen notwendig.

Die Erzeugung der Nebenbeschäftigungen erfolgt anhand der Hauptbeschäftigungstrajektorie. Dabei findet bei jedem Wechsel der Hauptbeschäftigung eine erneute Initialisierung der Nebenbeschäftigung unabhängig vom direkt vorhergehenden Zustand statt. Anders als bei der Anwesenheit und der Hauptbeschäftigung hängen hier sowohl die Markov-Ketten als auch die Anfangsverteilungen nicht vom Typtag ab. Dafür hängen sowohl die Wahrscheinlichkeiten für die Nebenbeschäftigungen bei der Initialisierung als auch die Übergangswahrscheinlichkeiten in den Markov-Ketten von der aktuellen Hauptbeschäftigung ab.

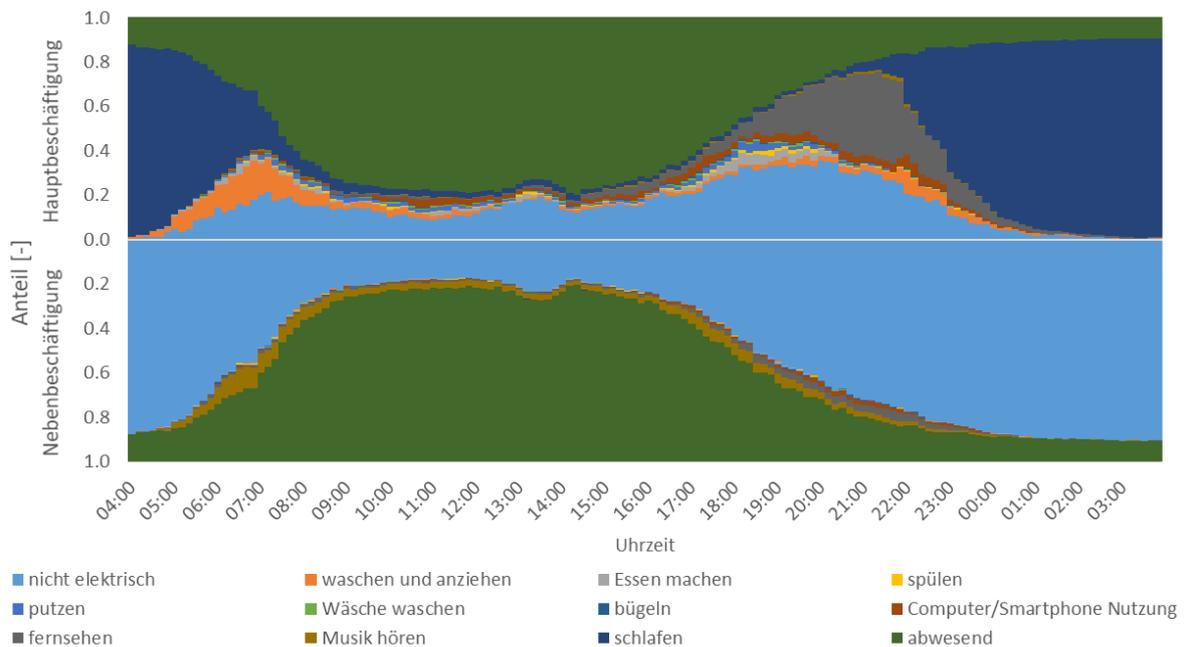


Abbildung 6.9: Anteile für die unterschiedlichen Hauptbeschäftigungen (oben) und Nebenbeschäftigungen (unten) aus der Simulation für einen Werktag im Sommer einer erwerbstätigen Person; Mittelung über 50.000 simulierte Trajektorien mit einer Auflösung von 10 Minuten

In Abbildung 6.9 sind beispielhaft die Anteile an den unterschiedlichen Beschäftigungsgruppen für einen Haushalt mit einer erwerbstätigen Person an einen Werktag im Sommer dargestellt. Für den Tag wurden 50.000 Trajektorien simuliert und aus diesen die Anteile der Beschäftigungsgruppen bestimmt. Da im Falle einer Abwesenheit weder die Haupt- noch die Nebenbeschäftigung bestimmt werden, sind diese Anteile für die Abwesenheit im oberen und unteren Teil der Darstellung identisch. Nachts steigt der Anteil der Hauptbeschäftigung „Schlafen“ wie erwartet an. Auch der abendliche Peak im Hinblick auf die Tätigkeit „Essen machen“ wirkt für eine berufstätige Person realistisch.

Bei der Bewertung und Verwendung der Profile ist zu beachten, dass das Modell nur eine statistische Abbildung der Realität darstellt. Entsprechend kann es nur so gut sein, wie die zugrunde liegenden Daten. Aufgrund des manuellen Ausfüllens der Fragebögen, ist davon auszugehen, dass die Fragebögen fehlerbehaftet sind. Insbesondere sehr kurz ausgeführte Tätigkeiten wurden möglicherweise nicht vollständig erfasst, sodass diese potenziell unterrepräsentiert sind.

## 6.2.2 Ableitung von Stromprofilen anhand der Verhaltensprofile

Die Definition der Beschäftigungen aus Abschnitt 6.2.1 gibt nicht explizit vor welche Geräte genutzt werden. Während eine Tätigkeit ausgeführt wird können ein oder mehrere Geräte mit unterschiedlichen energetischen Verbrauchsprofilen genutzt werden. So kann eine Mahlzeit zubereiten z.B. aus dem Schneiden von Gemüse (nicht energetisch) gefolgt vom Kochen oder Braten des Gemüses bestehen (Verwendung einer oder mehrerer Herdplatten). Auch der Ausstattungsgrad der Wohnung (Anzahl und Art der vorhandenen Geräte und Einrichtungsgegenstände) hat einen Einfluss auf den Stromverbrauch. Um aus den Verhaltensprofilen zeitlich

aufgelöste Stromverbrauchsprofile abzuleiten ist daher zunächst die Definition der möglichen Ausstattungsgrade notwendig. Im Rahmen dieses Projektes wird nach [49] zwischen niedriger, mittlerer und hoher Ausstattung unterschieden. Die Definition nach [49] wurde dazu leicht angepasst. Eine Tabelle der berücksichtigten Geräte inkl. ihrer Zuordnung zu den möglichen Ausstattungsgraden findet sich im Anhang 7. Die Geräte wurden den verschiedenen Beschäftigungsgruppen zugordnet. Hierbei müssen auch Geräte identifiziert werden, die unabhängig vom Verhalten und der Anwesenheit der Bewohner einen Stromverbrauch aufweisen, wie z.B. Kühlschränke.

Für jeden Verbraucher ist ein Energieverbrauch bzw. eine Stromverbrauchssequenz festzulegen. Im Rahmen des Projektes bilden hierzu die Arbeiten von [49] und [50] die Basis. Die Profile werden im Rahmen der Kalibrierung angepasst. Als nächstes werden die Wahrscheinlichkeiten für die Nutzung der einzelnen Geräte, bzw. die Durchführung der zugehörigen Prozesse definiert. Hierbei wird die zur Verfügung stehende Zeitspanne berücksichtigt. Ist der Zeitraum für „sich anziehen und waschen“ z.B. nur wenige Minuten lang, ist es wahrscheinlicher, dass die Person nur ein Waschbecken nutzt und kein Vollbad nimmt. Für Prozesse mit gleicher Dauer werden zunächst äquivalente Wahrscheinlichkeiten gewählt.

Strombedarfe für elektrisches Licht werden gesondert in Abhängigkeit des Sonnenstandes berechnet. Es wird angenommen, dass Licht nur zwischen Sonnenuntergang und Sonnenaufgang benötigt wird, mit Ausnahme des Lichtes im Badezimmer. Während der Beschäftigung „Schlafen“ wird kein Strombedarf für Beleuchtung berücksichtigt.

### **Kalibrierung**

Ziel der Kalibrierung ist es, dass der Jahresdurchschnitt des Stromverbrauches der Haushalte mit der Realität übereinstimmt. Durch die begrenzte Anzahl an Geräten und Nutzungssequenzen ist ein Fehler bei den absoluten Werten des Stromverbrauches zu erwarten. Auch die in erster Instanz getroffenen Annahmen für die Wahrscheinlichkeiten für die Durchführung der unterschiedlichen Prozesse beruhen auf groben Abschätzungen und führen somit zu Abweichungen von einem realen Verbrauch. In [51] finden sich Angaben für den durchschnittlichen Jahresstromverbrauch aufgeschlüsselt nach Haushaltsgrößen. Zudem sind dort Angaben zu finden, wie sich der Jahresstromverbrauch auf unterschiedliche Verbrauchsbereiche, wie Warmwasser, Licht oder TV/Audio, verteilt. Die Prozesse des Strommodells lassen sich diesen Verbrauchsbereichen zuordnen. Da in der Arbeit von [49] auf der die Erstellung des Strommodells beruht, kein Äquivalent zur Umwälzpumpe vorkommt, wird diese aus den Anteilen für die Kalibrierung und den Vergleich herausgerechnet.

Die Kalibrierung des Strommodells erfolgt anhand der Werte aus [51] in zwei Schritten. Zunächst werden die Wahrscheinlichkeiten für die Durchführung der unterschiedlichen Verbraucher/Prozesse angepasst. Bei zu hohen Verbräuchen wird die Wahrscheinlichkeit für energieärmere Verbraucher erhöht und die für energieintensive Verbraucher verringert. Bei zu geringen Verbräuchen im jeweiligen Bereich entsprechend umgekehrt. Im zweiten Schritt wird zusätzlich noch die mittlere Leistung der Geräte angepasst, sodass die Abweichungen der

Anteile am Gesamtverbrauch zu den Angaben aus [51] minimiert werden. Die größte bleibende Abweichung ergibt sich für Haushalte mit fünf oder mehr Personen für den Bereich Kochen mit 6,05 Prozentpunkten. Die bleibenden Abweichungen nach der Kalibrierung lassen sich u.a. dadurch erklären, dass die Befragung zum Bewohnerverhalten [48], auf dem die Verhaltensprofile beruhen, von 2011 stammt, während die Kalibrierung sich auf Werte von 2015 bezieht. Hier sind Änderungen in Bezug auf Verhalten, aber auch in Bezug auf die Geräteausstattung der Haushalte möglich. Zudem kann im Modell nur eine geringe Geräteauswahl betrachtet werden, während in Realität die Variabilität der möglichen Verbraucher deutlich höher ist.

Bezogen auf den durchschnittlichen Jahresstromverbrauch kann dennoch eine Abweichung für alle Haushaltsgrößen von unter 5 % erreicht werden. In Tabelle 6.7 sind die Jahresstromverbräuche aus [51] mit herausgerechnetem Verbrauch der Umwälzpumpe im Vergleich zu den resultierenden durchschnittlichen Ist-Werten aus dem Strommodell dargestellt.

Tabelle 6.7: Vergleich der Jahresstromverbräuche (Soll) aus [51] mit den Ist-Werten des kalibrierten Modells für verschiedene Haushaltsgrößen

Haushaltsgröße	Jahresstromverbrauch Soll (ohne Umwälzpumpe) in kWh	Jahresstromverbrauch Modell (kalibriert) in kWh	Differenz in %
1	2757	2683	-2,7
2	3666	3552	-3,1
3	4862	4578	-1,7
4	5893	5756	-2,3
5	6980	7125	+2,1

Für Quartiere, in denen die Ausstattung stark von der angenommenen Ausstattung abweicht oder für die genauere Informationen zu den Verbräuchen bezogen auf die verschiedenen Bereiche vorliegen, ist für die Generierung von Stromprofilen mit absoluten Verbrauchswerten ggf. eine erneute Kalibrierung sinnvoll.

### 6.2.3 Besonderheiten bei der Betrachtung von Mehrpersonenhaushalten

Zur Generierung der synthetischen Bedarfsprofile für Mehrpersonenhaushalte wird aufgrund der zu geringen statistischen Relevanz der Datengrundlage nicht exakt das gleiche Verfahren wie für die Einpersonenhaushalte angewandt. Stattdessen wird die Erzeugung von 1-Personen-Profilen als Basis verwendet und durch geeignete Anpassung der Profile zur Generierung von Profilen für Mehrpersonenhaushalte genutzt.

Zunächst wird eine der Anzahl der Personen im Haushalt entsprechende Anzahl unabhängiger 1-Personen-Bedarfsprofile erzeugt. Für die erste Person eines Haushaltes bleibt dieses Profil unverändert. Für alle weiteren Personen wird für die erzeugten unabhängigen Bedarfsprofile überprüft, ob die gleiche Tätigkeit wie bei der ersten Person bzw. bei allen bereits bestimmten Tätigkeitsprofilen der Personen des gleichen Haushalts vorliegt. Ist dies der Fall wird anhand

einer Wahrscheinlichkeit für die Gleichzeitigkeit entschieden, ob ein gleichzeitiges Ausüben der Tätigkeit in diesem Zeitschritt vorliegt – wenn nicht, wird für die weitere Person eine neue Tätigkeit anhand der Markov-Kette bestimmt. Bei einigen Tätigkeiten ist keine gemeinsame Ausübung vorgesehen. In diesen Fällen wäre die Wahrscheinlichkeit gleich Null. Die Wahrscheinlichkeiten für die Gleichzeitigkeit werden auch aus [48] für die unterschiedlichen Tätigkeiten abgeleitet. Eine Ausnahme bildet die Tätigkeit „Schlafen“. Laut Auswertung der Erhebung [48] wurde „Schlafen“ nur sehr selten gleichzeitig ausgeführt. Dieses Ergebnis erscheint unplausibel und ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf fehler- oder lückenhaft ausgefüllte Fragebögen zurückzuführen. Entsprechend wurde die Wahrscheinlichkeit manuell auf eins gesetzt. Gleichzeitiges „Schlafen“ ist daher in allen Haushalten immer möglich, sofern die Verhaltensprofile der Bewohner dies vorgeben.

In Bezug auf die Nebentätigkeit wird angenommen, dass diese immer gemeinsam ausgeführt werden kann. Hier ergeben sich daher keine Restriktionen hinsichtlich der Gleichzeitigkeit.

Im Modell für den Stromverbrauch wird bei gleichzeitiger Ausführung einer Hauptbeschäftigung kein zusätzlicher Stromverbrauch berücksichtigt. Es wird angenommen, dass in diesen Fällen die Beschäftigung gemeinsam mit demselben Gerät ausgeführt wird. Es ist aber möglich, dass die zweite (oder weitere Personen) die Tätigkeit länger ausführt als die erste Person. Eine Ausnahme bildet die Hauptbeschäftigung „sich waschen“, hier wird zwischen den unterschiedlichen Prozessen unterschieden. Solange diese unterschiedlich sind (z.B. „duschen“ und „Hände waschen“), wird der zusätzliche Verbrauch bis zu einer festgelegten maximalen Leistung berücksichtigt.

Aufgrund der steigenden Gleichzeitigkeit bei begrenzter Anzahl an Geräten innerhalb eines Haushaltes und der schwindenden statistischen Relevanz wurden im Modell nur Haushalte mit bis zu 5 Personen explizit berücksichtigt. Für Haushalte mit mehr als 5 Personen kann näherungsweise ein 5-Personen-Haushalt gewählt werden. Bei sehr hoher Geräteausstattung können die Personen alternativ auf zwei Haushalte aufgeteilt werden.

Im Modell kann die Anzahl der Personen je Haushalt vorgegeben werden. Alternativ kann eine Haushaltsgrößenverteilung im Programm hinterlegt werden (z.B. die aktuelle Verteilung der Haushaltsgrößen in Deutschland), aus der automatisch die Größe der Haushalte gewählt wird. Aktuell ist dort die Verteilung der Haushaltsgrößen aus [48] hinterlegt. Analog kann auch der Beschäftigungsstatus (Berufstätig oder nicht) jedes Bewohners explizit vorgegeben oder Wahrscheinlichkeiten für das Beschäftigungsverhältnis der Bewohner in Abhängigkeit der Haushaltsgröße hinterlegt werden, aus denen eine zufällige Zusammensetzung des Haushaltes gewählt wird.

#### **6.2.4 Validierung der erzeugten Profile**

Zur Validierung der erzeugten Profile werden diese zunächst mit einem Standardlastprofil (SLP) für Haushalte (H0) verglichen. Dieses wird anhand der Methodik des VDEW (jetzt BDEW) für das Jahr 2011 erzeugt [52]. Das SLP bildet das durchschnittliche Verbrauchsprofil einer

großen Menge an Haushalten ab. Lastspitzen werden durch die Mittelung über viele Haushalte herausgefiltert. Um mittels des Standardlastprofils die Modellergebnisse bewerten zu können, wird mit dem Modell eine große Anzahl an Stromprofilen erzeugt und daraus ein durchschnittliches Stromprofil erzeugt. In Abbildung 6.10 sind die mit dem Modell erzeugten durchschnittlichen Stromlastprofile für 1, 10, 100 und 10.000 Haushalte dargestellt. Das Profil für einen Haushalt wurde dabei durch die Verhaltenssimulation eines zufälligen einzelnen Haushalts erzeugt und steht exemplarisch für die Charakteristik von Einzelprofilen. Bei der Erzeugung der Profile wird angenommen, dass etwa 40 % des Trinkwarmwasserbedarfs elektrisch gedeckt werden. Der übrige Trinkwarmwasserbedarf wird nicht berücksichtigt.

Der Stromverbrauch über die drei dargestellten Tage (Freitag, Samstag und Sonntag) schwankt in den sich ergebenden Profilen zwischen etwa 26 und 29 kWh. Für das Mittel aus 10.000 Haushalten liegt er bei 28,78 kWh. Um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde das Standardlastprofil für alle Haushaltsanzahlen für die betrachteten drei Tage auf diesen mittleren Verbrauch skaliert – die SLP-Kurve ist also in allen vier Teilen der Abbildung gleich.

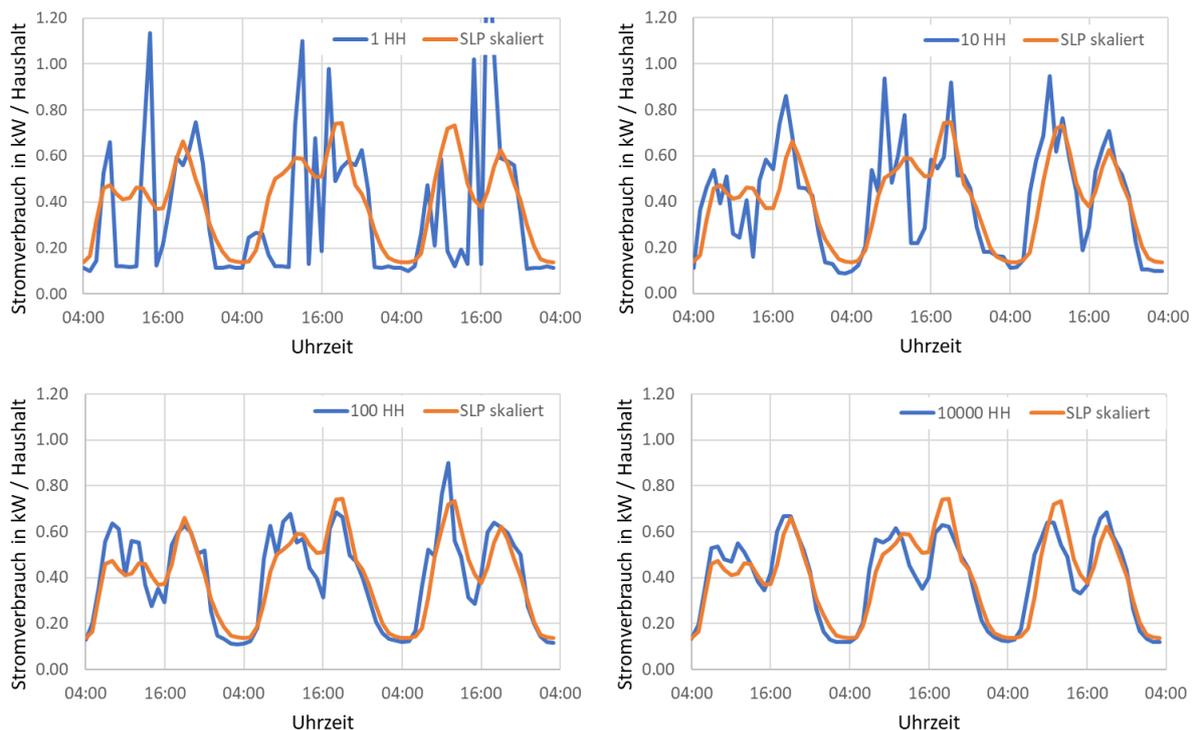


Abbildung 6.10: Vergleich des mit dem Modell erzeugten durchschnittlichen Stromverbrauchs für 1, 10, 100 und 10.000 Haushalte (HH) mit dem auf den mittleren Gesamtstromverbrauch (28,78 kWh) der 10.000 Haushalte skalierten Standardlastprofil bezogen auf die betrachteten drei Tage (Freitag, Samstag, Sonntag)

Für den Einzelhaushalt, aber auch noch sehr deutlich für den Mittelwert aus 10 Haushalten, sind die stärker ausgeprägten Lastspitzen erkennbar. Die geringere Anzahl an Haushalten führt dazu, dass kurzfristige hohe Leistungsabfragen, z.B. durch die Bereitstellung von Trinkwarmwasser, weiter erkennbar sind. Dieser Umstand wird etwas dadurch abgemildert, dass die dargestellten Profile bereits auf Stundenwerte gemittelt wurden.

Für eine hohe Anzahl an betrachteten Haushalten (hier 10.000) ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit dem SLP. Insbesondere der Verbrauch der Basislastgeräte scheint gut abgebildet zu werden. Nachts bestimmen vor allem die Basislastgeräte den Stromverbrauch, da wenig andere Verbraucher verwendet werden und dort zeigt das Profil eine gute Übereinstimmung mit dem Stromverbrauch im SLP.

An den Wochenenden, insbesondere am Samstag, ergeben sich etwas stärkere Abweichungen zum SLP. Dies kann u.a. daran liegen, dass im Modell immer nur der Stromverbrauch innerhalb eines Haushaltes betrachtet wird. Ist eine Person abwesend, wird nicht berücksichtigt, dass die Person in der Zeit evtl. in einem anderen Haushalt, der besucht wird, für einen Mehrverbrauch sorgen kann.

Zudem sind die unterschiedlichen Zeitpunkte der verwendeten Quellen zu beachten. Während die Methodik zur Erzeugung des SLPs bereits von 1999 stammt, basiert das Modell auf Befragungen zum Verhalten von 2011 und der Stromverbrauch wurde auf Daten von 2015 kalibriert. Entsprechend sind Unterschiede im Verhalten, aber auch in der Charakteristik des Stromverbrauchs der im Haushalt vorhandenen Geräte zu erwarten.

### **Vergleich mit Realdaten**

Zum Vergleich der Modellergebnisse mit gemessenen Realdaten, werden für 17 ausgewählte Haushalte Profile unter Vorgabe der jeweiligen Haushaltsgröße erzeugt. Zusätzlich wird berücksichtigt, ob in den Haushalten Strom zur Trinkwassererwärmung eingesetzt wird. Bei den Haushalten handelt es sich um Einheiten, die ausschließlich zum Wohnen genutzt werden, da im Modell das Nutzerverhalten im Bereich GHD nicht berücksichtigt wird. Es wird der Stromverbrauch der Haushalte ohne Batterien und ohne KWK-Strom verwendet, da in den synthetischen Profilen lediglich der Verbrauch durch Haushaltsgeräte und Beleuchtung betrachtet wird und nicht eine evtl. Verschiebung durch Speicher oder durch teilweise Deckung des Stroms durch die KWK. Untersuchungen zur Veränderung des Verbrauchsprofils durch die KWK und die Batterie wurden in Abschnitt 6.1 durchgeführt.

Da es sich beim Modell um einen stochastischen Ansatz handelt, der nicht den Anspruch erhebt das zeitlich aufgelöste Profil eines realen Haushaltes exakt abzubilden, ist ein direkter Vergleich eines einzelnen Haushaltes mit dem zugehörigen synthetischen Profil ist nicht zielführend. Stattdessen wird für jeden Wochentag ein stündlich aufgelöstes Profil durch Mittelwertbildung über 52 Wochen erzeugt.

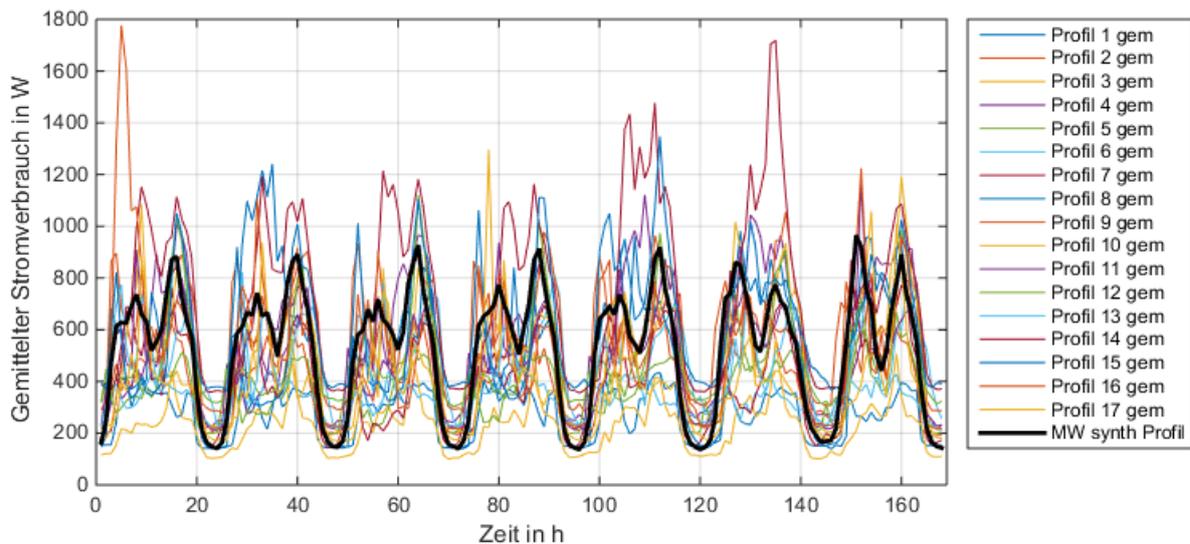


Abbildung 6.11: Vergleich des Stromverbrauchs von 17 gemessenen Profilen (bunt) im Vergleich zum Mittelwert aus 17 synthetischen Verbrauchsprofilen (schwarz) für jede Stunde einer Woche gemittelt über 52 Wochen (2016)

In Abbildung 6.11 sind die resultierenden Wochenprofile für die 17 ausgewählten Haushalte für das Jahr 2016 dargestellt (bunte Kurven). Im Vergleich dazu ist der Mittelwert des Stromverbrauchs aus den 17 synthetischen Profilen in schwarz aufgetragen. Auf der x-Achse ist die Zeit einer Woche in Stunden aufgetragen, wobei die Darstellung mit Montag, 4 Uhr morgens beginnt. Für die Darstellung wurden sowohl für die Messwerte als auch für das mittlere synthetische Profil die Absolutwerte, ohne Skalierung verwendet. Es ist zu erkennen, dass das Mittel des synthetischen Profils innerhalb der betrachteten Kurvenschar der gemessenen Profile liegt. In Bezug auf die Basislast liegt der berechnete Verbrauch tendenziell eher im unteren Feld (erkennbar an den nächtlichen Verbräuchen).

Um auch die Spannweite der berechneten Profile besser mit den gemessenen Daten vergleichen zu können, werden für jeden Zeitschritt des Wochendurchschnitts die minimalen und maximalen Werte bestimmt. Der Verlauf der Minima und Maxima (grau), sowie als Referenz der Mittelwert (schwarz), sind in Abbildung 6.12 aufgetragen. Zum Vergleich sind die anhand der gemessenen Werte bestimmten Kurven in orange dargestellt.

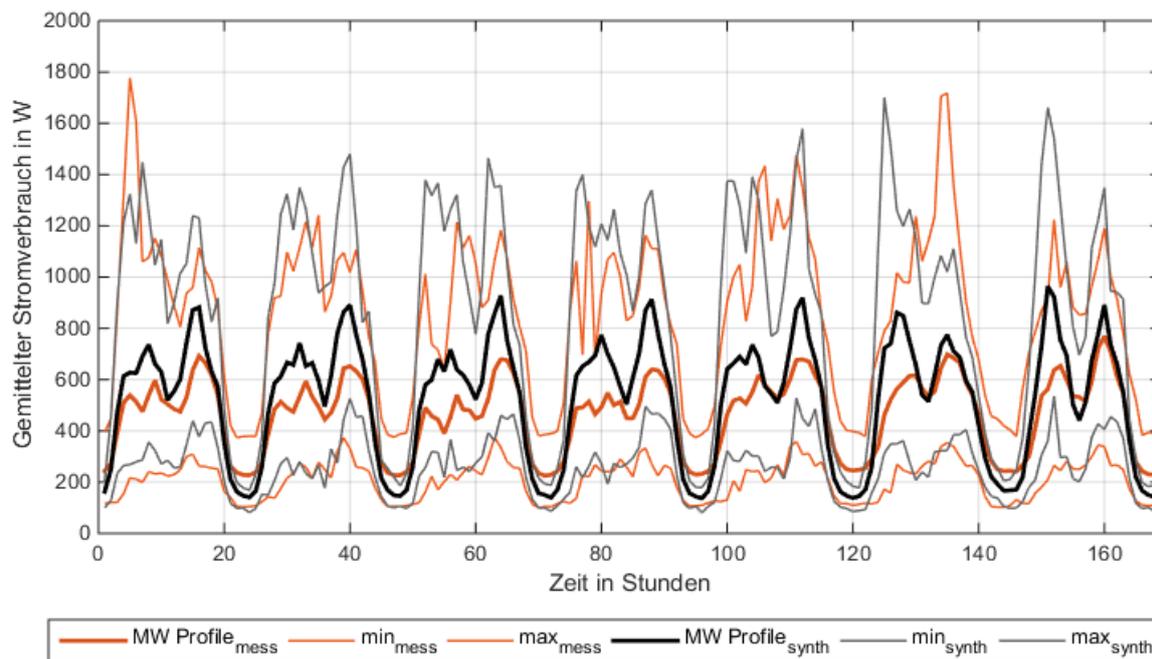


Abbildung 6.12: Vergleich des Mittelwertes, sowie dem minimalen und maximalen Stromverbrauchs von 17 gemessenen Profilen (orange) mit den Werten für die synthetischen Verbrauchsprofilen (schwarz, grau) für jede Stunde einer Woche gemittelt über 52 Wochen (2016)

Der minimale Stromverbrauch aller Haushalte stimmt insbesondere nachts relativ gut mit dem Minimum der gemessenen Profile überein. Bei den Maxima sind zum Teil deutliche Abweichungen zu erkennen. Hier scheint der Verbrauch nachts systematisch unterschätzt zu werden, was auch beim Vergleich der Mittelwerte zu einem geringeren nächtlichen Verbrauch laut synthetischer Daten führt. Auch der morgendliche Peak an Montagen fällt etwas geringer aus als in den Messwerten, während der Verlauf tagsüber an den übrigen Werktagen potenziell eher etwas überschätzt wird. Wie in Abbildung 6.11 zu erkennen, wird diese Lastspitze maßgeblich durch einen einzelnen Haushalt geprägt, ebenso wie die gemessene Lastspitze am Samstagabend. Wie diese Beispiele verdeutlichen werden durch die Auswahl von 17 Haushalten vereinzelte besonders hohe oder tiefe Lastprofile bzw. Lastspitzen einzelner Profile nicht komplett herausgefiltert. Dennoch zeigt sich insgesamt bereits eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung, ohne dass eine erneute Kalibrierung des Modells durchgeführt wurde.

Ein einzelnes synthetisches Profil kann zwar nicht das tatsächliche reale Verhalten eines Haushaltes abbilden, dennoch wird ein wahrscheinliches Verhalten abgebildet. Eine Verwendung zur Abbildung der Verbrauchsstruktur von Quartieren, in denen keine individuellen Messdaten vorhanden sind, bietet sich daher an. Stehen für ein Quartier nur Summenlastprofile zur Verfügung ohne weitere Information zu den Haushaltsgrößen, ist es auch möglich zunächst mit der vorgegebenen Standardverteilung der Haushaltsgrößen Profile zu erzeugen. Diese lassen sich im Nachgang durch Skalierung ggf. noch auf das Summenlastprofil anpassen.

### 6.3 Quantifizierung des Netzeinflusses

Für die Untersuchung, inwiefern KWK-Systeme plus elektrische Speicher die Residuallast des Netzes ausgleichen können, ist die Entwicklung einer netzdienlichen Regelung erforderlich. Unter einem netzdienlichen System wird in diesem Fall ein System verstanden, das zu der Reduzierung der Residuallast des Stromnetzes beiträgt. Die netzdienliche Regelung gibt Signale des Stromnetzes an die KWK-Systeme und die Batterie weiter, sodass diese auf die Residuallast reagieren können. Diese Regelung steuert grundsätzlich die Energieflüsse zwischen dem KWK-System, der Batterie und dem Stromnetz. Die Entwicklung und Modellierung einer Regelung und die Untersuchung ökologischer und energetischer Kriterien ist das Ziel dieses Kapitelabschnitts.

Die Residuallast gibt an, wie viel Strombedarf oder Stromüberschuss das Stromnetz aufgrund der Strombereitstellung von fluktuierenden regenerativen Energien besitzt. Der Stromverbrauch bezieht sich auf die synthetisch erzeugte Residuallast von Bottrop. Dazu wird die Anzahl der Privathaushalte, veröffentlicht von der Stadt Bottrop [53], mit einem Stromprofil für die einzelnen Personengruppen multipliziert und summiert. Die Aufteilung der Privathaushalte nach Personengruppen sind in Tabelle 6.8 dargestellt.

Tabelle 6.8: Übersicht der Privathaushalte in Bottrop zur Erzeugung einer synthetischen Residuallast [53]

Privathaushalte	Anzahl	Prozentualer Anteil (%)
Haushalte insgesamt	56.684	100
Einpersonenhaushalte	22.864	40,3
Alleinerziehende	2.517	4,4
Mehrpersonen ohne Kinder	22.826	40,3
Mehrpersonen mit Kindern	8.477	15,0

Das Generieren der Stromprofile der einzelnen Gruppen entsteht mit Hilfe des Load Profile Generators der Technischen Universität Chemnitz [54]. In Abbildung 6.13 ist das erzeugte Stromlastprofil der Haushalte in Bottrop für einen Beispielstag im April dargestellt. Zunächst wird eine beispielhafte Residuallast angenommen. Weiterhin wird angenommen, dass die Stromproduktion eines Jahres dem konstanten Mittelwert des Verbrauchs entspricht. Das auszugleichende Netzprofil setzt sich aus der Differenz des Strombedarfs der Haushalte und der Stromproduktion zusammen. Abbildung 6.13 veranschaulicht den Strombedarf der Haushalte und die Auslegung der Stromproduktion an einem Beispielstag im April.

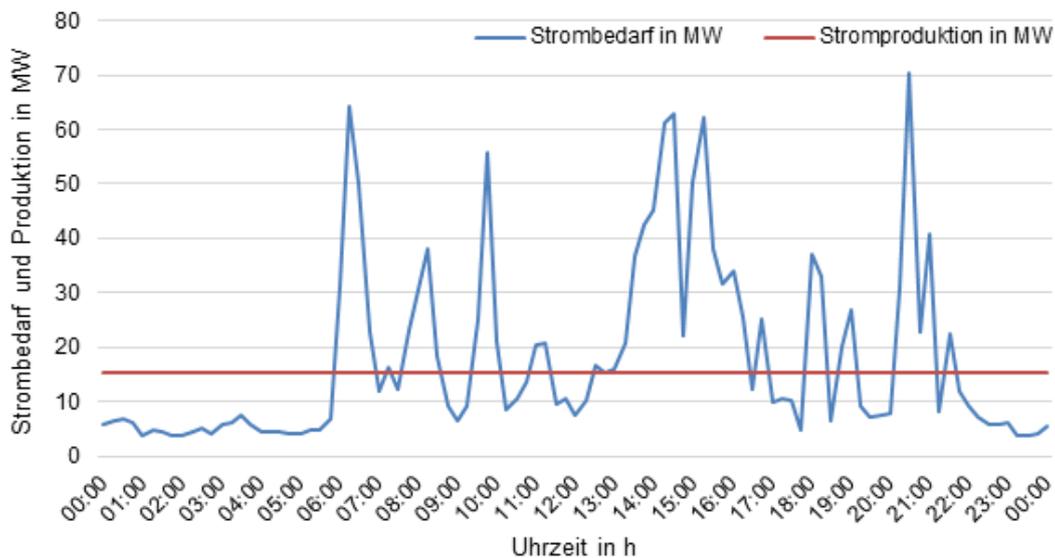


Abbildung 6.13: Beispielhaftes synthetisches Stromlastprofil der Haushalte in Bottrop und Annahme der konstanten Stromproduktion

In Abbildung 6.14 ist das sich somit ergebene Stromnetzprofil, zusammengesetzt aus der Differenz des Strombedarfs und der Stromproduktion, abgebildet.

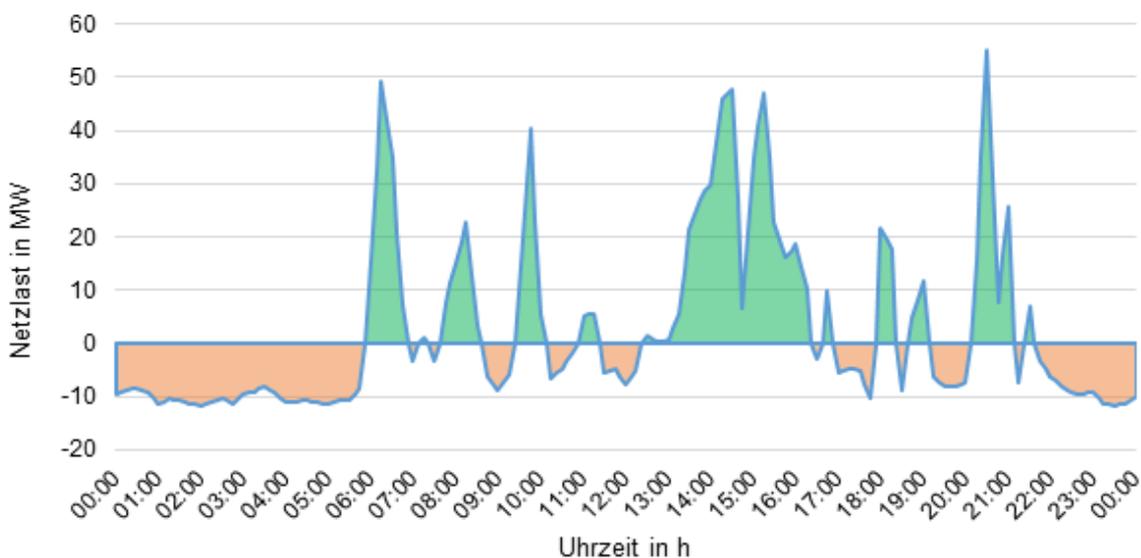


Abbildung 6.14: Beispielhaftes synthetisches Residuallastprofil der Stadt Bottrop, die negative Werte stellen einen Stromüberschuss und die positive Werte zeichnen einen Strombedarf im Stromnetz dar.

Die Lasten für das ganze Jahr sind im Abbildung 6.15 dargestellt. Kumuliert über ein Jahr ergibt sich eine ca. gleichverteilte negative und positive Residuallast von je ca. 48 GWh/a.

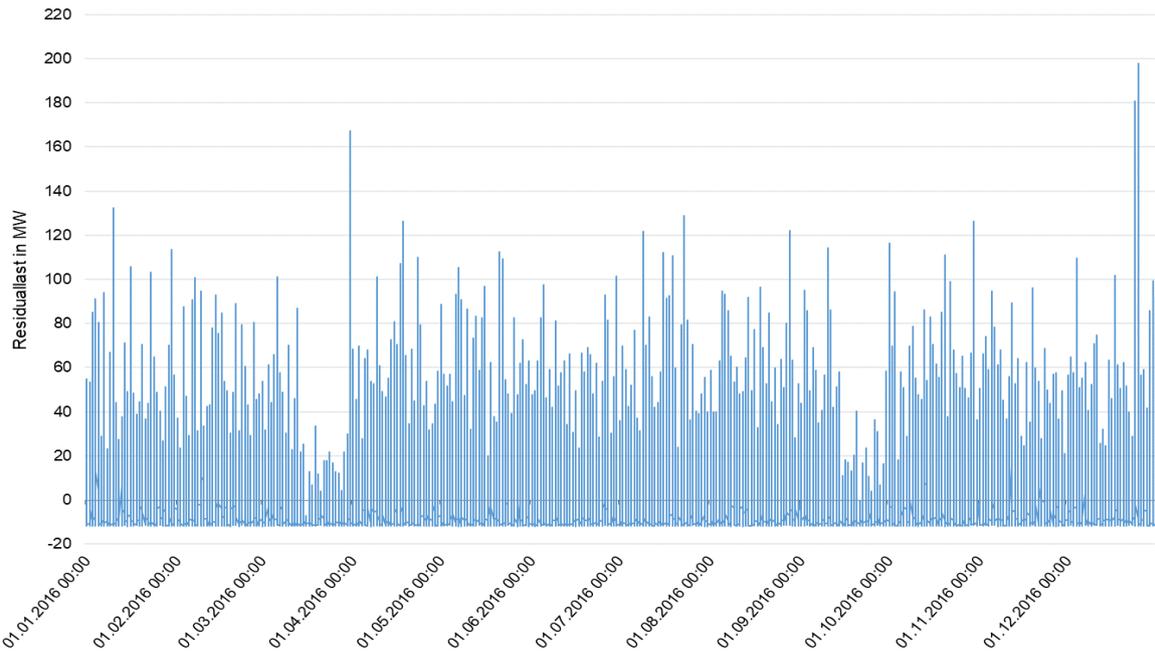


Abbildung 6.15 Beispielhaftes synthetisches Residuallastprofil von Bottrop im Jahr 2016

Im Folgenden wird betrachtet, welchen Beitrag die KWK-Anlagen sowie Batterien zur Reduktion der Residuallast leisten können.

### Netzdienliche Regelung

Durch die Regelung werden Signale an die KWK-Anlagen und die Batterie übermittelt, sodass sich die Betriebszustände der Residuallast anpassen können. Ein Flussbild der entwickelten Regelung ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Als KWK-Technologien werden ottomotorische und stirlingmotorische KWK, oxidkeramische Brennstoffzellen (SOFC) und Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC) betrachtet. Die Technologien werden individuell geregelt.

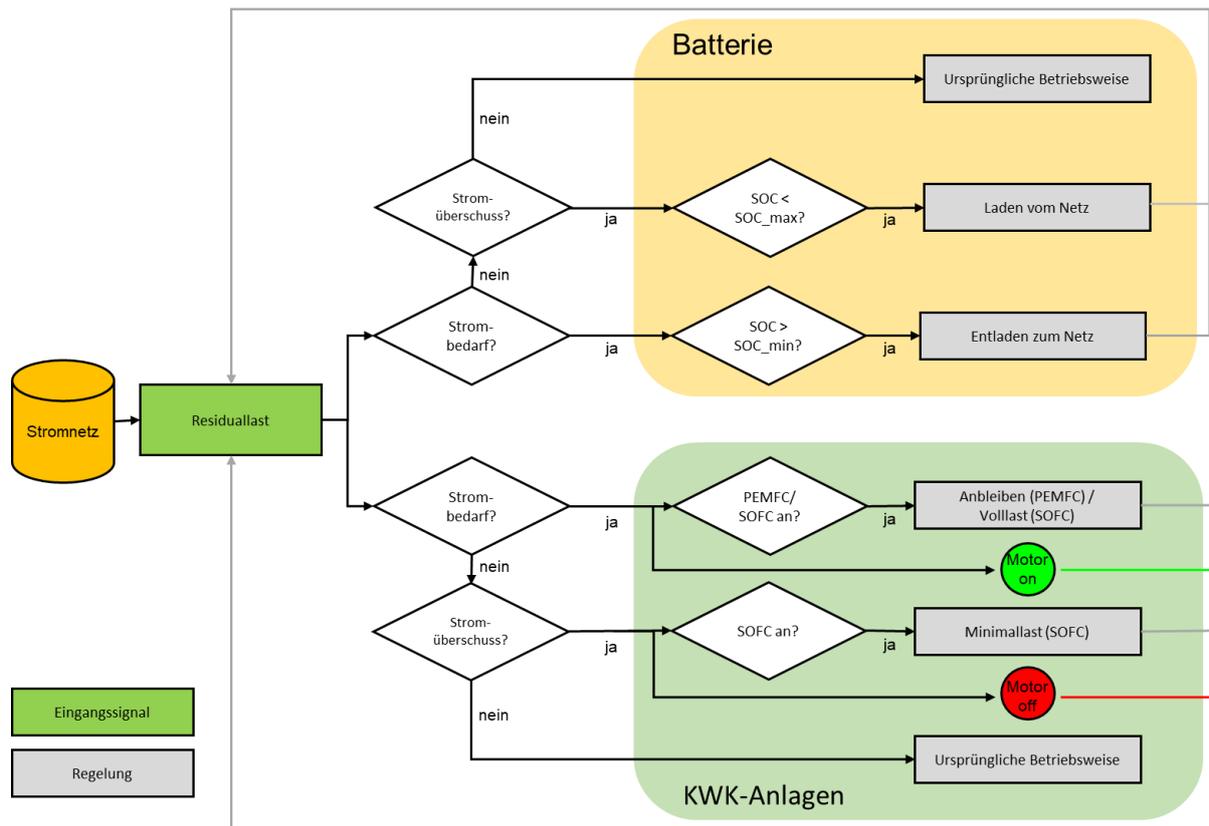


Abbildung 6.16 Flussbild der entwickelten Regelung zur Netzdienlichkeit von KWK-Anlagen plus elektrischem Speicher. PEMFC: Polymermembran-Brennstoffzelle, SOFC: oxidkeramische Brennstoffzelle, SOC: *State of Charge* (Ladezustand)

Bei einem Strombedarf des Netzes bekommen die Brennstoffzellen das Signal angeschaltet zu bleiben, wenn diese bereits angeschaltet sind. Wenn diese ausgeschaltet sind bleiben sie aus, da die Anfahrvorgänge viel Zeit in Anspruch nehmen. Die PEMFC benötigt, anders als die SOFC, nach einer bestimmten Betriebszeit eine Regenerationsphase. Diese wird in der Regelung berücksichtigt. Während die PEMFC nur auf Nennlast fahren kann, kann die SOFC verschiedene Lastbereiche anfahren. Daher bekommt diese zusätzlich das Signal, sich auf Volllast hoch zu regeln. Die motorischen Anlagen können flexibler auf das Stromnetz reagieren und bekommen daher das Signal, sich bei einer positiven Residuallast anzuschalten. Der überschüssige produzierte Strom der Mikro-KWK-Anlagen, der nicht von den Nutzern benötigt wird, wird direkt in das Stromnetz eingespeist, um Verluste in der Batterie zu vermeiden und keine Leistungsbeschränkung zu erfahren. Die Batterie bekommt bei einem Strombedarf des Netzes das Signal, sich in das Netz zu entladen.

Bei einer negativen Residuallast, also einem Stromüberschuss des Netzes, regelt sich die SOFC auf Minimallast, wenn sie angeschaltet ist. Die PEMFC bekommt kein Signal, wenn diese angeschaltet ist, da sie nicht in verschiedenen Lasten fahren kann und ein Ausschalten nicht erwünscht ist. Wenn diese ausgeschaltet ist oder sich in der Regenerationsphase befindet, bekommt die PEMFC ebenfalls kein Signal, da diese drei Stunden benötigt, um hochzufahren und somit nicht auf einen möglichen Strombedarf reagieren kann. Zur Entscheidung, ob es sinnvoller ist, die PEMFC bei einem Stromüberschuss ausgeschaltet zu lassen, ist eine Prognose

der Residuallast der nächsten Stunden notwendig. Die motorischen Anlagen bekommen das Signal sich auszuschalten. In diesem Fall wird die elektrische Last der Nutzer nur über das Stromnetz gedeckt und die benötigte Wärme vom Spitzenlastkessel bereitgestellt. Die Batterie wird in diesem Fall durch das Stromnetz aufgeladen.

Wenn das Stromnetz weder einen Strombedarf noch einen Stromüberschuss besitzt oder die Residuallast innerhalb einer Bandbreite liegt, in der diese nicht ausgeglichen werden muss, werden die Mikro-KWK-Anlagen hinsichtlich ihrer ursprünglichen Betriebsweise (strom- oder wärmegeführt) gefahren. Die Batterie wird dann durch überschüssigen Strom der Mikro-KWK-Anlagen geladen und bei Bedarf der Nutzer entladen.

Die Regelung wurde mit der Modellierungssprache Modelica in der Simulationsumgebung Dymola modelliert [55]. Durch das Modell eines vereinfachten Quartiers, bestehend aus sechs Objekten<sup>5</sup> und einer Batterie, kann eine Analyse der Netzdienlichkeit der „KWK plus Speicher“-Systeme durchgeführt werden [56]. Als KWK-Technologien werden eine stirlingmotorische und eine ottomotorische, zwei SOFC und zwei PEMFC von unterschiedlichen Herstellern betrachtet. Die Auswahl orientiert sich an den aktuell am Markt verfügbaren Anlagen.

Bei allen sechs Objekten des Quartiermodells sind die gleichen thermischen und elektrischen Nutzerlasten hinterlegt. Die generierten elektrischen Energiemengen der KWK-Anlagen sowie die elektrischen Nutzerlasten werden aufsummiert und als ein Wert an die Batterie und an den Energiezähler weitergegeben. Dort werden die Stromflüsse erfasst, sodass berechnet werden kann, inwiefern die Residuallast durch die KWK-Systeme und die Batterie ausgeglichen wird. Als elektrischer Speicher wird eine Lithium-Ionen-Batterie verwendet. In diesem Quartiermodell werden Verluste, wie zum Beispiel durch Leitungen, vernachlässigt. In der Batterie und den KWK-Systemen werden diese jedoch berücksichtigt.

Als Eingangsparameter des Quartiermodells dienen die Nutzerlasten und die Residuallast des Netzes. Um vergleichen zu können, wie sich die netzdienliche Betriebsweise des Systems im Vergleich zur wärmegeführten Betriebsweise unterscheidet, wird die oben beschriebene synthetisch erzeugte Residuallast verwendet. Nach der Erstellung des Quartiermodells wird dieses für je sechs verschiedene Nutzerprofile mit netzdienlicher und wärmegeführter Betriebsweise der KWK-Systeme mit dem elektrischen Speicher simuliert.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand verschieden ausgewählter energetischer und ökologischer Kriterien. Diese sind Netzabdeckungsquote, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Volllaststunden der KWK-Anlagen. Dabei werden die Ergebnisse einer wärmegeführten und einer netzdienlichen Variante miteinander verglichen. Ziel ist es, den gesamten Einfluss der 100 Feldtest-Anlagen zu untersuchen. Daher werden die Ergebnisse hochskaliert.

---

<sup>5</sup> Das Modell eines Objektes beinhaltet neben der KWK-Anlage einen Spitzenlastkessel und einen thermischen Speicher

## Netzabdeckungsquote

Für die Untersuchung der Netzdienlichkeit der „KWK plus Speicher“-Systeme wird die Netzabdeckungsquote (NAQ) betrachtet. Diese gibt an, welcher Anteil der Residuallast durch die „KWK plus Speicher“-Systeme abgedeckt wird und lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$NAQ_{neg/pos} = 1 - \frac{RL_{reg, neg/pos}}{RL_{neg/pos}} \text{ in \%} \quad \text{F. 6.3}$$

Wobei:

$RL_{reg, neg/pos}$  = negative/positive Residuallast abzüglich der eingespeisten und bezogenen Energiemenge durch die „KWK plus Speicher“-Systeme in kWh/a

$RL_{neg, pos}$  = negative/positive Residuallast in kWh/a

Wenn die Systeme, statt durch die Residuallast geregelt zu werden wärmegeführt betrieben werden, haben diese nur wenig Einfluss auf die Residuallast. Bei einem Stromüberschuss im Netz kommt es sogar zu einem leicht negativen Effekt, da die wärmegeführten Mikro-KWK-Anlagen trotz negativer Residuallast überschüssigen Strom ins Netz einspeisen. Durch das Hochskalieren der Ergebnisse auf 108 Objekte lässt sich feststellen, dass die netzdienlichen Systeme die positive Beispiel-Residuallast von 48 GWh/a zu 1,47 % und die negative Beispiel-Residuallast zu 1,56 % abdecken. Die Einflüsse der KWK-Anlagen und Batteriespeicher sind in Abbildung 6.17 dargestellt

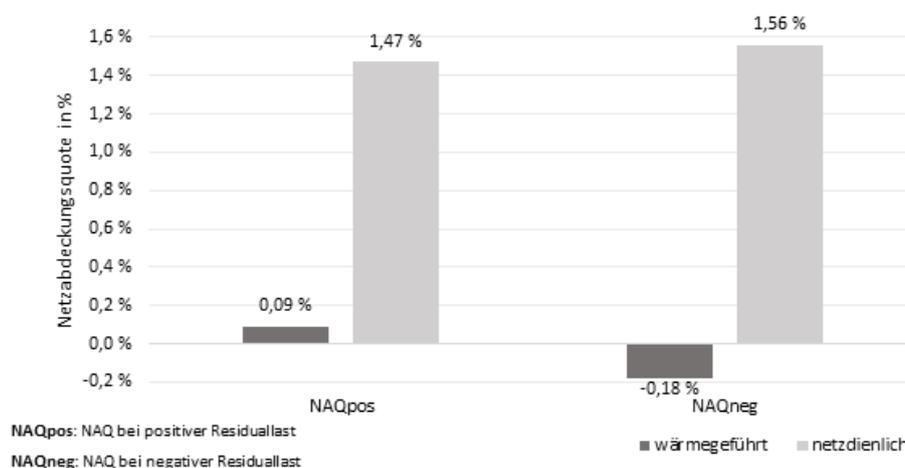


Abbildung 6.17 Vergleich der Netzabdeckungsquoten der netzdienlichen und wärmegeführten Fahrweise eines Quartiers mit 108 Objekten und 18 Batterien

## CO<sub>2</sub>-Emissionen

Als ökologisches Auswertungskriterium werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Bereitstellung der benötigten thermischen und elektrischen Energie der Nutzer betrachtet. Die Bilanzgrenzen stellen somit die einzelnen Objekte dar.

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen wird angenommen, dass bei einer negativen Residuallast nur Strom aus erneuerbaren Energien im Netz vorhanden ist und bei einer positiven Residuallast nur konventioneller Strom. Dementsprechend werden die vom Stromnetz bezogenen und eingespeisten Energiemengen mit dem jeweiligen Emissionsfaktor (EF) für Fluktuierende Erneuerbare Energien (FEE) bzw. des Verdrängungsstrommixes aus konventionellen Kraftwerken multipliziert. Wenn keine Residuallast ausgeglichen werden muss, wird für den Strombezug der EF des deutschen Strommixes und für die Stromeinspeisung der EF des Verdrängungsstrommixes für die Berechnung verwendet. Somit lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Objekte mit folgender Formel berechnen:

$$\begin{aligned}
 m_{CO_2} = & \quad EF_{CO_2,CH_4} \cdot (E_{Gas,KWK} + E_{Gas,SLK}) \\
 & + EF_{CO_2,StrommixD} \cdot E_{Netzbezug,RL=0} \\
 & - EF_{CO_2,Verdrängungsstrommix} \cdot E_{Netzeinspeisung,RL=0} \\
 & - EF_{CO_2,Verdrängungsstrommix} \cdot (E_{Netzeinspeisung,RL>0} - E_{Netzbezug,RL>0}) \\
 & - EF_{CO_2,FEE} \cdot (E_{Netzeinspeisung,RL<0} - E_{Netzbezug,RL<0}) \text{ in kg}
 \end{aligned}$$

Mit:

Emissionsfaktor Erdgas:  $EF_{CO_2, CH_4} = 0,202 \text{ kg}_{CO_2}/kWh$  [57]

Emissionsfaktor deutscher Strommix:  $EF_{CO_2, StrommixD} = 0,537 \text{ kg}_{CO_2}/kWh$  [57]

Emissionsfaktor Verdrängungsstrommix:  $EF_{CO_2, Verdrängungsstrommix} = 0,669 \text{ kg}_{CO_2}/kWh$  [eigene Berechnung]

Emissionsfaktor Fluktuierende Erneuerbare Energien:  $EF_{CO_2, FEE} = 0,023 \text{ kg}_{CO_2}/kWh$  [eigene Berechnung]

Als Ergebnis der Simulationen lässt sich festhalten, dass die netzdienliche Fahrweise eine um ca. 4 % geringere CO<sub>2</sub>-Emission der Objekte für ein Jahr aufweist als die wärmegeführte Fahrweise. Bei einer negativen Residuallast wird bei den netzdienlich betriebenen Mikro-KWK-Anlagen ca. viermal so viel Strom vom Netz bezogen als bei der wärmegeführten Variante, sodass CO<sub>2</sub> eingespart wird. Jedoch wird bei der netzdienlichen Variante mehr Wärme durch den Spitzenlastkessel bereitgestellt, sodass dieser mehr CO<sub>2</sub> emittiert als bei der wärmegeführten Variante.

### Volllaststunden der KWK-Anlagen

Die Volllaststunden der Mikro-KWK-Anlagen haben einen Einfluss auf die Lebensdauer und Ökonomie der Anlagen. Es kann ebenfalls der Unterschied der einzelnen Technologien zwischen der wärmegeführten und netzdienlichen Betriebsweise untersucht werden.

Die Volllaststunden der motorischen Anlagen (Otto- und Stirling-Motoren) und der SOFC-Anlagen unterscheiden sich deutlich zwischen den beiden Betriebsweisen, da diese flexibel auf das Stromnetz reagieren können. Bei einer negativen Residuallast schalten sich diese bei der netzdienlichen Betriebsweise ab bzw. regeln sich runter. Daraus resultiert eine geringere Volllaststundenzahl (40-50 %) gegenüber der wärmegeführten Betriebsweise. Die wärmegeführten und netzdienlichen PEMFC-Anlagen weisen nahezu die gleichen Volllaststunden auf, da diese wenig flexibel auf das Stromnetz reagieren. Es lässt sich ebenfalls feststellen, dass eine große thermische Leistung eher hinderlich für die Netzdienlichkeit der Anlagen ist, da sich eine

Mikro-KWK-Anlage trotz eines Strombedarfs des Netzes ausschaltet, wenn der thermische Speicher seine maximale Temperatur erreicht hat. Die resultierenden Volllaststunden der beiden Betriebsarten sind in Abbildung 6.18 dargestellt.

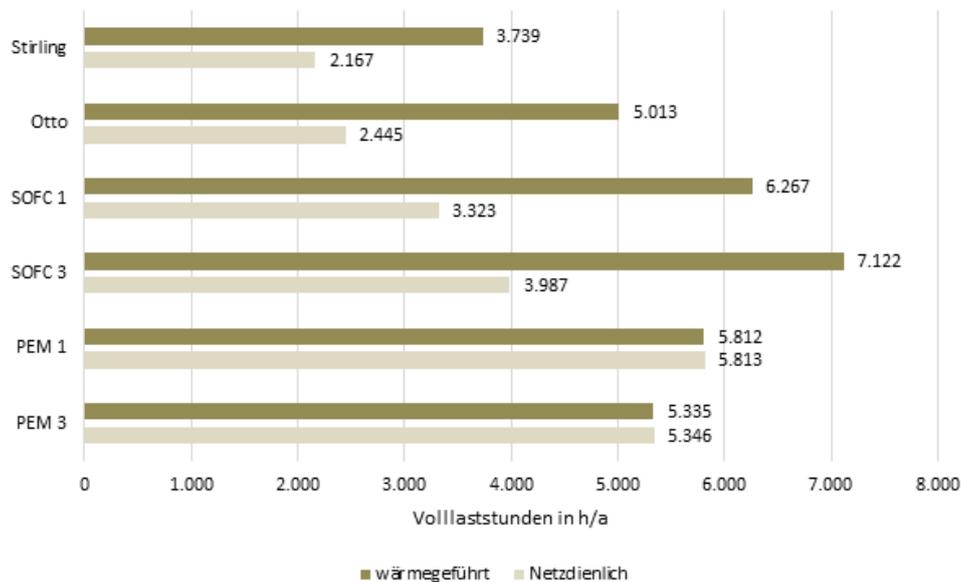


Abbildung 6.18 Vergleich der durchschnittlichen Volllaststundenzahl der einzelnen netzdienlichen und wärmegeführten KWK-Technologien der sechs Simulationen

Mikro-KWK-Anlagen mit elektrischem Speicher können einen Beitrag zur Abdeckung der positiven und negativen Residuallast leisten. Anhand der Volllaststunden ist zu erkennen, dass es Unterschiede zwischen den einzelnen Technologien gibt. Die motorischen Anlagen können flexibler auf die Anforderungen des Stromnetzes reagieren als die Brennstoffzellen. Die untersuchten SOFC-Anlagen können aufgrund ihrer unterschiedlichen Lastbereiche ebenfalls gut auf die Residuallast reagieren. Die Netzdienlichkeit der PEMFC kann durch eine Prognose der Residuallast erhöht werden, um diese bei einem Stromüberschuss ausgeschaltet zu lassen, wenn in den nächsten Stunden kein Strom benötigt wird. Die Batterie stellt neben den Mikro-KWK-Anlagen ebenfalls eine wichtige Komponente zur Abdeckung der Residuallast dar. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Energiebereitstellung der Nutzer sind bei der netzdienlichen Fahrweise der Mikro-KWK-Anlagen etwas geringer als bei der wärmegeführten Fahrweise.

## 7. Auswertung und Bewertung

*In diesem Kapitel wird gezeigt, dass die Kopplung eines BHKW mit einem Smart-Home System möglich ist. Eine Optimierung des Eigenverbrauchs ist in diesem Fall jedoch stark nutzerabhängig, erfordert viel Aufmerksamkeit seitens des Nutzenden und ist dementsprechend sehr variabel. Die entwickelte Regelung in Abschnitt 7.1.3 zeigt, dass die Benutzung des Wohnraums als Speicher möglich ist und die somit gewonnene Flexibilität verwendet werden kann, um die Betriebskosten der Energieversorgung des Objekts zu senken. Der elektrische Eigenverbrauch wird dabei erhöht, was den Netzbezug und die Betriebskosten verringert. Die Regelung tendiert allerdings dazu die mittlere Raumtemperatur innerhalb der gegebenen Grenzen signifikant zu ändern. Des Weiteren kommt es je nach Verhältnis des Strom-/Wärmebedarfs zu einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, was in Anbetracht des Klimawandels und der Ziele der Energiewende problematisch ist. In diesem Kontext ist auch eine Anpassung der Zielgröße der Regelung auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen denkbar. Solch eine Regelung könnte dynamisch auf die zeitlich variierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen des Stroms aus dem Netz reagieren und so die Akzeptanz und Lebensdauer der BHKWs in Anbetracht der Energiewende erhöhen.*

*Weiterhin werden in Abschnitt 7.2 die Felddaten der Objekte mit verbauter KWK-Anlage und Batteriespeicher ausgewertet, welche gegenüber Systemen ohne Batterien, zu aktuellen Konditionen, noch keinen klaren ökologischen oder ökonomischen Vorteil aufweisen. Die durch die Batterien erreichten vermiedenen Netzbezüge können die vorliegenden Investitionskosten nicht amortisieren. Weiterhin wird die gute Kompatibilität von motorischen KWK-Anlagen und PV-Anlagen in Kombination mit einem Batteriespeicher, aufgrund ihres sich ergänzenden Erzeugungsverhaltens, dargestellt. In Abschnitt 7.3 wird durch den Vergleich unterschiedlicher Messperioden sichergestellt, dass die hohe Effizienz der KWK-Anlagen über mehrere Betriebsjahre gehalten werden kann. Weiterhin werden Erlösmöglichkeiten des KWKG 2020 aufgezeigt, welche nach wie vor in der Maximierung der Eigenverbrauchsquote liegen. Abschnitt 7.4 stellt die Steigerung der Eigenverbrauchsquote und des Autarkiegrades detailliert dar. Neben den Speicherverlusten können die auftretenden Netzladungen als negative Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit des Systems identifiziert und quantifiziert werden. In den folgenden beiden Abschnitten 7.5 und 7.6 werden die Ergebnisse auf die Stadt Bottrop, auf NRW sowie auf ganz Deutschland übertragen und das Potenzial für CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung für den aktuellen Gebäudebestand aufgezeigt. Insgesamt ist dabei festzustellen, dass Mikro-KWK-Anlagen durch ihr Betriebsverhalten in Kombination mit Batterien zukünftig einen Beitrag zur Integration erneuerbaren Energien leisten können. Unter dem Aspekt der Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist eine beschleunigte Reduktion der Menge des eingesetzten Brennstoffes sowie eine Dekarbonisierung des eingesetzten Brennstoffes notwendig.*

## **7.1 Messungen zum Teillastverhalten, Anlagenregelung und Nutzerverhalten**

### **7.1.1 Einbinden des BHKW in ein Smart-Home-System**

Aktuell können Nutzer im 100 KWK-Projekt die Erzeugung und den Bezug von elektrischer Energie aus dem Netz manuell einsehen. So ist es prinzipiell möglich den Stromverbrauch zu erhöhen, wenn aufgrund des wärmegeführten BHKW mehr elektrische Energie bereitgestellt wird als aktuell im Haushalt benötigt wird. Dieses Vorgehen benötigt ein hohes Maß an Eigeninitiative seitens des Benutzers und wird mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht kontinuierlich und in jeder Situation durchgeführt werden können.

Eine Möglichkeit den Eigenverbrauch zu erhöhen ist, dem Nutzer zusätzlich mehr Kontrolle über die Erzeugung zu geben. Hat der Nutzer Kontrolle über die Erzeugung, ist Eigeninitiative nur nötig, sobald er ein stromintensives Gerät benutzen will. Will der Nutzer beispielsweise den elektrisch betriebenen Backofen benutzen, kann er gleichzeitig die Solldrehzahl des BHKW dementsprechend erhöhen. Dies führt entweder zu einer höheren Raumtemperatur oder mit einem thermischen Speicher zunächst zu einer höheren Speichertemperatur. Beides ist in einem festgelegten Rahmen tolerierbar.

Da auch hier ein Eingriff durch den Nutzer erforderlich ist, hängt der Erfolg davon ab, wie oft die erlaubte Flexibilität manuell genutzt wird. Um die Nutzung der Flexibilität weiter zu erhöhen, wird das BHKW in ein Smart-Home-System eingebettet, um automatisch beim Einschalten großer Verbraucher die Solldrehzahl zu erhöhen. Das System kann so automatisch auf Verbraucher reagieren. Ein Eingriff durch den Nutzer ist nicht mehr nötig.

#### **Steuerung des BHKWs mit der SPS**

Um die genannten Punkte bei den Probanden umzusetzen, bedarf es einer Anpassung des Systems. Wie in Abbildung 7.1 dargestellt, wurde dazu die Steuerung des BHKW mittels einer RS232-Verbindung zur SPS realisiert, da das BHKW einen RS232-Wartungsanschluss besitzt und eine Nachrüstung der bestehenden SPS mit einer RS232-Klemme unkompliziert ist.

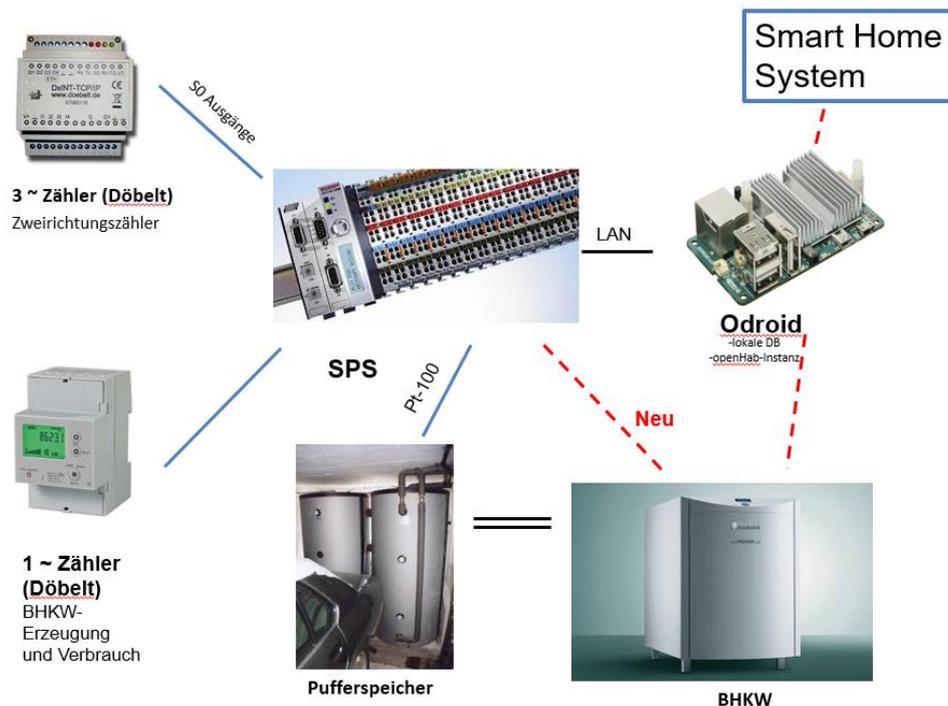


Abbildung 7.1: Aufbau des erweiterten Systems

Voraussetzung für die Steuerung ist zwingend eine Offenlegung des Kommunikationsprotokolls seitens des Herstellers. Somit sind auch eine Darstellung und Steuerung über die bisher vorhandene SPS-eigene Visualisierung möglich. Die Programmierung der SPS enthält mehrere Schutzmechanismen, die nach einem manuellen Eingriff das System vor ungewolltem Verhalten und Beschädigung schützen. Es wird eine maximale Speichertemperatur definiert und überwacht, ob Strom ins Netz eingespeist wird und die Zeit seit dem letzten manuellen Eingriff. Bei Überschreitung der erlaubten Grenzen schaltet die SPS das BHKW wieder in den automatischen wärmegeführten Betrieb. Diese Schutzmechanismen verhindern, dass bei einer manuellen Einstellung der Drehzahl das Energiesystem in einer ökonomisch und ökologisch unerwünschten Situation verbleibt oder Teile des Systems beschädigt werden.

### Kommunikation der SPS mit openHAB

Um die Flexibilität auf Erzeugungsseite besser auszunutzen und von Eingriffen des Nutzers weniger abhängig zu sein, ist die Vernetzung der BHKW-Steuerung mit einem Smart-Home System möglich. Da die SPS nicht direkt mit einem Smart-Home System kommunizieren kann, ist ein Mittler erforderlich. Als weitentwickelte Plattform mit vielen Möglichkeiten bietet sich openHAB an. OpenHAB ist eine quelloffene Gebäudeautomatisierungsplattform, die über eine Vielzahl von verfügbaren Modulen verfügt. Als Kommunikationsplattform, die beide Systeme verstehen, bietet sich Modbus TCP an. Über verschiedene Variablen kann die Steuerung des BHKW somit auch an openHAB abgetreten werden.

In Abbildung 7.1 ist zu erkennen, dass der vorhandene Odroid Mini-PC die openHAB Software hostet. Die Erweiterung des Gesamtsystem mit openHAB benötigt somit keine neue Hardware

vor Ort. OpenHAB unterstützt die Einbindung einer Vielzahl von Smart Home Systemen (Livisi (ehemals RWE/innogy), Bosch Smart-Home, Homematic IP, etc.). Für die Einbindung sind in den meisten Fällen nur eine Internetverbindung sowie die Zugangsdaten des Smart-Home Systems nötig. Die verschiedenen Geräte werden in der Regel automatisch von openHAB gefunden und korrekt im System eingerichtet. OpenHAB ist darüber hinaus in der Lage komplexe Regeln auszuführen, die vorher einprogrammiert werden. So ist es möglich, abhängig von der aktuellen Erzeugungssituation, auf den Betriebsstatus von im Smart-Home System eingebundenen Verbrauchern zu reagieren und demnach das BHKW zu steuern.

Als weitere Möglichkeit den Komfort zu erhöhen und die Hemmschwelle zur manuellen Benutzung der Flexibilität durch den Nutzer zu verringern, ist eine Einbindung des BHKW in eine intelligente Sprachsteuerung wie Amazon Alexa oder Google Home möglich. Durch die einfache Interaktion mittels Sprache sinkt der Aufwand der Einstellung und damit erhöht sich potenziell die Nutzung der erlaubten Flexibilität. Da eine Drehzahlregelung im Feld vom BHKW-Hersteller nicht freigegeben wird, kann der ursprünglich im Antrag vorgesehene Ansatz nicht im Feld eingesetzt werden und wurde nicht weiterverfolgt. Stattdessen wird eine Drehzahlregelung im Labor umgesetzt, simuliert und durch Emulation abgeglichen (siehe Kapitel 7.1.3).

### **7.1.2 Untersuchung der Regelbarkeit des Beispiel-BHKWs**

In der Hochschule Ruhr West befindet sich ein BHKW-Versuchslabor, das unter anderem mit einem Hydraulikprüfstand, einem Speicher, einem Heizregister sowie einem BHKW der Marke Vaillant ausgerüstet ist. Das erdgasbetriebene BHKW Modell ecoPOWER 4.7 hat eine elektrische Nennleistung von 4,7 kW und eine thermische Nennleistung von 12,5 kW. Die variable Drehzahl reicht von  $1.400 \text{ min}^{-1}$  bis  $3.600 \text{ min}^{-1}$ . Das BHKW ist ein konventioneller Hubkolbenmotor, dessen Kompressionsvolumen  $272 \text{ cm}^3$  beträgt.

Die umfangreiche Messausstattung erlaubt es, Temperaturen, Durchflüsse, Wärmeströme, den Erdgasverbrauch, die erzeugte Energie sowie die Drehzahl des BHKW auszulesen.

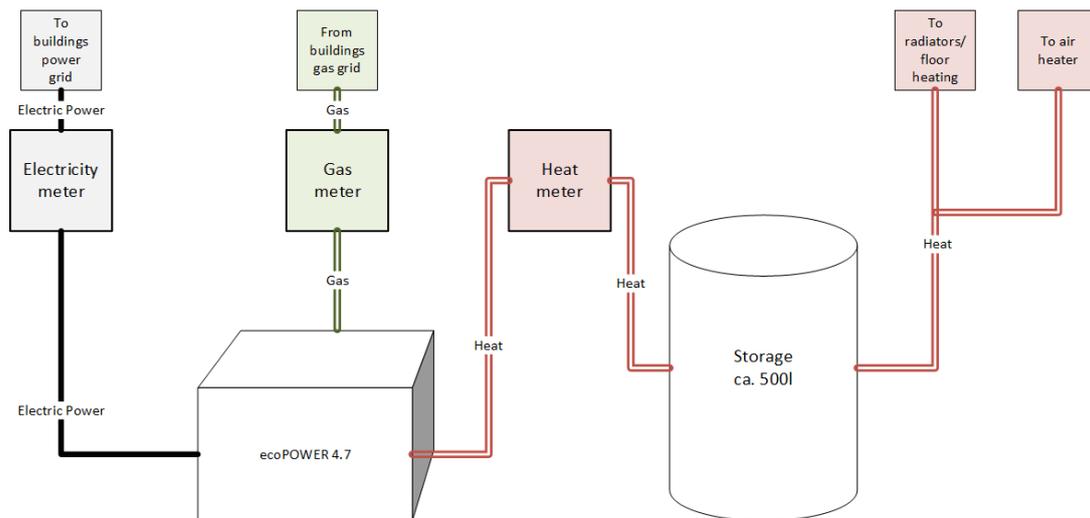


Abbildung 7.2: Schematischer Aufbau des Systems

In Abbildung 7.2 ist zu sehen, dass das BHKW wärmeseitig direkt am Speicher angeschlossen ist. Elektrisch ist das BHKW am Versorgungsnetz angeschlossen. Zusätzlich ist das BHKW am Gasnetz angeschlossen. Die Wärmeströme des BHKW und der Verbraucher werden mit Wärmemengenzähler ermittelt. Außerdem erfolgt eine Messung des Gasverbrauchs und der elektrischen Erzeugung des BHKW.

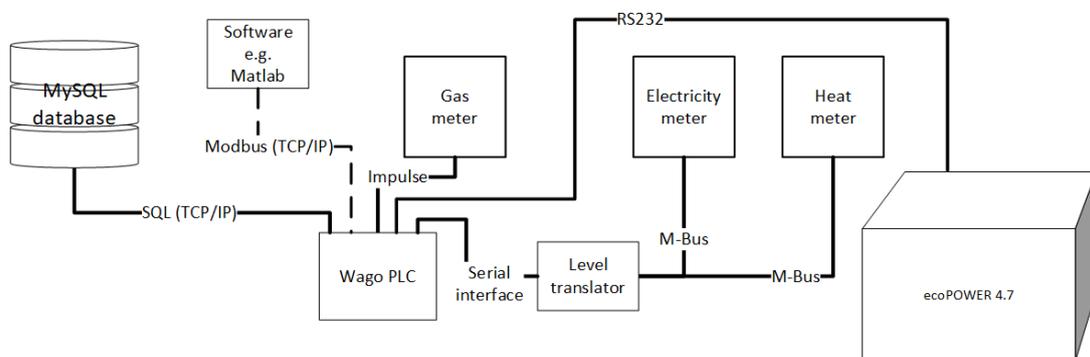


Abbildung 7.3: Schematischer Aufbau der Kommunikation des BHKWs und der Messgeräte

Die Abbildung 7.3 stellt dar, dass das BHKW mittels RS232 an einer SPS angebunden ist, die mit Hilfe des vom Hersteller bereit gestellten Kommunikationsprotokolls das BHKW steuern kann. Unter anderem kann das BHKW an- und ausgeschaltet sowie die Solldrehzahl eingestellt werden. Die SPS wiederum erhält für die Versuche Befehle aus der Software Matlab, die über Modbus verbunden ist. Der Gaszähler ist ein Impulszähler und die gemessenen Energieströme werden mittels M-Bus ausgelesen. Alle Daten werden von der SPS direkt in eine MySQL-Datenbank protokolliert.

Alle Messungen werden am beschriebenen Beispiel-BHKW vorgenommen. Aus den Messungen lassen sich für andere BHKW qualitative Rückschlüsse ziehen.

### Teillastverhalten des BHKWs

Um das Potenzial einer erweiterten Regelung des BHKW zu bewerten, muss analysiert werden, wie sich BHKW bei unterschiedlichen Solldrehzahlen verhalten. Stellvertretend für alle BHKWs wird das im Labor zur Verfügung stehende BHKW untersucht.

Es wird von der unteren bis zur oberen Drehzahlgrenze in Schritten von 50 U/min das Drehzahlband durchlaufen, wobei jeder Schritt ausreichend lange gefahren wird, sodass ein stationärer Betriebspunkt sichergestellt ist. Anschließend wird eine Interpolation der Messwerte vorgenommen, um einen ausreichend präzisen Zusammenhang zwischen der Wärme- und Stromerzeugung des BHKWs und der Drehzahl zu ermitteln.

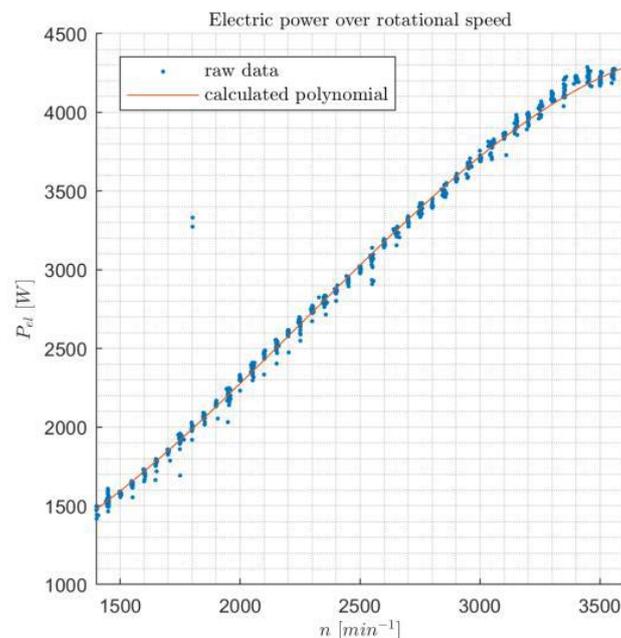


Abbildung 7.4: Gemessene elektrische Leistung über das Drehzahlband.

In Abbildung 7.4 ist die gemessene elektrische Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl dargestellt. Die Leistung verhält sich über einen großen Teil des Drehzahlbandes linear, wobei es Abweichungen bei sehr kleinen und sehr großen Drehzahlen gibt. Insgesamt beschreibt ein Polynom 3. Ordnung die Kurve hinreichend genau.

$$P_{el} \approx -\frac{2}{11455300} \cdot \frac{W_{el}}{\text{min}^{-3}} \cdot n^3 + \frac{33}{27812} \cdot \frac{W_{el}}{\text{min}^{-2}} \cdot n^2 - \frac{947}{808} \cdot \frac{W_{el}}{\text{min}^{-1}} \cdot n + \frac{16530}{13} \cdot W_{el} \quad \text{F. 7.1}$$

Außerdem ist bei gleicher Drehzahl eine Varianz der elektrischen Erzeugung zu sehen. Die Auswirkungen der Varianz werden beim Folgen eines Lastgangs weiter untersucht.

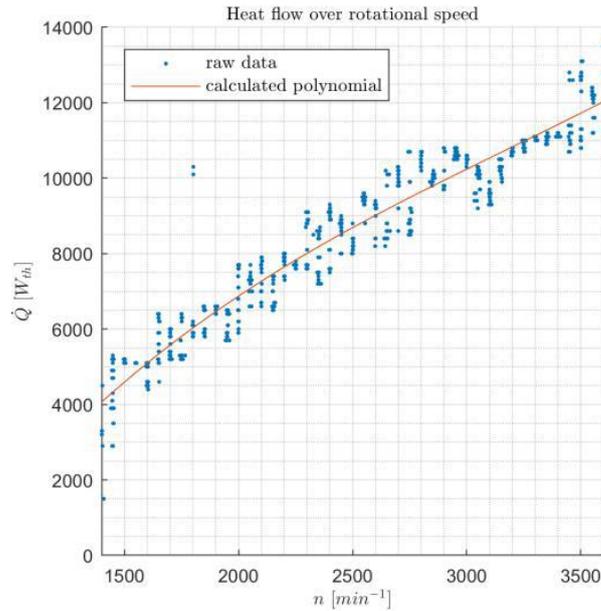


Abbildung 7.5: Gemessene thermische Leistung über das Drehzahlband.

In Abbildung 7.5 ist die thermische Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl aufgetragen. Auch hier ist ein linearer Verlauf zu erkennen, der vor allem bei kleinen Drehzahlen abweicht. Die thermische Leistung ist nicht so konstant wie die elektrische Leistung. Ursächlich dafür ist die höhere Anzahl an involvierten Anlagenteilen, die alle eine Variabilität und thermische Speicherfähigkeit aufweisen. Des Weiteren verfügt das BHKW über eine automatische variable Rücklauf-temperaturerhöhung, die vom BHKW selbst, je nach Anforderung, gesteuert wird. Die Varianz beträgt bei gleicher Drehzahl bis zu 3,3 kW. Ein Polynom 3. Ordnung beschreibt auch die thermische Leistung ausreichend genau.

$$\dot{Q} \approx \frac{1}{3758900} \cdot \frac{W_{th}}{\text{min}^{-3}} \cdot n^3 - \frac{73}{28912} \cdot \frac{W_{th}}{\text{min}^{-2}} \cdot n^2 + \frac{3215}{294} \cdot \frac{W_{th}}{\text{min}^{-1}} \cdot n + \frac{70262}{10} \cdot W_{th} \quad \text{F. 7.2}$$

Im Gegensatz zur elektrischen Leistung ist die thermische Leistung von mehreren Variablen abhängig, wie die Leitungsverluste bis zum Speicher, die Rücklauf-temperatur oder thermische Einschwingvorgänge, die auch von der thermischen Speicherfähigkeit der einzelnen Komponenten abhängt.

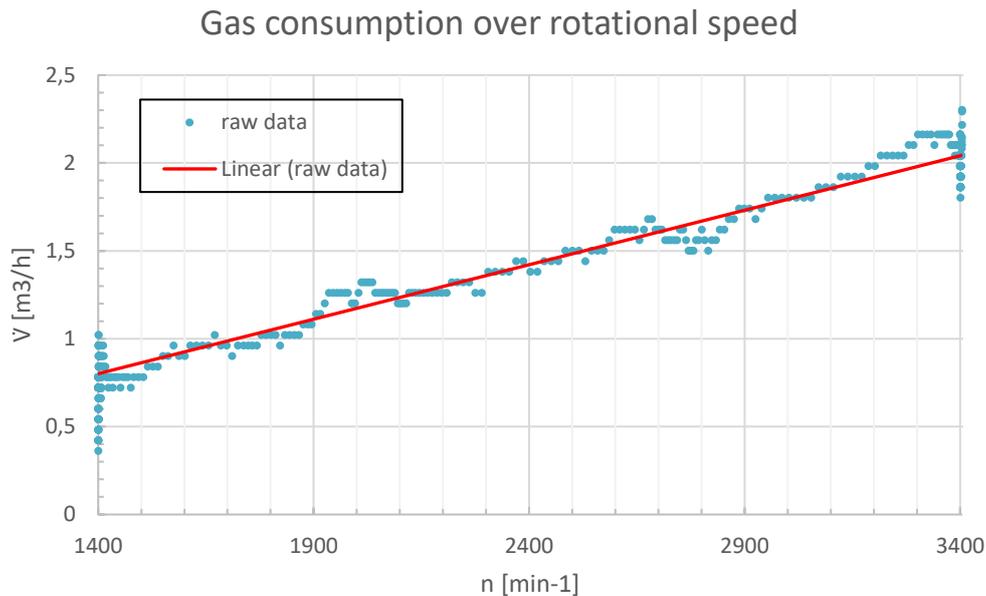


Abbildung 7.6: Gasverbrauch über der Drehzahl

In Abbildung 7.6 ist zu erkennen, dass der Gasverbrauch des BHKW in Abhängigkeit der Drehzahl nahezu linear ist. Werden die offensichtlich fehlerbehafteten Werte ausgefiltert, beschreibt eine Lineare den Gasverbrauch des BHKW ausreichend präzise.

$$\dot{V}_{gas} \approx \frac{3}{5000} \cdot \frac{m^3}{h \cdot min^{-1}} \cdot n - \frac{133}{2000} \cdot \frac{m^3}{h} \quad \text{F. 7.3}$$

Insgesamt ist das Teillastverhalten des betrachteten BHKW gut. Wie zu erwarten nehmen sowohl thermische als auch elektrische Leistung bei steigender Drehzahl zu. In keinem Teilbereich gibt es eine beträchtliche Abnahme des Gesamtwirkungsgrads, der einen Betrieb in diesem Bereich ausschließt. Zu erkennen ist allerdings, dass die thermische Leistung bei sehr kleinen Drehzahlen stärker abnimmt, dafür aber die elektrische Leistung weniger stark sinkt. Erwähnenswert ist außerdem der nichtlineare Anstieg der elektr. Leistung bei hohen Drehzahlen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass das BHKW bei sehr hoher und sehr niedriger Drehzahl etwas an Gesamtwirkungsgrad einbüßt. Im mittleren Drehzahlbereich verhält sich das BHKW im Mittel allerdings nahezu linear.

### Sprungantwortverhalten des BHKWs bei veränderter Solldrehzahl

Ein weiteres Kriterium, welches das Potenzial einer erweiterten Regelung begrenzt, ist die Zeit, die das BHKW braucht, um eine neue Solldrehzahl anzufahren. Dabei gilt, dass die Zeit zum Anfahren einer neuen Solldrehzahl möglichst gering sein sollte. Untersucht wird das Verhalten des BHKW, indem die Solldrehzahl verändert wird und die Sprungantwort der Drehzahl des BHKW aufgezeichnet wird.

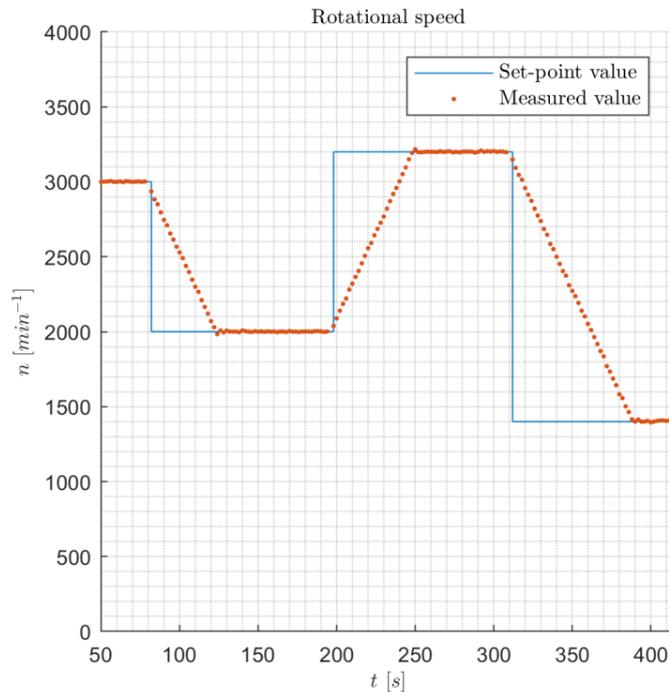


Abbildung 7.7: Exemplarische Sprungantworten des BHKW bei veränderter Soll Drehzahl

In Abbildung 7.7 sind exemplarisch drei Sprungantworten zu sehen, die stellvertretend für eine Vielzahl von Messungen stehen. Es fällt auf, dass die Regelung sich nicht wie ein  $PT_1$ - oder  $PT_2$ -Glied verhält. Das Differential der Drehzahländerung weist keine Abhängigkeit von der Differenz zum Sollwert auf und ist stets konstant. Stattdessen wird die neue Drehzahl mit einer linearen Änderung der Drehzahl angefahren. Da die Drehzahländerung für einen Kolbenmotor dieser Art und Größe auffällig langsam geschieht, liegt die Vermutung nahe, dass die Regelung des Motors den neuen Sollwert mit kleinen hier nicht messbaren Schritten anfährt. Auffällig ist, dass eine positive Drehzahländerung genauso schnell wie eine negative Drehzahländerung ausgeführt wird. Die Steigung beträgt dabei sowohl für steigende sowie sinkende Drehzahlen im Mittel etwa  $\pm 22,8 \text{ min}^{-1}/\text{s}$ . Beispielsweise benötigt der Sprung von der niedrigsten Drehzahl von  $1.400 \text{ min}^{-1}$  bis zur höchsten Drehzahl von  $3.600 \text{ min}^{-1}$  daher etwa 96 s.

### Ein-/Abschaltverhalten des BHKWs

Ist eine erweiterte Regelung des BHKW vorgesehen, so wird es auch Situationen geben in denen das BHKW optimalerweise nicht läuft. Da das BHKW ein Hubkolbenmotor ist, der eine minimale Drehzahl von  $1.400 \text{ min}^{-1}$  aufweist, ist eine gesonderte Modellierung des Anfahr- und Abfahrverhaltens notwendig. Aufgrund dessen wird das Verhalten des BHKW beim Anfahren und Abfahren untersucht.

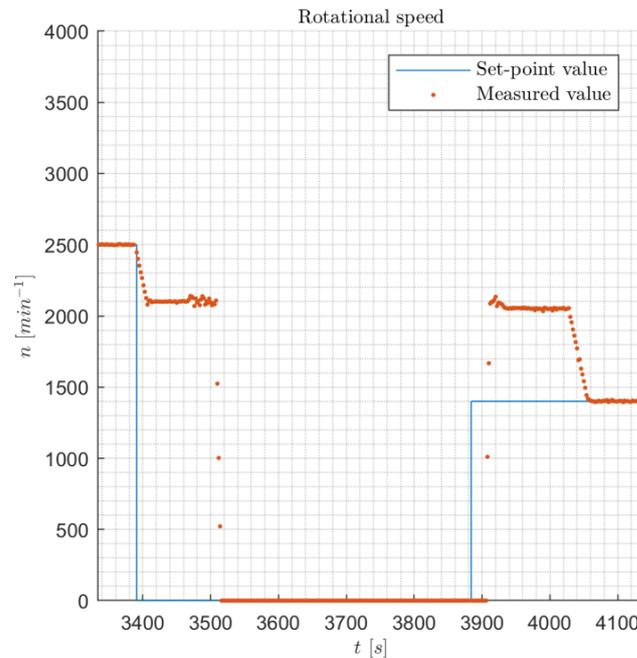


Abbildung 7.8: Exemplarische An- bzw. Abfahrvorgänge

In Abbildung 7.8 ist zu erkennen, dass das BHKW auf eine Änderung der Solldrehzahl auf  $0 \text{ min}^{-1}$  sofort mit einem Absenken der Drehzahl auf  $2.050 \text{ min}^{-1}$  mit dem von Abschnitt „Sprungantwortverhalten des BHKWs bei veränderter Solldrehzahl“ (s.o.) bekannten Drehzahlgradienten reagiert. Nach einer Verweilzeit von etwa  $100 \text{ s}$  bei  $2.050 \text{ min}^{-1}$  wird die Brennstoff- und Luftzufuhr des BHKW abgeschaltet und es erreicht dann zügig den Stillstand. Auffällig ist, dass die Drehzahl etwa  $40 \text{ s}$  vor dem Erreichen des Stillstands unbeständig wird. Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass der Generator abgekoppelt wird und der Motor ohne angeschlossenen Generator, also ohne angeschlossene Last, sensibler auf Schwankungen der Erdgas- und Luftzufuhr reagiert.

Aus dem Stillstand startet das BHKW nach der Änderung der Solldrehzahl auf  $1.400 \text{ min}^{-1}$  nach etwa  $30 \text{ s}$  und fährt direkt eine Drehzahl von  $2.050 \text{ min}^{-1}$  an. Nach etwa weiteren  $20 \text{ s}$  ist der Generator in Betrieb und erzeugt elektrische Energie. Thermische Energie wird in Abhängigkeit der Kühlwassertemperatur des Motors erst später ausgespeist, um die Betriebstemperatur des Motors möglichst schnell auf  $75 \text{ °C}$  zu erhöhen. Das initiale thermische Verhalten des BHKW ist also bestimmt von der Starttemperatur. Ebenso ist die Zeit, die das BHKW bei einer Drehzahl von  $2.050 \text{ min}^{-1}$  verweilt, davon abhängig, welche Betriebstemperatur das BHKW am Anfang aufweist. Ist die Betriebstemperatur des BHKW noch nah der optimalen Betriebstemperatur, dann wird die eingestellte Solldrehzahl schnell angefahren. Wird allerdings ein Kaltstart durchgeführt, verweilt das BHKW sehr viel länger bei einer Drehzahl von  $2050 \text{ min}^{-1}$ . Grund dieses Verhaltens ist laut [58] der interne Regler des BHKW, der versucht, möglichst schnell die Betriebstemperatur zu erreichen, um die Lebensdauer des BHKW zu erhöhen.

## Verhalten des BHKWs beim Folgen eines Lastgangs

Um die gewonnenen Erkenntnisse und Zusammenhänge für eine weitere Verwendung zu validieren, wird ein Abgleich zwischen Simulation und Praxis durchgeführt. Dazu wird ein vorgegebener Lastgang bei Zuhilfenahme der gewonnenen Erkenntnisse simuliert sowie praktisch nachgefahren. Die Parameter des Lastgangs basieren auf [59], wobei ein elektrischer Verbrauch von 25.000 kWh angenommen wurde, der sich aus 5.300 h Betriebszeit [60] ergibt. Aufgrund der Variabilität wurde der 07.11.2017 als Vergleichstag ausgewählt. Es wurden zwei 6-stündige Lastgänge in einer Auflösung von 15 Minuten betrachtet.

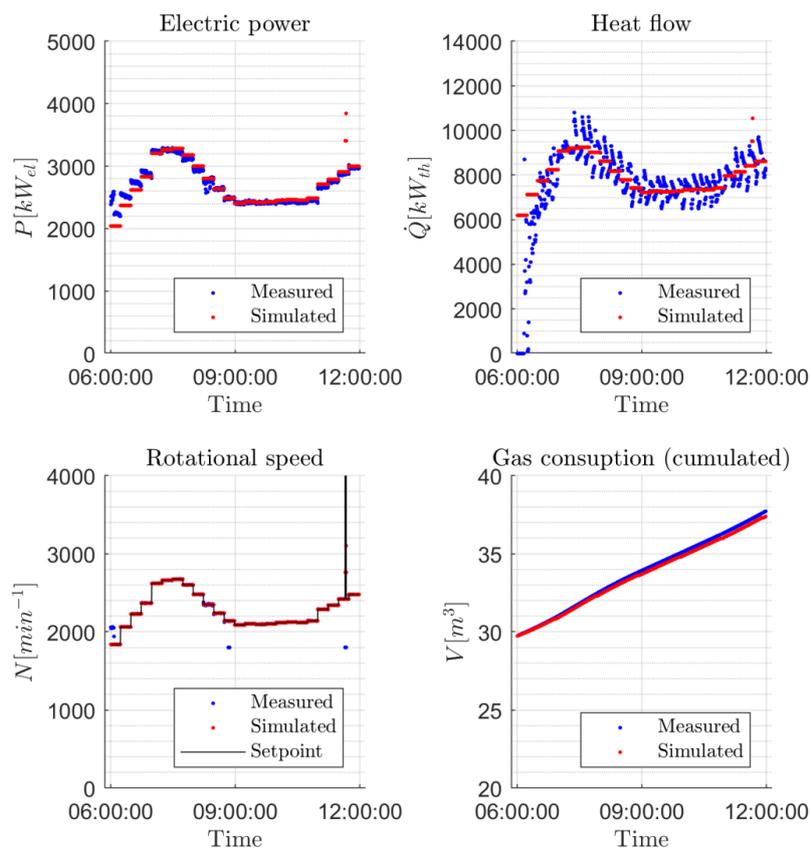


Abbildung 7.9: Abfahren eines Lastgangs (Datensatz 1: 07.11.2017 06:00 bis 12:00) zum Vergleich zwischen Simulation und Praxis

In Abbildung 7.9 sind die Ergebnisse der Simulation und des praktischen Versuchs zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Simulation die Praxis gut nachbildet. Abweichungen gibt es lediglich anfänglich bei der erzeugten elektr. Energie. Zudem scheint die gemessene thermische Leistung mit einer großen Varianz um den simulierten Wert zu oszillieren. Die Abweichung der thermischen Erzeugung erreicht ein Maximum von knapp 2 kW.

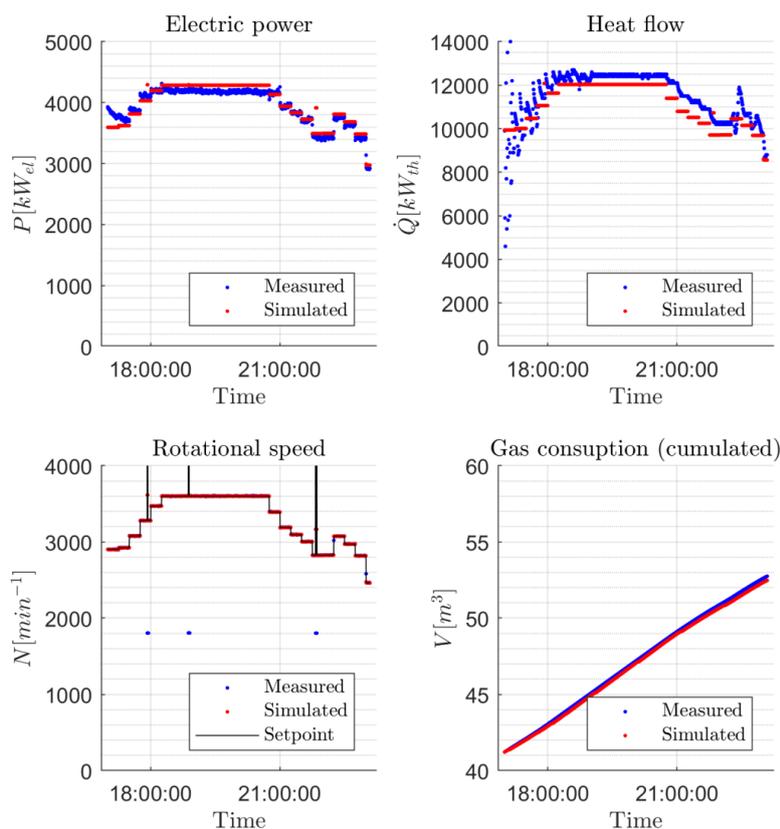


Abbildung 7.10: Abfahren eines Lastgangs (Datensatz 2: 07.11.2017 17:00 bis 23:00) zum Vergleich zwischen Simulation und Praxis

In Abbildung 7.10 ist zu erkennen, dass beim zweiten betrachteten Lastgang die Drehzahl und der Gasverbrauch wieder gut mit der Simulation übereinstimmt. Bei der elektrischen und thermischen Leistung sind allerdings signifikante Abweichungen zu erkennen.

Mögliche Gründe für die Abweichungen sind im Bereich der Rahmenbedingungen zu suchen. Zu nennen wären hier vor allem Unterschiede in der initialen Betriebstemperatur, der Speichertemperatur und der Raumtemperatur, in der das BHKW steht. Es ist keine Ursache für die langanhaltende Abweichung der elektr. Erzeugung bekannt.

Tabelle 7.1: MAPE der Versuchsläufe

Datensatz	n	$P_{el}$	Q	$V_{Gas}$
1	0,35 %	1,92 %	36,38 %	0,54 %
2	0,51 %	1,98 %	5,35 %	0,37 %

In Tabelle 7.1 ist zu erkennen, dass der mittlere relative Fehler der Drehzahl und des Gasverbrauchs gering ist. Der mittlere relative Fehler der elektr. Leistung liegt dagegen in beiden Durchläufen schon bei knapp 2 %. Die Oszillation der thermischen Leistung in Durchlauf 1 führt

zu einer großen mittleren relativen Abweichung von über 36 %. Die hohe mittlere relative Abweichung der thermische Leistung kann zusätzlich noch damit erklärt werden, dass thermische Energien relativ gesehen zu elektrischen Energien aufgrund der Wärmekapazität der beteiligten Komponenten und des begrenzten Temperaturgradienten einer gewissen Trägheit unterliegen.

Der aufsummierte relative Fehler ist im Gegensatz zum mittleren relativen Fehler deutlich geringer und beträgt bei der elektrischen Leistung -0,22 % (Datensatz 1) und 0,89 % (Datensatz 2). Bei der thermischen Leistung beträgt er 3,91 % (Datensatz 1) bzw. -3,75 % (Datensatz 2).

Abschließend ist festzustellen, dass die Simulation vor allem im Bereich der thermischen Leistung die Realität nicht zufriedenstellend darstellt, sodass für eine zu entwickelnde Regelung des BHKW die ermittelten Formeln eine Unsicherheit beinhalten, die sich negativ auswirken kann. Um die Auswirkungen des teilweise unterschiedlichen Verhaltens zu untersuchen und weiter zu beurteilen wurde in Abschnitt „Emulation“ ein Praxisversuch durchgeführt und mit dem theoretischen Modell verglichen.

### **7.1.3 Analyse des Potenzials des Raums als thermischer Speicher**

Da die erzeugte thermische und elektrische Leistung eines BHKW direkt voneinander abhängig sind, ist die vorhandene Flexibilität des BHKW beschränkt. Der Standard ist bisher eine wärmegeführte Regelung, da im Gegensatz zum Strom für die Wärme in der Regel kein Netz zur Einspeisung oder Ausspeisung zur Verfügung steht. Elektrisch ist das BHKW mit dem Versorgungsnetz verbunden und kann somit überschüssigen Strom einspeisen. Falls das BHKW nicht genug Strom erzeugt, wird elektrische Energie aus dem Netz bezogen. Die elektrische Erzeugung und der Verbrauch sind somit technisch unabhängig voneinander.

Um die Flexibilität zu erhöhen, kann ein Speicher eingesetzt werden. Im Bereich der elektrischen Energie kann z. B. ein Batteriespeicher eingesetzt werden, um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen und so Kosten zu sparen. Diese Systemkombination wird in Abschnitt 7.2 betrachtet. Im Bereich der Wärme erlaubt ein Wärmespeicher dem BHKW zusätzliche zeitliche Flexibilität bei der Versorgung der thermischen Last.

Eine Möglichkeit ist es, den beheizten Raum, also die Wohnung oder das Büro, als Wärmespeicher einzusetzen. Zum einen speichert ein Raum durch seine eingeschlossene Luftmasse sowie die enthaltene Masse an Möbeln, Geräten etc. Wärme. Des Weiteren wird im Boden, der Decke und den Wänden weitere thermische Energie gespeichert. Zusammen mit einer variablen Solltemperatur kann so ein Speicher erschlossen und genutzt werden. Die Temperatur des Raums wird abhängig von den Gegebenheiten erst mit einer Verzögerung auf die Änderung der eingebrachten Heizenergie reagieren. Der beschriebene Speicher wird im Grunde schon breit im Feld in Form einer Nachtabenkung eingesetzt. Zusätzlich benötigt der beschriebene thermische Speicher keinen Platz und ist anders als eine Batterie oder ein konventioneller Wärmespeicher nicht mit Anschaffungskosten verbunden.

Nachfolgend wird untersucht, ob und wie viele ökonomische und ökologische Vorteile aus der zusätzlichen Flexibilität gezogen werden können. Dabei erfolgt auch ein Vergleich mit einem herkömmlichen Wärmespeicher sowie einer Kombination von Beiden.

### Temperaturgrenzen des Raums als Speicher

Das primäre Ziel des Heizungssystems ist es die thermische Behaglichkeit im Raum sicherzustellen. Dieses Ziel soll auch weiterhin erfüllt sein. Einschränkungen werden allerdings zugelassen. Zu beachten ist, dass die Einschränkungen sehr geringgehalten werden müssen, um die Nutzerakzeptanz nicht zu verringern. Für die Einschätzung der Nutzerakzeptanz wird die Norm DIN EN ISO 7730:2005 [61] herangezogen. In der Norm wird mit dem PMV (*predicted mean vote*) und dem PPD (*predicted percentage of dissatisfied*) aufgezeigt welche Zufriedenheit unter welchen Voraussetzungen bei welcher Temperatur des Raums zu erwarten ist. Nach der Norm DIN EN ISO 7730 werden folgende Werte angenommen:

- Bekleidungsisolationswert: 1. Dies entspricht Winterkleidung, welche in Innenräumen getragen wird.
- Energieumsatz: 1,2 met. Dies entspricht einer sitzenden Tätigkeit.
- Luftfeuchte: 50 %
- Luftgeschwindigkeit: 0,1 m/s
- Zusätzliche körperliche Arbeit: nicht vorhanden
- Es wird angenommen, dass die Strahlungstemperatur der Raumtemperatur entspricht.

Daraus ergibt sich eine optimale Temperatur von 21,5 °C, ein PMV-Wert von -0,01 und ein PPD-Wert von 5,0 %.

Weitere Faktoren, die einen Einfluss auf die Behaglichkeit haben könnten, wie ein örtlicher (Fußbodenheizung) oder zeitlicher (variierende Raumtemperatur) Temperaturgradient, werden in der Betrachtung nicht berücksichtigt.

Zu beachten ist, dass die Nutzung des Raums als Speicher an Akzeptanz verliert, wenn die Nutzer des Raums nicht den Begünstigten entsprechen. Beispielsweise ist anzunehmen, dass ein durch den Arbeitgeber erschlossenes Einsparpotenzial durch eine variable Solltemperaturregelung in den Büroräumen zu einer geringeren Akzeptanz der Arbeitnehmer führen, als wenn diese die Regelung in ihrem eigenen Wohnhaus umsetzen würden.

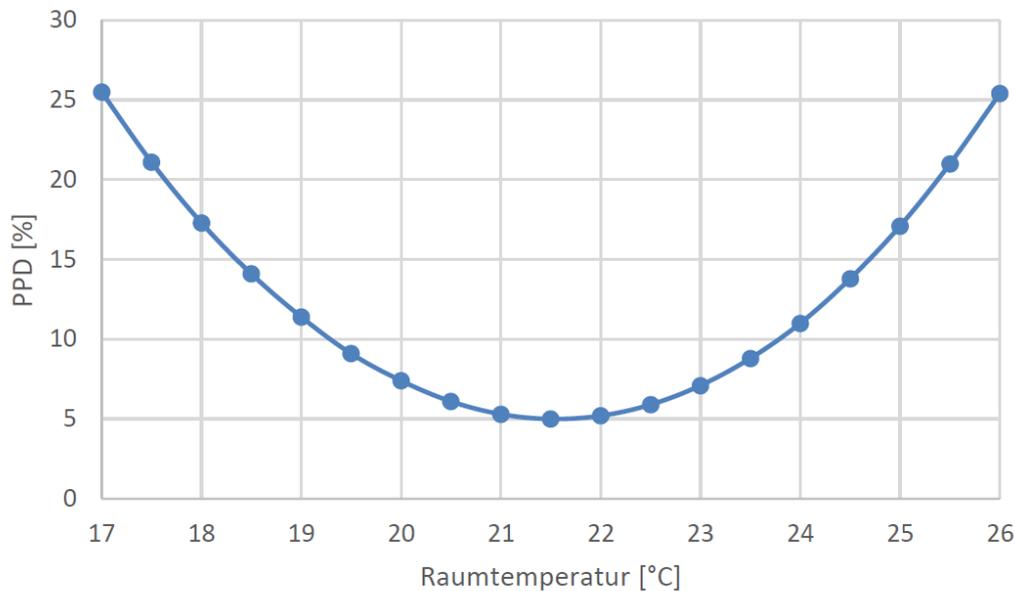


Abbildung 7.11: PPD Darstellung bei Veränderung der Raumtemperatur [Berechnung nach DIN EN ISO 7730]

In Abbildung 7.11 ist zu erkennen, wie sich eine veränderte Raumtemperatur auf die Zufriedenheit der Nutzer auswirkt. Beispielsweise ist der Anteil an unzufriedenen Nutzern bei einer Solltemperaturabweichung von  $+3\text{ °C}$  immer unter 15 %. Wird nur eine Flexibilität der Solltemperatur von  $+1\text{ °C}$  erlaubt, erhöht sich der Anteil an unzufriedenen Nutzern nur von 5 % auf knapp über 6 %. Dies bedeutet, dass die beschriebene Flexibilität mit einer nur geringen Auswirkung auf die Behaglichkeit einhergeht. Abhängig vom konkreten Nutzer kann die beschriebene Flexibilität allerdings auch zu einer nicht erwünschten Unzufriedenheit des Nutzers führen.

## Modellbildung

Das simulierte Modell entspricht grundsätzlich dem Schema in Abbildung 7.2, wobei die maximale Drehzahl des BHKW aufgrund der Erkenntnisse in Kap. 7.1.2 auf  $3.400\text{ min}^{-1}$  beschränkt wird. Die Beschränkung ermöglicht es für die Simulation der Erzeugung und des Verbrauchs lineare Gleichungen zu verwenden. Des Weiteren wird potenziell die Lebensdauer des BHKW erhöht, da die maximale Drehzahl des BHKW laut Hersteller im Normbetrieb standardmäßig  $3.400\text{ min}^{-1}$  beträgt. Für die Simulation wurde die Software Simulink verwendet. Es werden drei verschiedene Szenarien simuliert:

- Die Temperatur des Speichers wird variiert. Die Raumtemperatur lässt keine zusätzlichen Freiheiten zu.
- Die Raumtemperatur in dem betrachteten Gebäude wird variiert und es ist kein Wärmespeicher vorhanden.
- Sowohl Raum als auch Speichertemperatur werden mit einer variablen Solltemperatur betrieben.

Jedes Szenario wird sowohl für Haushalte in einem Mehrfamilienhaus als auch einen Gewerbebetrieb simuliert. Zur Einschätzung der Auswirkung auf verschiedene Stromlasten, werden jeweils vier verschiedene Stromprofile verwendet. Die Simulation läuft jeweils in der Heizperiode über 140 Tage vom 01.11. bis zum 21.03. Grundlage für den Strombedarf sind die Standardlastprofile H0 (Haushalt) und G0 (Gewerbe) [62]. Da die Standardlastprofile das Lastprofil eines einzelnen Hauses nur unzureichend beschreiben, wird jedes Lastprofil jeweils einmal unverändert und einmal verstärkt verwendet. Verstärkt bedeutet hierbei, dass die Maxima vergrößert und die Minima verkleinert wurden, ohne das Integral zu ändern.

Das Mehrfamilienhaus besteht aus zehn Wohnungen, welche jeweils einen Jahresstromverbrauch von 2.750 kWh aufweisen [63]. Die Menge wurde gewählt, so dass das vorhandene Beispiel-BHKW eine gute Dimensionierung für den betrachteten Einsatzzweck aufweist.

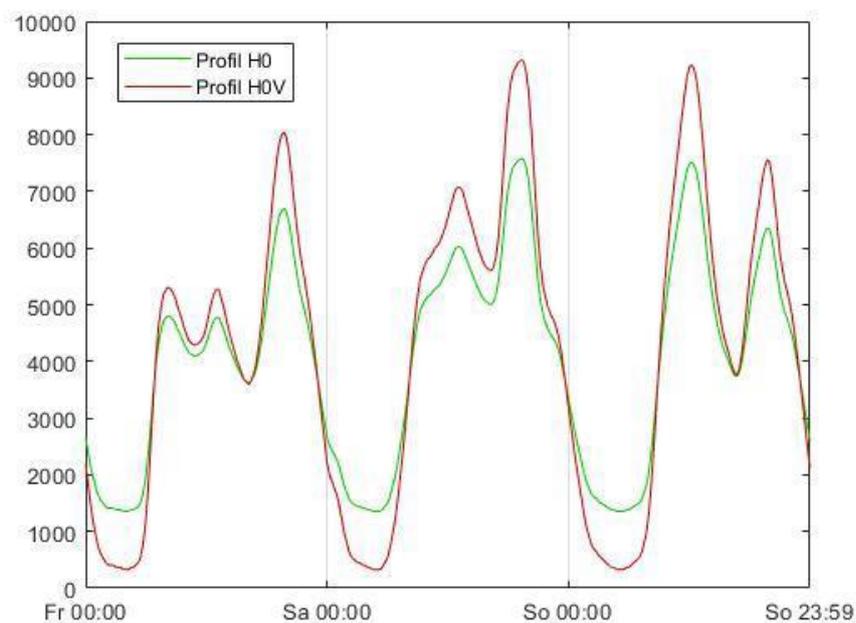


Abbildung 7.12: Darstellung des H0 Lastprofils im Winter für einen Jahresstromverbrauch von 27.500 kWh

In Abbildung 7.12 sind die verwendeten Stromlastprofile des gesamten Mehrfamilienhauses zu sehen. Das verstärkte Lastprofil H0V ist deutlich an den erhöhten Maxima und den verringerten Minima zu erkennen. Alle Wochentage entsprechen dem abgebildeten Lastgang des Freitags.

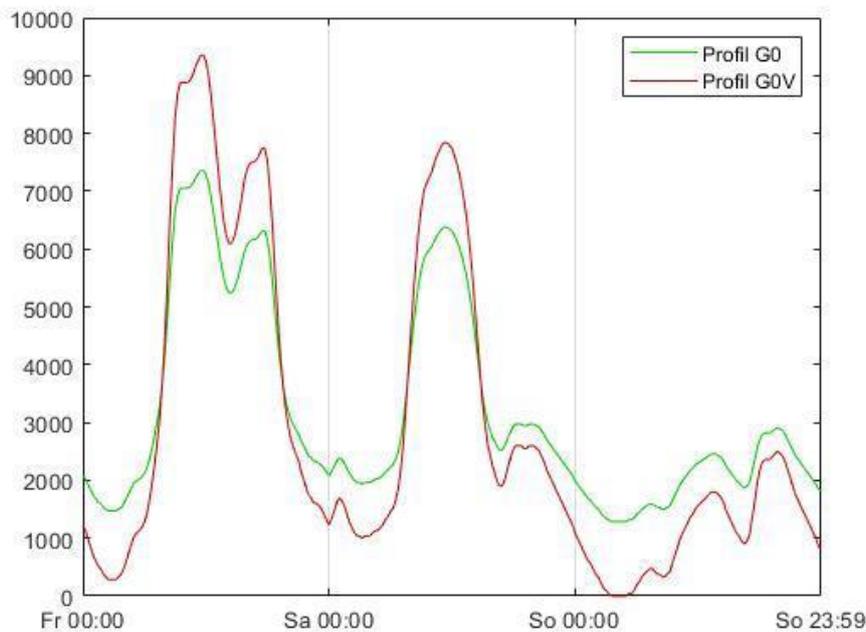


Abbildung 7.13: Darstellung des G0 Lastprofils im Winter bei einem Jahresstromverbrauch von 27.500 kWh

In Abbildung 7.13 sind äquivalent die Stromlastprofile des Gewerbes dargestellt. Auch bei der Betrachtung des Gewerbes wurde der Jahresstromverbrauch derart hochskaliert, dass das vorhandene BHKW nicht überdimensioniert ist. Aufgrund der enormen Variation von Gewerbearten (Laden, Lager, Büro etc.) ist die Verwendung des G0-Stromprofils bestenfalls eine ungenaue Näherung. Das Potenzial im realen Einsatz kann je nach Lastprofil erheblich abweichen.

Im Bereich der Wärme wird keine Standardlast verwendet, sondern es wird ein komplexes Modell des Wohnhauses bzw. des Gewerbes entwickelt, welches eine Änderung der Raumtemperatur und des zeitlichen Temperaturgradienten abbilden kann. Dies ist nötig, um den Raum als innovativen Speicher ausreichend präzise abzubilden.

Da ein BHKW in Bezug auf Vorlauftemperatur und Platzverbrauch einen alten Kessel ersetzen oder ergänzen kann und wenig in Neubauten eingesetzt wird, liegt der Fokus auf Bestandsbauten. Dementsprechend wird für die Simulation ein Gebäude mit einem typischen Aufbau aus dem Jahr 1980 verwendet. Für den mittleren U-Wert des Gebäudes wird ein Wert von 0,667 W/kWh angenommen, was mit F. 7.4 zu den Wärmedurchgangskoeffizienten in

Tabelle 7.2 führt.

$$U_{Wand} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] = \left( \frac{1}{R_1 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]} + \frac{1}{R_1 \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]} \right) \quad \text{F. 7.4}$$

Tabelle 7.2: Angenommene Variablen für die Simulation

Bezeichnung	Wert
Wärmedurchgangswiderstand Außenwand/Außen	0,75 [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]
Wärmedurchgangswiderstand Außenwand/Innen	0,75 [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]
Länge der Außenwand	18 m
Fläche der Innenwand	18,5 m <sup>2</sup>
Wärmedurchgangswiderstand- Innendwand	0,25 [ $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ ]
Mittlere Solltemperatur	21,5°C
Lüftungszeitpunkt	46800 s → 13 Uhr
Lüftungsdauer	300 s → 5 Minuten
Grundfläche	60 m <sup>2</sup>
Fensterfläche	6 m <sup>2</sup>
U-Wert Fenster [16]	1,5 [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]
Anzahl Einheiten	10

In

Tabelle 7.2 sind außerdem weitere gewählte Randbedingungen dokumentiert. Zusätzlich dazu wurden folgende Randbedingungen gewählt:

- Dicke der Außenwand: 36 cm
- davon Beton: 24 cm
- davon Dämmstoff: 12 cm
- Dichte Beton: 2000 kg/m<sup>3</sup>
- Dichte Dämmstoff: 100 kg/m<sup>3</sup>
- spezifische Wärmekapazität der Außenwand: 1000 J/(kg·K)
- Dicke der Innenwand (Beton): 24 cm
- spezifische Wärmekapazität der Innenwand: 1000 J/(kg·K)
- spezifische Wärmekapazität der Luft: 1200 J/(m<sup>3</sup>·K)

Wärmeverluste über den Boden und die Dachfläche bleiben aufgrund der im Gegensatz zur Wandfläche sehr kleinen Fläche unberücksichtigt. Der Sollwert des Wärmespeichers liegt bei

65 °C. Er ist mit Wasser gefüllt, was bei einer Größe von 800 l zu einer therm. Speicherkapazität von 0,928 kWh/K führt. Die Eigenschaften der Dämmung des Wärmespeichers werden wie folgt angenommen [64]:

- U-Wert Mantelfläche und Oberseite 0,117 W/(m<sup>2</sup>\*K)
- U-Wert Boden: 0,599 W/(m<sup>2</sup>\*K)
- Höhe: 1,9 m
- Mittlerer Durchmesser: 0,89 m

Der Wärmeverlust des sensiblen Speichers an die Umgebung wird speichertemperaturabhängig simuliert.

Für das betrachtete Gewerbe sowie das Mehrfamilienhaus werden hinsichtlich des Aufbaus des Gebäudes die gleichen Rahmenbedingungen angenommen.

### Regelstrategie

Das primäre Ziel der Regelung des BHKW ist die Bereitstellung der angeforderten Wärmeenergie, um die Behaglichkeitsanforderungen aufrecht zu erhalten. Sekundäres Ziel ist die Bereitstellung der Energie mit möglichst geringen Kosten und wenig Emissionen. Beim Betrieb eines BHKW erhöht sich die Wirtschaftlichkeit in der Regel je mehr elektr. Eigenverbrauch realisiert wird. Die entwickelten Regelstrategien weichen das primäre Ziel derart auf, dass das sekundäre Ziel maximiert werden kann. Die Grenzen bzw. die Flexibilität des primären Ziels wurden in Abschnitt „Temperaturgrenzen des Raums als Speicher“ betrachtet.

### Drehzahlregelung des BHKW

Zur Ausnutzung der beschriebenen Flexibilität wird die primäre Regelung der Raumtemperatur, um eine sekundäre Regelung erweitert.

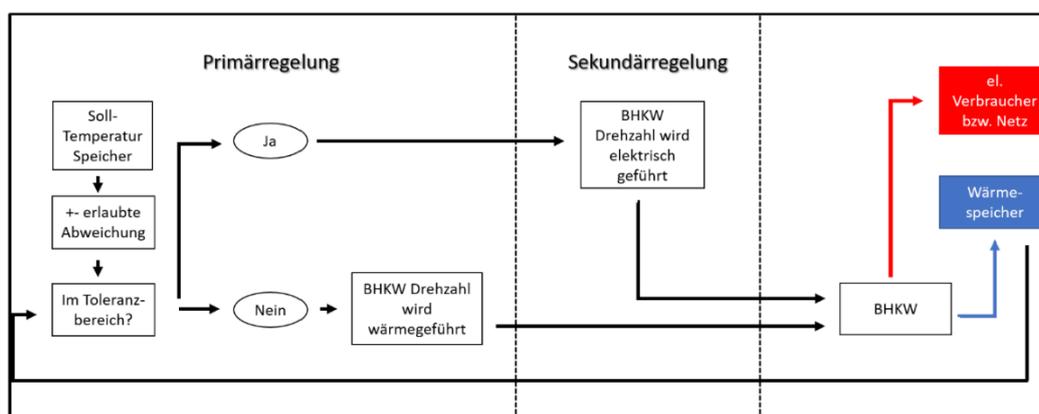


Abbildung 7.14: Primär- und Sekundärregelung für Regelungsvariante A

In Abbildung 7.14 ist die Regelungsvariante A dargestellt, in der die Speichertemperatur geregelt wird, die mit einer festgelegten Toleranz variabel ist. Es ist zu erkennen, dass das BHKW wärmegeführt betrieben wird, sobald die Speichertemperatur die erlaubte Toleranz von der mittleren Solltemperatur abweicht. Dabei wird die Drehzahl des BHKW mit folgender vereinfachter Formel 7.5 ermittelt, da die Varianz der thermischen Erzeugung ohnehin größer war als die Differenz zwischen dem Polynom aus F. 7.2 und der linearen Gleichung in F. 7.5.

$$\text{Drehzahl [RPM]} = (T_{\text{Mittel,Soll}} - T_{\text{Ist}})[K] \cdot 500 \left[ \frac{\text{RPM}}{K} \right] + \dot{Q}[W] \cdot \frac{1}{3,6885} \left[ \frac{\text{RPM}}{W} \right] \quad \text{F. 7.5}$$

Wie in der F. 7.5 erkennbar, richtet sich die Primärregelung nach der Differenz der mittleren Solltemperatur zur Speichertemperatur. Gleichzeitig wird der Wärmestrom, der den Speicher Richtung Gebäude verlässt, addiert und somit direkt beim BHKW angefordert. Das führt dazu, dass der Speicher bei einer Unterschreitung der unteren Toleranzgrenze der Solltemperatur in jedem Fall aufgeladen wird und sich wieder in Richtung der erlaubten Spanne bewegt. Im Falle einer Überschreitung der oberen Toleranzgrenze führt die primäre Regelung zu einer Drehzahl, bei der der Speicher entladen wird. Die Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Ist-Temperatur und der mittleren Solltemperatur bewirkt außerdem, dass das BHKW gleichmäßiger geregelt wird und es zu geringeren Schwankungen kommt.

Die sekundäre Regelung greift, wenn sich die Ist-Temperatur im erlaubten Toleranzbereich der Solltemperatur befindet. Die Drehzahl des BHKW wird dann nach F. 7.6 eingestellt. Auch hier wird aufgrund der vorhandenen Varianz der elektrischen Leistung als Vereinfachung eine lineare Gleichung verwendet.

$$\text{Drehzahl [RPM]} = P_{\text{el}}[W] \cdot \frac{1}{1,3672} \left[ \frac{\text{RPM}}{W} \right] \quad \text{F. 7.6}$$

Anhand der F. 7.7 ist zu erkennen, dass die Sekundärregelung das BHKW stromgeführt fährt. Es wird versucht, die komplette angeforderte elektrische Leistung durch das BHKW bereitzustellen.

Abschließend ist zur Regelungsvariante A anzumerken, dass hier ein konventioneller sensibler Wärmespeicher die Flexibilität des Gesamtsystems erhöht. Die Raumtemperatur wird nicht variiert.

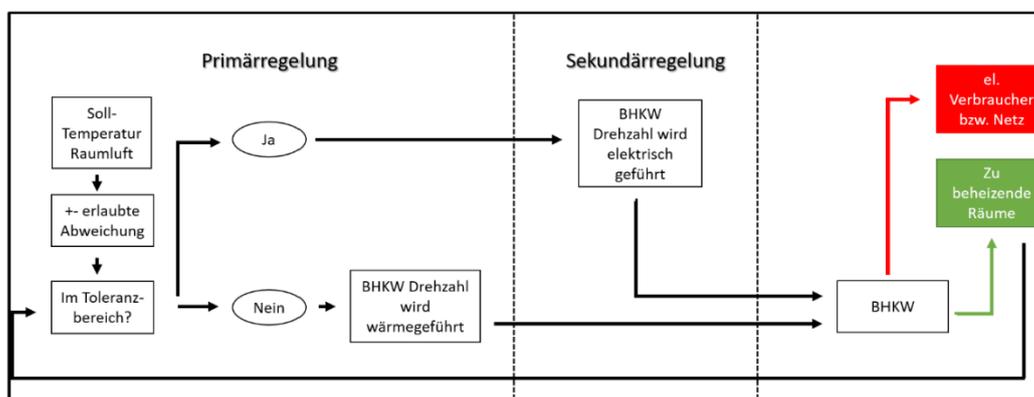


Abbildung 7.15: Primär- und Sekundärregelung für Regelungsvariante B

In Abbildung 7.15 ist die Regelungsvariante B dargestellt, deren Unterschied zu Variante A darin besteht, dass kein Speicher vorhanden ist und der Raum als innovativer Speicher genutzt wird. Der Raum nimmt den Platz des konventionellen Wärmespeichers ein. In den übrigen Punkten entspricht die Variante B der Variante A.

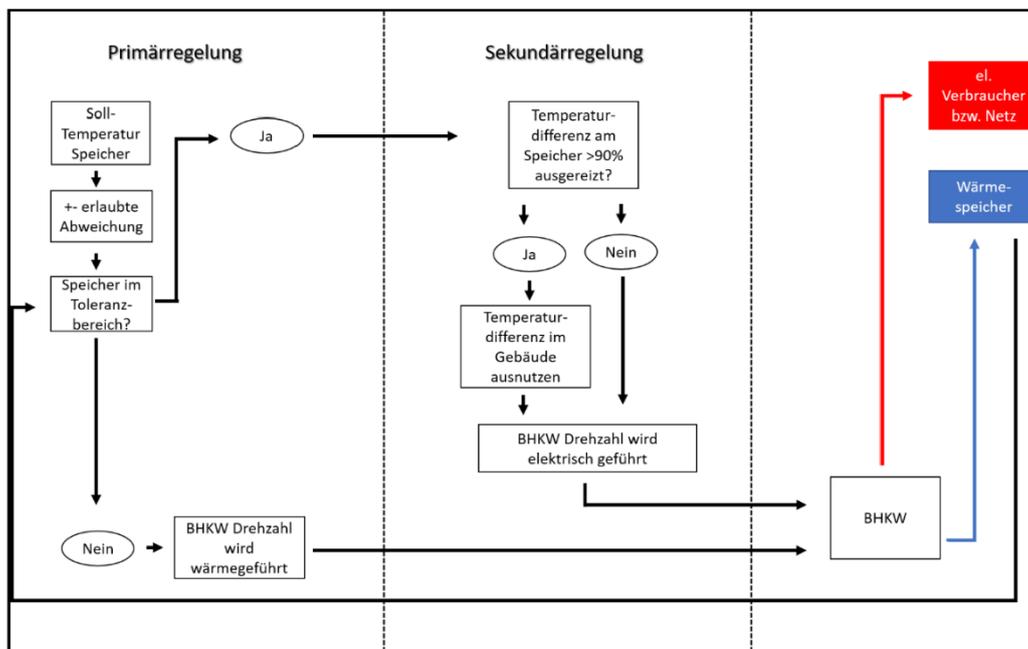


Abbildung 7.16: Primär- und Sekundärregelung für Regelungsvariante C

Abbildung 7.16 zeigt die Regelungsvariante C, in der sowohl der konventionelle Speicher als auch die Raumtemperatur als innovativer Speicher eingesetzt werden. In der Primärregelung wird wie in Variante A die Speichertemperatur geregelt. Ist 90 % der erlaubten Flexibilität des konventionellen Speichers ausgeschöpft wird der beheizte Raum, wie in Variante B, selbst als Speicher benutzt. Ein Schwellenwert von 90 % ist der Trägheit des Systems geschuldet und soll den Übergang zwischen den Regelungen reibungsloser gestalten.

### Schutzmechanismen des BHKW

Der Betrieb des BHKW erfolgt grundsätzlich mit ermittelten Eigenschaften und Grenzen. Die ermittelte Anschaltzeit von etwa 3 Minuten wird bei der Simulation nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass das BHKW niemals vollständig auskühlt und nach einer maximalen Zeit von 60 s wieder im Normalbetrieb läuft und regelbar ist. Da die Einschaltzeit überwiegend keine Stillstandzeit ist, sondern elektr. Energie erzeugt wird, wobei das BHKW nur nicht regelbar ist, wird die Einschaltzeit von 60 s als vernachlässigbar angenommen.

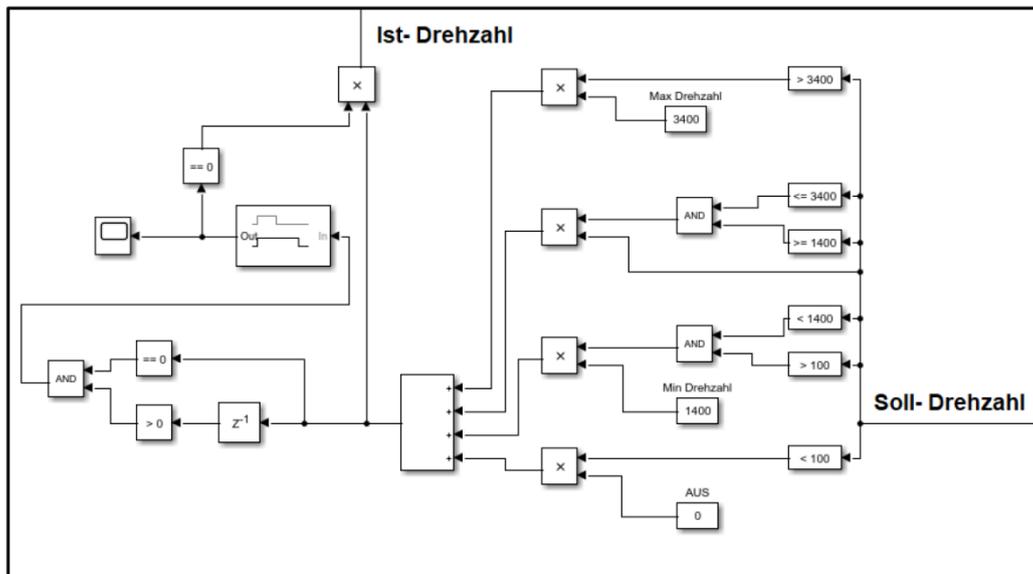


Abbildung 7.17: Implementierung der Schutzmechanismen und Randbedingungen des BHKW

Um die Lebensdauer durch viele Starts nicht zu verringern, wurde eine Mindeststillstandzeit von 10 Minuten festgelegt. In Abbildung 7.17 ist zusätzlich die Implementierung weiterer vorgegebener Randbedingungen, wie die Maximal- und Minimaldrehzahl dargestellt.

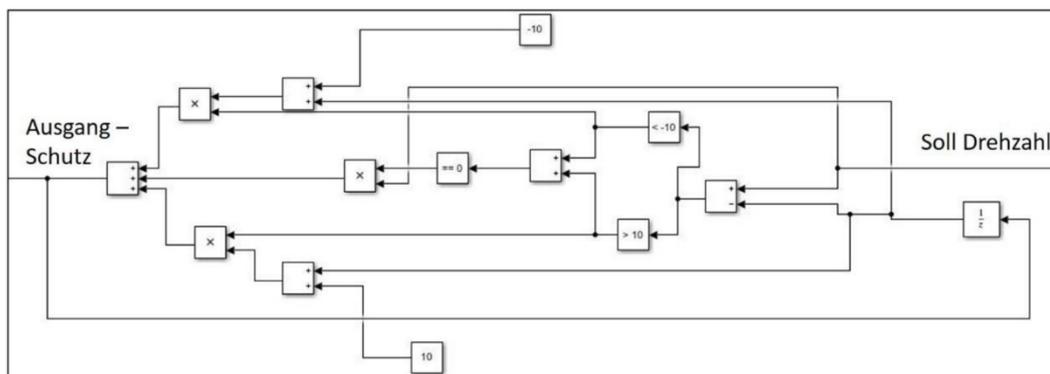


Abbildung 7.18: Regelung des maximalen Drehzahlgradienten des BHKW

Der Drehzahlgradient wurde konservativ mit 10 RPM/s gewählt, um die Belastung des BHKW möglichst gering zu halten. Die Implementierung ist in Abbildung 7.18 dargestellt.

### Validierung des Modells durch Emulation

Da Feldtests nicht durchgeführt werden können, wird eine Emulation der Regelung am Beispiel-BHKW durchgeführt. Ziel der Emulation ist eine Validierung der in der Simulation gewonnenen Erkenntnisse. Des Weiteren wird die Regelung einem Test in der Praxis unterzogen, der weitere Fehlerquellen aufdecken soll.

Durch die in Kap. 7.1.2 beschriebene Entwicklung der Steuerung des Beispiel-BHKW ist es möglich, anstatt das BHKW zu simulieren, dem realen BHKW im Labor die Solldrehzahl zu übermitteln und die erzeugte Energie zeitgleich messtechnisch zu erfassen. Als Verbraucher, der

das Mehrfamilienhaus in der Simulation ersetzt, wird ein an den Wärmespeicher angeschlossenes steuerbares Heizregister verwendet. Die gemessenen Werte fließen wiederum in eine Simulation des Gebäudes in Simulink. Die Regelung, die Erzeugung und der Verbrauch der Energie finden also in der Praxis statt. Im Gegensatz dazu werden die Auswirkungen der eingespeisten Heizleistung im Gebäude wiederum simuliert.

Da an der realen Anlage ein Speicher angeschlossen ist, wird auf die Betrachtung der Regelungsvariante B verzichtet, da in dieser Variante kein Speicher vorhanden ist. Des Weiteren wird nur ein Tag, der 12.01., betrachtet, da dieser ein besonders kalter Vergleichstag ist. Es wird das verstärkte G0-Lastprofil verwendet. Das Wärmeprofil basiert, wie in Abschnitt „Temperaturgrenzen des Raums als Speicher“ beschrieben, auf einer Solltemperatur von 21,5 °C.

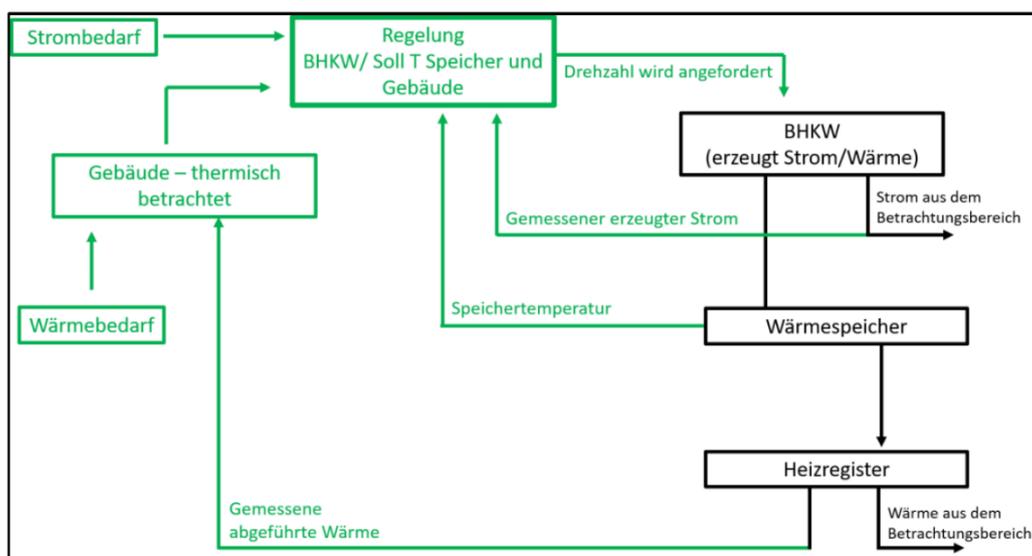


Abbildung 7.19: Darstellung der Funktionsweise und der Grenzen der Emulation

In Abbildung 7.19 ist die Funktionsweise der Emulation für Regelungsvariante A dargestellt. Die realen Bauteile sind in schwarz dargestellt und die simulierten Vorgänge in grün. Der Wärmebedarf des Gebäudes wird hier abhängig von der Innentemperatur berechnet, da sich in theoretischen Simulationen gezeigt hat, dass die Temperaturabhängigkeit mit diesem Wert hinreichend beschrieben werden kann. Die Regelung erfolgt analog der Simulation wie in Abbildung 7.14 und Abbildung 7.16 dargestellt. Zusätzlich werden in der Emulation erweiterte Filter verwendet, die die Auswirkung von kurzzeitigen Ausreißern der Messdaten verringern.

### Ergebnisse der Simulation/Emulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation sowie die Validierung der Ergebnisse mittels Emulation erläutert und diskutiert. Die Ergebnisse spiegeln nur das Potenzial für den betrachteten Anwendungsfall und dessen Rahmenbedingungen wider, allerdings ist aufgrund der Variation der Lastprofile eine generelle Abschätzung des Potenzials der ermittelten Regelung möglich.

Regelungsvariante A

In Tabelle 7.3 werden die Ergebnisse der Simulation der Regelungsvariante A dargestellt, wobei der Stromlastgang dem H0-Profil oder dem verstärkten H0-Profil entspricht. Die erlaubte Solltemperaturdifferenz wird von 0 bis 30 K betrachtet.

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Regelungsvariante A mit H0-Profil (oben) und verstärktem H0-Profil (unten)

Temperaturdifferenz [K]	0	2	4	10	30
Stromerzeugung BHKW [kWh]	<b>6041,7</b>	6042,9	6044,1	6048,0	6061,2
	<b>6041,7</b>	6042,8	6044,0	6047,6	6060,8
Wärmeerzeugung BHKW [kWh]	<b>16353,4</b>	16356,6	16360,0	16370,5	16406,3
	<b>16353,4</b>	16356,4	16359,6	16369,4	16405,0
Erzeugter und genutzter Strom [kWh]	<b>5559,9</b>	5657,2	5678,8	5705,5	5720,3
	<b>4825,7</b>	4895,1	4936,2	5006,8	5042,7
Netzbezug [kWh]	<b>6762,9</b>	6665,6	6644,0	6617,2	6602,5
	<b>7497,2</b>	7427,8	7386,7	7316,1	7280,2
Netzeinspeisung [kWh]	<b>481,8</b>	385,7	365,4	342,5	341,0
	<b>1216,0</b>	1147,7	1107,8	1040,8	1018,0
Erdgasverbrauch [m <sup>3</sup> ]	<b>2262,1</b>	2262,6	2263,1	2264,5	2269,5
	<b>2262,1</b>	2262,6	2263,0	2264,3	2269,3
Wärmeverlust am Speicher [kWh]	<b>155,5</b>	158,7	162,1	172,6	208,4
	<b>155,5</b>	158,5	161,6	171,5	207,1
Eigenverbrauchsanteil [%]	<b>92,0</b>	93,6	94,0	94,3	94,4
	<b>79,9</b>	81,0	81,7	82,8	83,2
Autarkiegrad [%]	<b>45,1</b>	45,9	46,1	46,3	46,4
	<b>39,2</b>	39,7	40,1	40,6	40,9

Es ist zu erkennen, dass die Auswirkungen einer höheren erlaubten Temperaturdifferenz des Speichers gering sind. Für beide Lastprofile gilt, dass die erzeugten Energien genau wie der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad minimal ansteigen. Die Netzeinspeisung und der Netzbezug verringern sich. Der Gasverbrauch bleibt allerdings nahezu unabhängig vom erlaubten Temperaturdelta im Speicher. Außerdem ist zu erkennen, dass die Auswirkungen der erlaubten Temperaturdifferenz mit zunehmender Temperaturdifferenz abnehmen. Besonders deutlich ist dies beim Eigenverbrauchsanteil und dem Autarkiegrad. Ein erlaubtes Delta von 2 K verursachen einen Anstieg des Eigenverbrauchsanteils bei Betrachtung des normalen H0-Profiles um 1,6 %. Dagegen steigern weitere 28 K erlaubte Temperaturdifferenz den Eigenverbrauchsanteil nur um weitere 0,8 %. Zwischen dem normalen H0-Profil und dem verstärkten H0-Profil gibt es generelle Unterschiede in Bezug auf den Eigenverbrauch und den Autarkiegrad. Durch die Verstärkung erhöht sich vor Allem der Netzbezug und die Netzeinspeisung, was darauf hinweist, dass die zeitliche Entwicklung der Strom- und Wärmelast weniger stark korreliert. Die Abhängigkeit von der erlaubten Temperaturdifferenz ist aber weitgehend identisch.

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Regelungsvariante A mit G0-Profil (oben) und verstärktem G0-Profil (unten)

Temperaturdifferenz [K]	0	2	4	10	30
Stromerzeugung BHKW [kWh]	<b>6041,7</b>	6042,7	6044,1	6047,8	6060,6
	<b>6041,7</b>	6042,7	6043,7	6046,5	6060,8
Wärmeerzeugung BHKW [kWh]	<b>16353,4</b>	16356,0	16359,8	16369,8	16404,5
	<b>16353,4</b>	16356,1	16358,8	16366,4	16405,0
Erzeugter und genutzter Strom [kWh]	<b>5667,5</b>	5789,8	5809,4	5835,1	5862,7
	<b>4542,7</b>	4668,4	4697,2	4766,6	5042,7
Netzbezug [kWh]	<b>6655,3</b>	6533,0	6513,4	6487,6	6460,1
	<b>7780,3</b>	7654,6	7625,8	7556,4	7280,2
Netzeinspeisung [kWh]	<b>374,2</b>	252,9	234,7	212,6	197,9
	<b>1499,1</b>	1374,3	1346,5	1280,0	1018,0
Erdgasverbrauch [m <sup>3</sup> ]	<b>2262,1</b>	2262,5	2263,0	2264,4	2269,2
	<b>2262,1</b>	2262,5	2262,9	2263,9	2269,3
Wärmeverlust am Speicher [kWh]	<b>155,5</b>	158,7	161,9	171,8	206,6
	<b>155,5</b>	158,2	160,7	168,5	207,1
Eigenverbrauchsanteil [%]	<b>93,8</b>	95,8	96,1	96,5	96,7
	<b>75,2</b>	77,3	77,7	78,8	83,2
Autarkiegrad [%]	<b>46,0</b>	47,0	47,1	47,4	47,6
	<b>36,9</b>	37,9	38,1	38,7	40,9

In Tabelle 7.4 sind die Ergebnisse der Simulation auf Basis der Stromlastgänge des G0-Profiles und des verstärkten G0-Profiles aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass im Falle des G0-Profiles (normal/verstärkt) die gleichen Beobachtungen zu machen sind wie im H0-Profil (normal/verstärkt). Die genannten Beobachtungen sind beim G0-Profil allerdings im Vergleich zum H0-Profil quantitativ stärker.

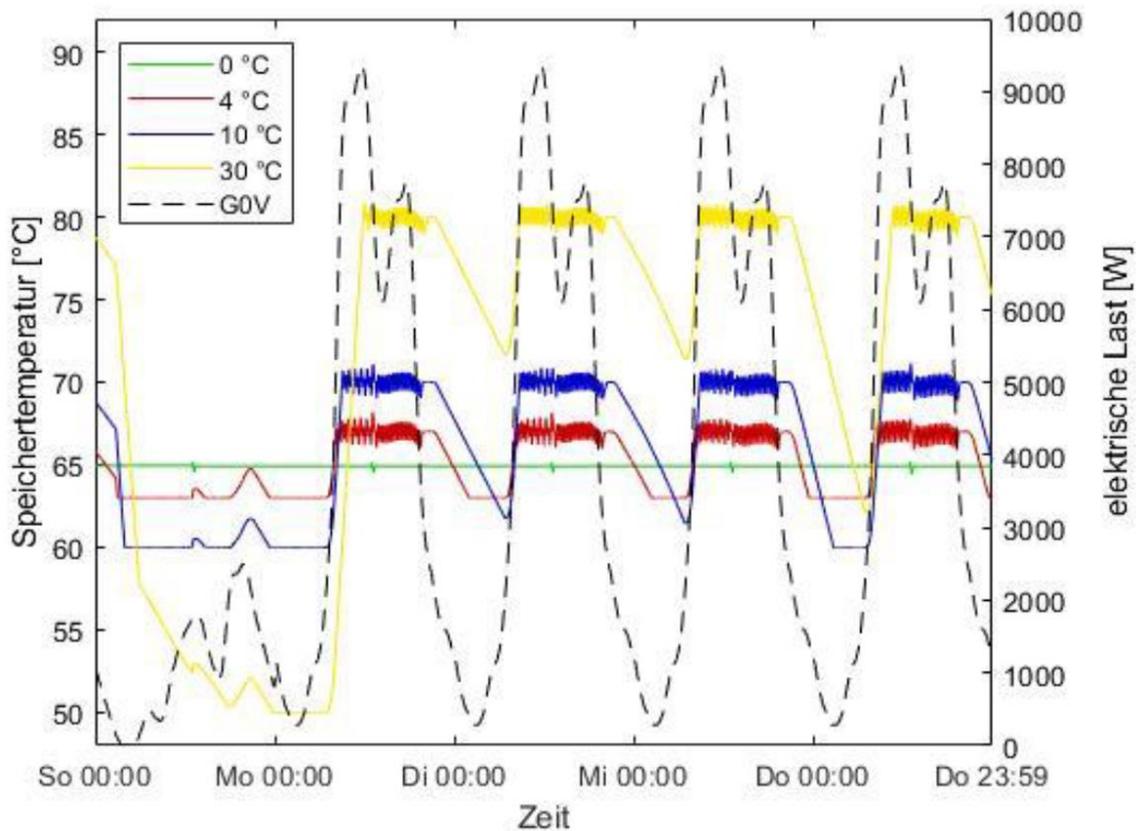


Abbildung 7.20: Speichertemperatur der Regelungsvariante A beim verstärkten G0-Profil

In Abbildung 7.20 ist exemplarisch das Temperaturprofil sowie die elektr. Last von 09.01. bis zum 13.01. dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Regelung wie geplant funktioniert. Je höher die erlaubte Temperaturtoleranz ist, desto mehr wird diese auch genutzt. Es ist außerdem erkennbar, dass eine höhere Temperaturtoleranz dazu führt, dass die Regelung länger stromgeführt agiert.

### Regelungsvariante B

In Tabelle 7.5 ist zu erkennen, dass die Auswirkungen der erlaubten Temperaturtoleranz im generellen ähnlich zur Auslegungsvariante A sind. Allerdings fallen die Auswirkungen der Variante B deutlich höher aus. Die gesamte Erzeugung des BHKW erhöht sich um etwa 67 %. Gleichzeitig erhöhen sich der Autarkiegrad und der Eigenverbrauchsanteil aber auch der Erdgasverbrauch. Zielgemäß wird der Netzbezug genau wie die Netzeinspeisung mit zunehmender Temperaturtoleranz enorm verringert. Dabei ist besonders auffällig, dass in diesem Fall die größten Auswirkungen erst bei der Änderung der erlaubten Temperaturdifferenz von 4 K zu 6 K erfolgt. Der Netzbezug beträgt dann nur noch 837,2 kWh (normales H0-Profil) bzw. 1.647,4 kWh (verstärktes H0-Profil).

Tabelle 7.5: Ergebnisse der Regelungsvariante B mit H0-Profil und verstärktem H0-Profil

Temperaturdifferenz [K]	0	1	3	4	6
Stromerzeugung BHKW [kWh]	<b>7120,6</b>	7218,7	7524,7	7724,3	11864,5
	<b>7120,6</b>	7205,9	7494,1	7687,8	11771,9
Wärmeerzeugung BHKW [kWh]	<b>19273,7</b>	19539,2	20367,7	20907,8	32114,4
	<b>19273,7</b>	19504,7	20284,7	20809,0	31863,7
Erzeugter und genutzter Strom [kWh]	<b>6527,8</b>	6776,3	7154,4	7351,5	11485,6
	<b>5680,0</b>	5959,9	6378,5	6582,6	10675,5
Netzbezug [kWh]	<b>5795,0</b>	5546,4	5168,4	4971,3	837,2
	<b>6642,9</b>	6363,0	5944,4	5740,3	1647,4
Netzeinspeisung [kWh]	<b>592,8</b>	442,3	370,4	372,8	378,9
	<b>1440,5</b>	1246,0	1115,6	1105,2	1096,5
Erdgasverbrauch [m <sup>3</sup> ]	<b>2666,1</b>	2702,8	2817,4	2892,1	4442,3
	<b>2666,1</b>	2698,1	2805,9	2878,5	4407,6
Eigenverbrauchsanteil [%]	<b>91,7</b>	93,9	95,1	95,2	96,8
	<b>79,8</b>	82,7	85,1	85,6	90,7
Autarkiegrad [%]	<b>53,0</b>	55,0	58,1	59,7	93,2
	<b>46,1</b>	48,4	51,8	53,4	86,6
Durchschnittstemperatur [°C]	<b>21,63</b>	21,87	22,59	23,07	24,11
	<b>21,63</b>	21,84	22,52	22,98	23,98

Zusätzlich ist auffällig, dass eine größere Temperaturtoleranz des Raums dazu führt, dass die Durchschnittstemperatur immer weiter von der Solltemperatur abweicht. Ist die Durchschnittstemperatur ohne erlaubte Abweichung noch fast genau bei 21,5 °C beträgt sie bei der maximalen erlaubten Abweichung von 6 K schon etwa 24 °C und ist damit eher in der Nähe der maximal erlaubten Temperatur. Die Durchschnittstemperatur ist bei einer Temperaturtoleranz von 6 K im Falle des verstärkten Lastprofils exakt 1 K höher als bei einer Temperaturtoleranz von 4 K. Gleichzeitig ist die Durchschnittstemperatur in beiden Fällen um 0,52 K geringer als die maximal erlaubte Temperatur. Die beschriebenen Auffälligkeiten legen die Vermutung nahe, dass das Modell bei einer Temperaturtoleranz von 6 K nicht mehr wie gewünscht funktioniert.

Tabelle 7.6: Ergebnisse der Regelungsvariante B mit G0-Profil (oben) und verstärktem G0-Profil (unten)

Temperaturdifferenz [K]	0	1	3	4	6
Stromerzeugung BHKW [kWh]	<b>7120,6</b>	7193,6	7459,1	7637,7	10671,4
	<b>7120,6</b>	7151,6	7355,0	7505,3	10123,7
Wärmeerzeugung BHKW [kWh]	<b>19273,7</b>	19471,3	20190,1	20673,5	28884,8
	<b>19273,7</b>	19357,8	19908,1	20314,9	27402,4
Erzeugter und genutzter Strom [kWh]	<b>6619,4</b>	6861,8	7233,4	7425,2	10458,7
	<b>5319,1</b>	5592,0	6000,3	6186,0	8836,1
Netzbezug [kWh]	<b>5703,4</b>	5460,9	5089,4	4897,5	1864,0
	<b>7003,9</b>	6731,0	6322,7	6137,0	3486,9
Netzeinspeisung [kWh]	<b>501,2</b>	331,7	225,8	212,5	212,6
	<b>1801,5</b>	1559,6	1354,7	1319,2	1287,6
Erdgasverbrauch [m <sup>3</sup> ]	<b>2666,1</b>	2693,4	2792,9	2859,7	3995,6
	<b>2666,1</b>	2677,7	2753,9	2810,1	3790,5
Eigenverbrauchsanteil [%]	<b>93,0</b>	95,4	97,0	97,2	98,0
	<b>74,7</b>	78,2	81,6	82,4	87,3
Autarkiegrad [%]	<b>53,7</b>	55,7	58,7	60,3	84,9
	<b>43,2</b>	45,4	48,7	50,2	71,7
Durchschnittstemperatur [°C]	<b>21,63</b>	21,80	22,44	22,86	23,81
	<b>21,63</b>	21,71	22,18	22,53	23,35

Die generellen Beobachtungen aus Tabelle 7.5 bestätigen sich bei den in Tabelle 7.6 aufgelisteten Ergebnissen der Regelungsvariante B mit G0-Profil (normal/verstärkt). Ebenso wie bei Regelungsvariante A sind die Effekte bei der Betrachtung des G0-Profils deutlich stärker. Es wird deutlich, dass die erhöhte Raumtemperatur zu deutlich höheren thermischen Verlusten führt. Insgesamt steigt die Erzeugung des BHKW bei der Simulation mit G0-Profil nicht in dem Maße wie bei der Verwendung des H0-Profils.

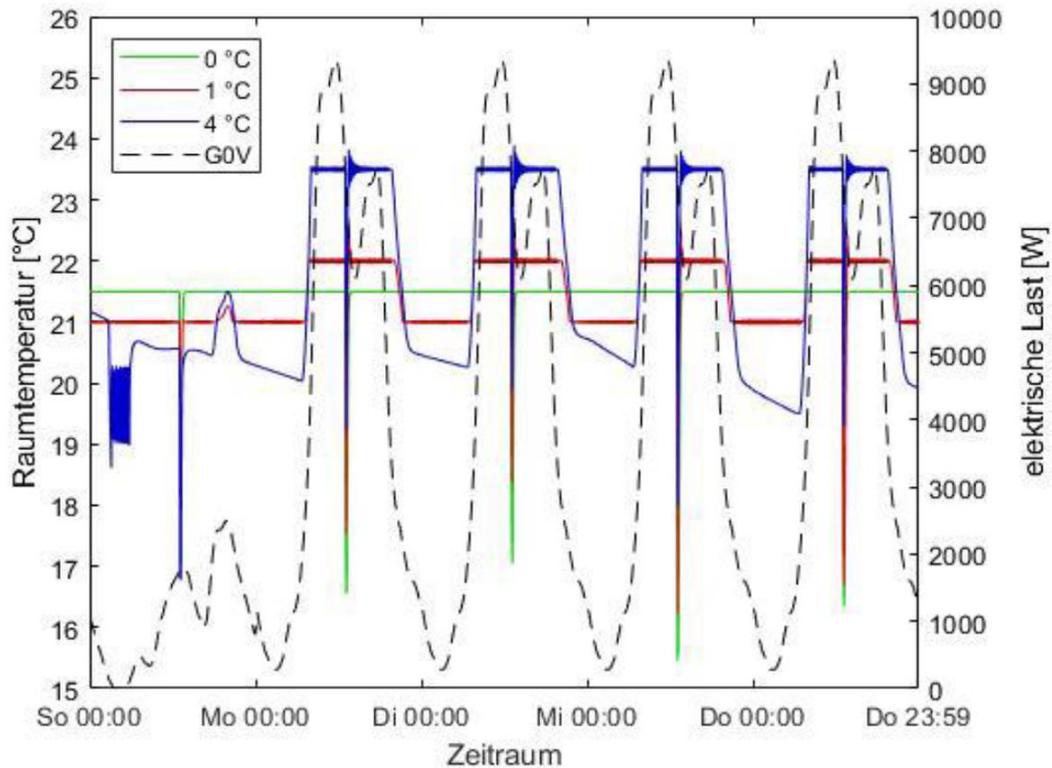


Abbildung 7.21: Raumtemperatur beim verstärkten G0-Profil für Regelungsvariante B

In Abbildung 7.21 ist zu erkennen, dass die erlaubte Toleranz der Raumlufttemperatur von der Regelung ausgenutzt wird. Die Lüftung durch offene Fenster ist täglich gut zu erkennen. Ab einem erlaubten Temperaturdelta von 4 K ist zu beobachten, dass das BHKW über längere Phasen nicht am Rand des erlaubten Temperaturspektrums verweilt, sondern stromgeführt geregelt wird.

### Regelungsvariante C

In der Regelungsvariante C werden die Flexibilität des Speichers und des Raums gemeinsam genutzt. Es wird zunächst die Flexibilität des Speichers genutzt, die nach einer Ausreizung von 90 % durch die Flexibilität des Raums ergänzt wird. Zusammen haben der konventionelle Wärmespeicher und der Raum als innovativer Wärmespeicher bei maximaler erlaubter Flexibilität das größte hier betrachtete Speicherpotenzial.

Tabelle 7.7: Ergebnisse für Regelungsvariante C mit den Profilen H0 (obere Werte) und verstärktem H0 (untere Werte). Die Variationen für die Raumtemperatur sind zusätzlich farblich unterschieden

Temperaturdifferenz [°C] Raumdiff./ Speicherdiff.	R1S1	R2S1	R4S1	R1S4	R2S4	R4S4	R1S10	R2S10	R4S10	R1S30	R2S30	R4S30
Stromerzeugung BHKW [kWh]	6108,1 6102,6	6203,4 6193,7	6456,2 6440,4	6134,0 6127,5	6239,0 6225,6	6487,9 6466,9	6181,4 6173,2	6319,6 6303,6	6606,3 6580,5	6225,9 6215,7	6392,0 6374,0	6728,2 6697,8
Wärmeerzeugung BHKW [kWh]	16533,2 16518,2	16791,1 16764,9	17475,3 17432,5	16603,3 16585,6	16887,4 16851,3	17561,3 17504,4	16731,7 16709,2	17105,7 17062,2	17881,5 17811,7	16851,9 16824,3	17301,7 17252,8	18211,5 18129,3
Erzeugter und genutzter Strom [kWh]	5752,7 5008,0	5857,7 5119,6	6091,0 5352,7	5782,9 5051,7	5889,8 5157,4	6122,0 5381,8	5836,0 5130,6	5968,8 5254,1	6244,4 5509,2	5878,6 5180,8	6039,0 5324,1	6366,1 5627,5
Netzbezug [kWh]	6570,1 7314,9	6465,1 7203,4	6231,8 6970,2	6639,9 7271,3	6433,0 7165,6	6200,8 6941,1	6486,8 7192,3	6354,0 7068,9	6078,4 6813,7	6444,2 7142,1	6283,7 6998,8	5956,7 6695,4
Netzeinspeisung [kWh]	355,4 1096,6	345,8 1074,2	365,2 1087,7	351,1 1075,8	349,2 1068,3	365,9 1085,1	345,5 1042,6	350,8 1049,5	361,8 1071,3	347,3 1034,9	353,0 1049,9	362,1 1070,3
Erdgasverbrauch [m3]	2287,0 2284,9	2322,7 2319,1	2417,3 2411,4	2296,7 2294,3	2336,0 2331,0	2429,2 2421,4	2314,5 2311,4	2366,2 2360,2	2473,5 2643,9	2331,1 2327,3	2393,3 2386,5	2519,2 2507,8
Wärmeverlust am Speicher [kWh]	156,7 156,7	155,9 155,9	153,5 153,7	161,4 161,1	160,5 160,3	158,3 158,3	171,5 170,7	170,3 169,7	167,7 167,4	206,8 205,8	205,2 204,5	201,8 201,5
Eigenverbrauchsanteil [%]	94,2 82,1	94,4 82,7	94,3 83,1	94,3 82,4	94,4 82,8	94,4 83,2	94,4 83,1	94,4 83,4	94,5 83,7	94,4 83,4	94,5 83,5	94,6 84,0
Autarkiegrad [%]	46,7 40,6	47,5 41,5	49,4 43,4	46,9 41,0	47,8 41,9	49,7 43,7	47,4 41,6	48,4 42,6	50,7 44,7	47,7 42,0	49,0 43,2	51,7 45,7
Durchschnittstemperatur [°C]	21,61 21,59	21,88 21,85	22,59 22,55	21,68 21,66	21,97 21,94	22,68 22,62	21,80 21,78	22,19 22,15	23,00 22,93	21,89 21,86	22,36 22,31	23,31 23,22

Tabelle 7.8: Ergebnisse für Regelungsvariante C mit den Profilen G0 (obere Werte) und verstärktem G0 (untere Werte). Die Variationen für die Raumtemperatur sind zusätzlich farblich unterschieden

	R1S1	R2S1	R4S1	R1S4	R2S4	R4S4	R1S10	R2S10	R4S10	R1S30	R2S30	R4S30
Temperaturdifferenz [°C]												
Raumdiff./ Speicherdiff.												
Stromerzeugung BHKW [kWh]	6111,4 6091,6	6213,8 6177,2	6472,0 6407,3	6137,0 6116,3	6252,6 6211,2	6519,7 6448,4	6180,7 6153,6	6323,2 6272,4	6620,1 6533,8	6220,8 6189,3	6383,3 6327,0	6709,9 6619,6
Wärmeerzeugung BHKW [kWh]	16542,2 16488,4	16819,4 16720,2	17518,3 17342,9	16611,5 16555,3	16924,3 16812,2	17647,4 17454,3	16729,6 16656,2	17115,2 16977,9	17919,0 17685,4	16838,2 16752,9	17278,1 17125,5	18162,1 17917,6
Erzeugter und genutzter Strom [kWh]	5894,2 4791,7	6014,0 4913,8	6267,8 5156,1	5926,5 4829,0	6052,5 4952,6	6314,8 5202,9	5978,6 4905,6	6124,0 5040,5	6416,2 5299,5	6024,5 4981,0	6184,4 6184,4	6505,9 5394,7
Netzbezug [kWh]	6428,6 7531,3	6308,8 7409,2	6055,0 7166,9	6396,3 7494,0	6270,2 7370,4	6008,0 7120,1	6344,1 7417,4	6198,8 7282,5	5906,6 7023,5	6298,3 7342,0	6138,4 7205,3	5816,9 6928,3
Netzeinspeisung [kWh]	217,2 1299,9	199,8 1263,4	204,2 1251,1	210,6 1287,3	200,1 1258,6	205,0 1245,6	202,1 1248,0	199,2 1231,9	203,9 1234,3	196,3 1208,3	199,0 1209,3	204,0 1224,9
Erdgasverbrauch [m³]	2288,2 2280,8	2326,6 2312,9	2423,3 2399,0	2297,8 2290,1	2341,1 2325,6	2441,1 2414,4	2314,2 2304,0	2367,5 2348,5	2478,7 2446,4	2329,2 2317,4	2390,1 2368,9	2512,3 2478,5
Wärmeverlust am Speicher [kWh]	156,7 156,7	155,8 156,1	153,4 154,0	161,2 160,4	160,4 159,8	158,0 158,0	171,0 168,3	169,9 167,8	167,3 166,2	205,6 199,1	204,5 199,5	201,7 198,7
Eigenverbrauchsanteil [%]	96,4 78,7	96,8 79,5	96,8 80,5	96,6 79,0	96,8 79,7	96,9 80,7	96,7 79,7	96,8 80,4	96,9 81,1	96,8 80,5	96,9 97,7	97,0 81,5
Autarkiegrad [%]	47,8 38,9	48,8 39,9	50,9 41,8	48,1 39,2	49,1 40,2	51,2 42,2	48,5 39,8	49,7 40,9	52,1 43,0	48,9 40,4	50,2 46,2	52,8 43,8
Durchschnittstemperatur [°C]	21,62 21,56	21,91 21,80	22,64 22,45	21,68 21,63	22,01 21,89	22,77 22,57	21,80 21,72	22,20 22,06	23,04 22,80	21,88 21,79	22,33 22,18	23,26 23,01

In den Tabelle 7.7 und Tabelle 7.8 bestätigen sich die Beobachtungen der Regelungsvarianten A und B, wobei sich die Auswirkungen insgesamt verstärken. Auffällig ist hier, dass die Auswirkungen hauptsächlich von der erlaubten Temperaturtoleranz getrieben werden.

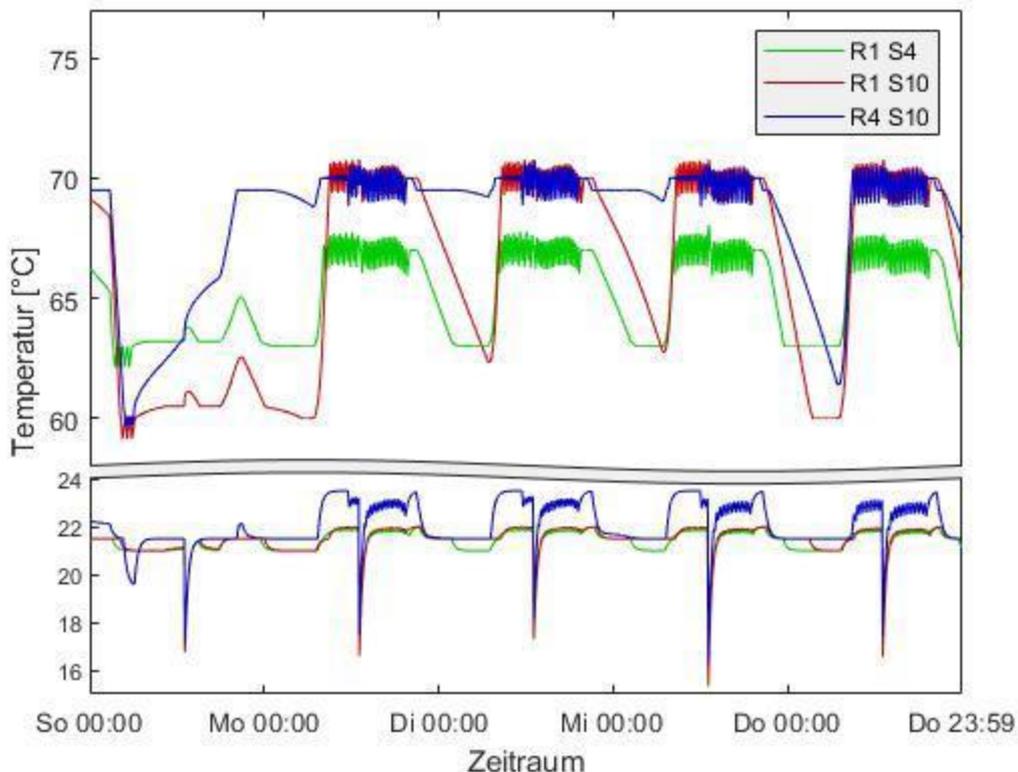


Abbildung 7.22: Darstellung der Raum- und Speichertemperatur mit Regelungsvariante C für das verstärkte G0 Profil über 5 Tage

In Abbildung 7.22 wird deutlich, dass die Flexibilität des Speichers bei zunehmender Flexibilität des Raums nicht mehr häufig verwendet wird. Gleichzeitig ist auch zu erkennen, dass die Raumtemperatur nur noch vereinzelt unter die Solltemperatur fällt. Die Flexibilität des Raums wird nicht ausgeschöpft.

### Emulation

Da ein Einsatz der Regelung im Feld bisher nicht möglich ist, werden Ergebnisse einer Emulation in Abbildung 7.23 dargestellt. Die Emulation basiert auf der Regelungsvariante A und bildet einen Zeitraum von 48 h ab. Als mittlere homogene Speichertemperatur wird der mittlere Temperatursensor verwendet.

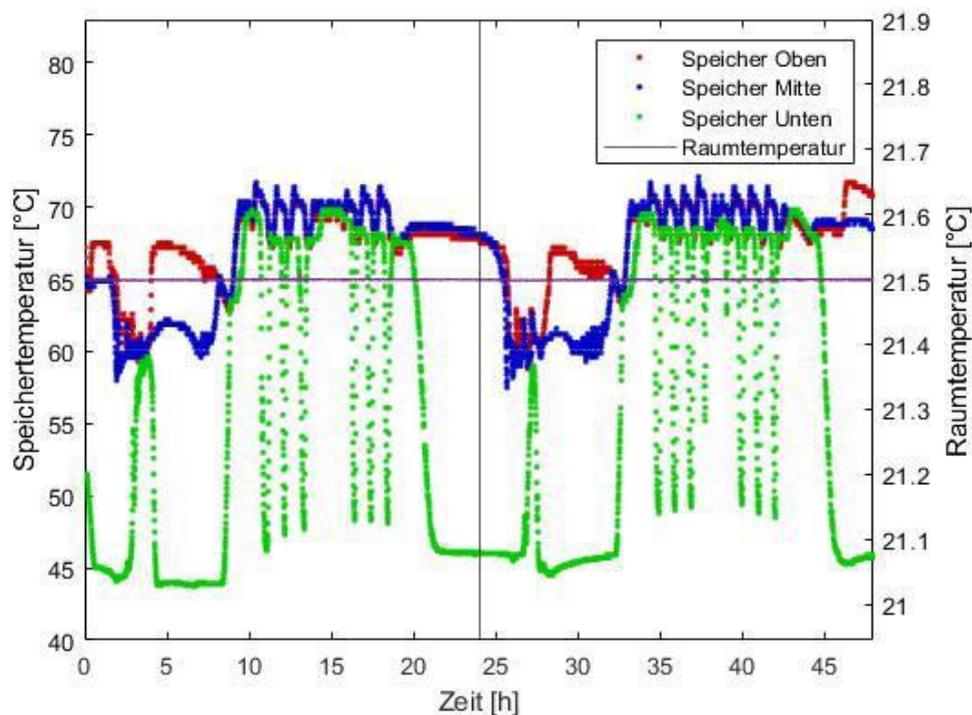


Abbildung 7.23: Darstellung der Speichertemperaturen bei der Emulation mit Regelungsvariante A

Es ist zu erkennen, dass die Speichertemperatur im erlaubten Temperaturrahmen bleibt. Ein Vergleich mit dem simulierten Verlauf der Speichertemperatur in Abbildung 7.20 zeigt deutliche Ähnlichkeiten des Temperaturverlaufs, was darauf hinweist, dass die Simulation in ausreichendem Maße in der Tendenz der Realität entspricht. Allerdings ist anzumerken, dass die heterogene Temperatur im Speicher der theoretischen Simulation entgegensteht.

### Ökologisches und ökonomisches Potenzial

Als abschließendes Bewertungskriterium des Potenzials des Wohnraums als innovativer Speicher werden die berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Brennstoffkosten betrachtet. Die Kosten und die Emissionen werden dabei je nach Szenario pro Jahr aufsummiert und ausgewertet. Unbeachtet bleiben dabei zunächst die Auswirkungen einer modifizierten Betriebsdauer des BHKW. Dazu zählen beispielsweise eine veränderte Lebensdauer oder angepasste Wartungskosten.

Tabelle 7.9: Brennstoffkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen der betrachteten Szenarien pro Jahr

Profil	CO <sub>2</sub> Emissionen [kg CO <sub>2</sub> ]				finanzielle Betrachtung [€]			
	H0	H0V	G0	G0V	H0	H0V	G0	G0V
<b>A S0</b>	<b>6584,2</b>	<b>6584,3</b>	<b>6584,2</b>	<b>6584,3</b>	<b>3401,5</b>	<b>3595,8</b>	<b>2354,4</b>	<b>2559,3</b>
A S2	6584,6	6584,7	6584,5	6584,6	3376,0	3577,7	2332,2	2536,6
A S4	6585,0	6585,0	6584,9	6584,9	3370,6	3567,0	2328,8	2531,4
A S10	6586,0	6585,9	6585,9	6585,6	3364,2	3549,0	2324,5	2519,1
A S30	6589,7	6589,6	6589,4	6589,6	3362,7	3542,0	2320,8	2470,3
<b>B R0</b>	<b>6879,9</b>	<b>6879,9</b>	<b>6879,9</b>	<b>6879,9</b>	<b>3345,3</b>	<b>3569,7</b>	<b>2296,8</b>	<b>2533,8</b>
B R1	6906,7	6903,4	6899,8	6888,4	3297,7	3511,4	2260,5	2487,4
B R3	6990,5	6982,1	6972,7	6944,2	3254,3	3454,0	2221,3	2434,8
B R4	7045,2	7035,3	7021,5	6985,3	3239,1	3435,9	2205,5	2417,1
B R6	8179,5	8154,0	7852,6	7702,6	2912,2	3109,4	1978,6	2215,5
<b>C R1S1</b>	<b>6602,5</b>	<b>6600,1</b>	<b>6603,3</b>	<b>6598,0</b>	<b>3362,8</b>	<b>3558,7</b>	<b>2320,5</b>	<b>2519,3</b>
C R1S10	6622,6	6620,4	6622,4	6615,0	3354,4	3539,5	2312,6	2505,2
C R2S1	6628,6	6626,1	6631,5	6621,5	3352,7	3546,3	2309,7	2506,3
C R2S10	6660,4	6656,1	6661,3	6647,5	3344,8	3531,0	2301,4	2493,4
C R4S1	6697,8	6693,5	6702,3	6684,5	3337,8	3530,2	2291,2	2486,9
C R4S10	6738,9	7056,0	6742,7	6719,2	3325,0	3642,3	2280,1	2474,3

In Tabelle 7.9 ist zu erkennen, dass die Brennstoffkosten in den meisten Szenarien um etwa 1 - 3 % verringert werden. Auffallend ist aber bei Betrachtung der Regelungsvariante B die Reduktion der Brennstoffkosten um 12 - 19 %, wobei die größte Einsparung beim H0-Profil erreicht wird, das in bisherigen Ergebnissen eher unscheinbar ist.

Dagegen steigen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in jedem Szenario. Bei der Regelungsvariante A steigen die Emissionen nur um bis zu 0,1 %, was der Erwartung aus den bisherigen Ergebnissen entspricht. Die Emissionen bei der Regelungsvariante B steigen dagegen um 14 - 19 %, was auf die erhöhte mittlere Raumtemperatur zurückzuführen ist. Das BHKW wird in diesem Fall oftmals stromgeführt und erzeugt eigentlich nicht benötigte Heizenergie, die den Raum unnötig aufheizt. Die Phasen mit niedriger Stromlast und ausgeschaltetem BHKW kompensieren diese Temperaturerhöhung nicht mehr ausreichend.

Weitere Simulationen zeigen eine Abhängigkeit der Ergebnisse vom Strom-/Wärmebedarfsverhältnis. Je höher der Stromverbrauch im Verhältnis zum Wärmebedarf ist, desto bessere finanzielle Ergebnisse erzielt die Regelung. Allerdings verstärkt sich dann auch der Effekt der steigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Abschließend ist festzustellen, dass die Untersuchung nur eine

geringe generelle Aussagekraft hat, da die Ergebnisse stark von den Rahmenbedingungen abhängig sind.

### **Beurteilung der Ergebnisse der entwickelten Regelung**

Wie in Abschnitt „Ergebnisse der Simulation/Emulation“ beschrieben, funktioniert die entwickelte Regelung in der Simulation prinzipiell. Die gegebene Flexibilität wird in alle Richtungen ausgenutzt. Die Umsetzung in der Praxis unterliegt jedoch wie in Abschnitt „Verhalten des BHKWs beim Folgen eines Lastgangs“ und „Emulation“ gezeigt einigen Beschränkungen. Aufgrund der Trägheit des BHKW ist der Drehzahlgradient nicht immer ausreichend, um dem Lastgang zu folgen. Die An- und Abfahrzeiten sind darüber hinaus eine weitere Beschränkung der Effektivität der Regelung.

Durch die Variation der Lastprofile und des Strom-/Wärmebedarfsverhältnisses ist eine generelle Einschätzung möglich. Die variablen Kosten der Versorgung des Haushalts mit Wärme und Strom sinken wie im Abschnitt „Ökologisches und ökonomisches Potenzial“ beschrieben in fast allen Fällen, sind jedoch nie nennenswert höher. Die Durchschnittstemperatur wird in den betrachteten Szenarien oftmals sehr viel höher. Durch die höhere Durchschnittstemperatur wird die verwendete Heizenergie signifikant erhöht, was zur Folge hat, dass die allgemeine Erzeugung des BHKW zunimmt. Durch den dadurch erhöhten Gasverbrauch erhöhen sich auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen signifikant, was dem nationalen Ziel einer Minderung des Treibhausgasausstoßes widerspricht.

Zusätzlich führt die ermittelte durchschnittlich hohe Abweichung zur Solltemperatur dazu, dass die Unzufriedenheit der Nutzer mit den klimatischen Bedingungen der Raumluft ansteigen kann.

Die entwickelte Regelung sollte also nur in Einzelfällen eingesetzt werden, in denen das Strom-/Wärmelastverhältnis keine dauerhafte signifikante Abweichung der durchschnittlichen Temperatur verursacht.

## **7.2 Detailbetrachtung der Referenzobjekte mit Batterie**

### **7.2.1 CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung**

Im Fokus von „KWK plus Speicher“ liegt die Einsparung von CO<sub>2</sub> und Primärenergie sowie die Steigerung der Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen. Zur Bilanzierung der erzielten Einsparung wird wie in den vorangegangenen Studien [65], [66] vorgegangen. Jedoch wird im Projekt „KWK plus Speicher“ die Bilanzgrenze nicht um das KWK-System, sondern um die Gebäudehülle gelegt, da so neben dem KWK-System die Batterie sowie bei einem Haushalt eine PV-Anlage erfasst werden. So werden alle von dem Gebäude bezogenen und ins Netz eingespeisten Energieflüsse bilanziert. Dieses Vorgehen entspricht dem in DIN V 18599-1 beschriebenen Verfahren zur energetischen Bewertung von Gebäuden. Es werden die erzielten CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparungen (PEE) im Vergleich zu der zuvor installierten Heizung sowie zu einer Stromversorgung über das öffentliche Netz und einem neuen

Gasbrennwertgerät mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % bezogen auf den Heizwert dargestellt [67]. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 7.24 dargestellt.

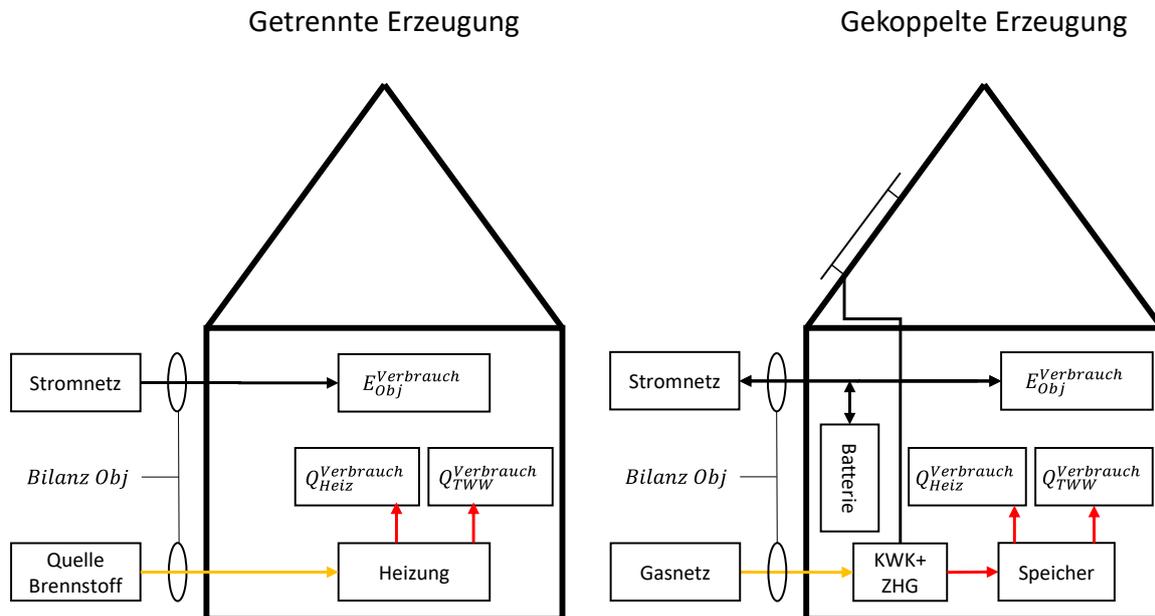


Abbildung 7.24 Schematische Darstellung der Bilanzgrenzen, welche zur Bestimmung von PE- und CO<sub>2</sub>-Einsparung zwischen getrennter Erzeugung von Strom und Wärme sowie gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme betrachtet wird

Die Berechnung der Primärenergie des Gebäudes mit KWK-System  $PE_{gekoppelt}$  erfolgt anhand der an der Hausübergabe gemessenen Werte für den bezogenen Brennstoff  $W_{Obj}^{Bez}$ , den bezogenen Strom  $E_{Obj}^{Bezug}$  und die Einspeisung  $E_{Obj}^{Einspeisung}$  entsprechend F. 7.8. Die jährlich bilanzierten Energiemengen werden mit den Primärenergiefaktoren  $f_{Brennstoff}^{Bezug}$ ,  $f_{Strom}^{Verdrängung}$  und  $f_{Strom}^{Bez}$  multipliziert.

$$PE_{Obj}^{gekoppelt} = W_{Obj}^{Bezug} * f_{Brennstoff}^{Bezug} + E_{Obj}^{Bez} * f_{Strom}^{Bez} - E_{Obj}^{Einspeisung} * f_{Strom}^{Verdrängung} \quad \text{F. 7.8}$$

Der Term  $PE_{Obj}^{gekoppelt}$  umfasst den gesamten Primärenergieverbrauch der aktuell vermessenen Objekte. Zur Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente werden die entsprechenden Faktoren eingesetzt.

Zur Berechnung der Primärenergie-/CO<sub>2</sub>-Einsparung wird dieser Wert auf ein Objekt mit der zuvor installierten Heizung oder einem neuem Gasbrennwertgerät und reinem Stromnetzbezug zur Bedarfsdeckung bezogen. Die Jahresnutzungsgrade der konventionellen Heizungen  $\eta_{alt}^{Heiz}$  werden entsprechend dem Vorprojekt angenommen [65]. Weiterhin wird angenommen, dass die durch ZHG und KWK-Anlage bereitgestellte thermische Energie  $Q_{KWK+ZHG}^{Erz}$  im Vergleichshaushalt vollständig durch die konventionelle Heizung bereitgestellt wird. Somit ergibt sich der Brennstoffbezug des getrennt versorgten Vergleichshaushaltes entsprechend F. 7.9.

$$W_{Obj, getrennt}^{Bezug} = \frac{Q_{KWK+ZHG}^{Erz}}{\eta_{alt}^{Heiz}} \quad \text{F. 7.9}$$

Der elektrische Verbrauch des Objektes ohne Batterie  $E_{Obj, getrennt}^{Verbrauch}$  wird bilanziell aus den Messgrößen an der Hausübergabe ermittelt. Hierbei werden die Energieflüsse an der Hausübergabe, um die Energieflüsse der Batterie bereinigt. So wird der Netzbezug  $E_{Obj}^{Bezug}$  um die aus der Batterie entladene Energie  $E_{Bat}^{DC}$  erhöht. Die Netzeinspeisung  $E_{Obj}^{Einspeisung}$  wird um die von der Batterie aufgenommene Energie  $E_{Bat}^{CH}$  erhöht. Mit  $\Delta E_{Bat}^{SoC}$  werden zudem die unterschiedlichen Beladungszustände der Batterie zu Beginn und Ende des Bilanzzeitraumes berücksichtigt. So kann eine Bilanz für den Objektverbrauch  $E_{Obj, getrennt}^{Verbrauch}$  ohne Batterie nach F. 7.10 abgebildet werden. Weiterhin wird eine zusätzliche Hilfsenergie addiert, welche den gesteigerten Netzbezug für Hilfsenergie  $dE_{Heiz}^{Hilf}$  bei getrennter Erzeugung für die konventionelle Heizung abbildet.

$$E_{Obj, getrennt}^{Verbrauch} = E_{KWK}^{Erz} + E_{Obj}^{Bezug} + E_{Bat}^{DC} - (E_{Obj}^{Einspeisung} + E_{Bat}^{CH}) - \Delta E_{Bat}^{SoC} + dE_{Heiz}^{Hilf} \quad \text{F. 7.10}$$

Die Hilfsenergien für unterschiedliche Heizungssysteme sind [69] entnommen und wurden mit [70], [71] abgeglichen. Bei den aufgeführten Werten handelt es sich um den Teil der Hilfsenergie, welcher aus dem Netz bezogen wird. Die pauschal angenommene Hilfsenergie ist in Tabelle 7.10 aufgeführt.

Tabelle 7.10: Angenommene netzbezogene Hilfsenergien unterschiedlicher Heizungssysteme nach [69].

Heizungstechnologie	Einheit	Hilfsenergie
Gas-Altessel	kWh/a	649
Öl-Altessel	kWh/a	649
Gas-Brennwertgerät	kWh/a	406
Brennstoffzellen-System	kWh/a	333
Motorisches KWK-System	kWh/a	376

Der resultierende formale Zusammenhang zur Bestimmung von  $PE_{getrennt}$  ist in F. 7.11 beschrieben.

$$PE_{Obj}^{getrennt} = W_{Obj, getrennt}^{Bezug} * f_{Brennstoff}^{Bezug} + E_{HH, getrennt}^{Verbrauch} * f_{Strom}^{Bezug} \quad \text{F. 7.11}$$

Zur Bilanzierung der Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen werden für die Faktoren  $f_{Brennstoff}^{Bezug}$ ,  $f_{Strom}^{Bezug}$ ,  $f_{Strom}^{Verdrängung}$  die in Tabelle 7.11 zusammengestellten Faktoren aus [72] verwendet.

Tabelle 7.11: Angenommene Faktoren zur Bestimmung der Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Äquivalente unterschiedlicher Versorgungsvarianten von Wohnobjekten. [72]

	Primärenergiefaktor <sup>6</sup>	Emissionsfaktor in g CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh	
Heizöl*	1,1	310	[72] [73]
Erdgas*	1,1	240	
Biogas*	0,4	120	
Kohle*	1,1	400	
Strom - netzbezogen	1,8	550	
Strom - gebäudenah erzeugt PV	0	0	
Strom - Verdrängungsmix KWK	2,8	860	
Strom – Verdrängungsmix PV	1,8	550	
Strom - netzbezogen NRW		779	eig. Berechnung nach [74]

\*Bezogen auf Heizwert H<sub>i</sub>

Abweichungen in den Emissionsfaktoren im Vergleich zum Vorprojekt aus dem Jahr 2016 treten insbesondere für den Emissionsfaktor Strom netzbezogen auf, welcher mit 617 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh angenommen wurde. Dieser reduziert sich für den hier angenommenen Wert auf 560 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh was grundsätzlich die CO<sub>2</sub>-Einsparungen von KWK-Anlagen reduziert, da der Emissionsfaktor für Erdgas mit 240 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh konstant bleibt. Weiterhin schmälert diese Reduktion auch die Einsparungen durch den mit Batterie erzielten vermiedenen Netzbezug.

In der Vorstudie wurde die Annahme getroffen, dass der Faktor für den KWK Verdrängungsmix und Netzbezug gleich sind. Sowohl im Gebäudeenergiegesetz als auch in der verwendeten Norm ist für KWK ein gesonderter Verdrängungsmix mit 860 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh angenommen, welcher die Einspeisung ins Netz aus Sicht der Emissionsreduktion sowie der PEE bevorteilt. Durch die eingesetzten Batterien erhöht sich der Anteil des im Objekt verbrauchten Stroms und reduziert den ins Netz eingespeisten Strom. Mit den im GBG2020/ der verwendeten Norm angenommenen Emissionsfaktoren haben Systeme ohne Batterie somit bilanziell einen Vorteil, da ihnen eine höhere CO<sub>2</sub>-Gutschrift durch den Verdrängungsmix angerechnet werden kann. Im Grundsatz betrifft dieser Sachverhalt auch PV-Anlagen in Kombination mit einer Batterie. Der aktuelle Verdrängungsmix kann nur als Momentaufnahme gewertet werden und ist vor dem Hintergrund der Energiewende als dynamisch zu betrachten. Ein sinkender Verdrängungsmix würde grundsätzlich KWK-Systeme schlechter und Batterien besser Stellen.

Im Rahmen des Messzeitraums konnten 14 vollständige Jahresbilanzen für den Betrieb von KWK-Anlagen in Kombination mit einem Batteriespeicher im Zeitraum 01.10.2019 –

<sup>6</sup> Nicht erneuerbarer Anteil

30.09.2020 gemessen werden. Beispielhaft ist im nachfolgenden Diagramm die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung eines Haushaltes mit einer ottomotorischen KWK-Anlage sowie einer 2 kWh Batterie dargestellt. Der betrachtete Haushalt hat im Bilanzzeitraum einen Stromverbrauch  $E_{Obj}^{Verbrauch}$  von 2.538 kWh sowie einen thermischen Energiebedarf von 23.296 kWh, wobei die KWK-Anlage einen thermischen Deckungsanteil von 52 % erreicht. Die gesamte Bilanzierung der Versorgung des Objektes mit getrennter sowie gekoppelter Erzeugung ist in Abbildung 7.25 dargestellt.

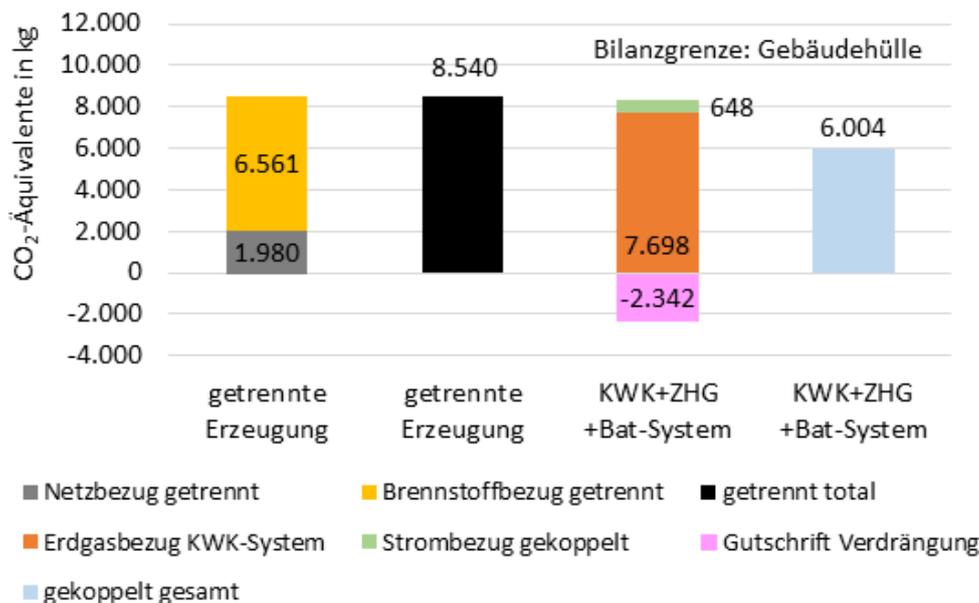


Abbildung 7.25: Vergleichende Darstellung von Emissionen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bei Versorgung mit ottomotorischer KWK-Anlage und 2 kWh Batterie sowie getrennter Versorgung mit Erdgas Altheizung und Stromnetzbezug.

Im dargestellten Fall führt die Substitution der Altheizung durch ein System aus KWK-Anlage Spitzenlastkessel und Batterie zu einer Einsparung an Emissionen von 29.7 %. Hierbei handelt es sich um die Einsparungen der KWK-Anlage im Systemverbund. Die Einsparung der Wärme, welche aus dem Spitzenlastkessel gedeckt wird fällt dementsprechend geringer aus. Der für die Auswertung in diesem Kapitel betrachtete Anlagenpool setzt sich aus sieben stirlingmotorischen KWK-Systemen, fünf ottomotorischen KWK-Systemen sowie zwei Brennstoffzellensystemen (1x SOFC, 1x PEM) zusammen. Die kumulierte Batteriekapazität der mit der KWK-Technologie installierten Batteriekapazität, die Substitutionsmatrix sowie die aufgetretenen Energieflüsse sind in Tabelle 7.12 dargestellt.

Tabelle 7.12: Substitutionsmatrix konventioneller Heizungssysteme und KWK-Systeme, welche um einen Batteriespeicher erweitert wurden. Bilanzierte Energien beziehen sich auf den Zeitraum 01.10.2019–30.09.2020.

Einheit	$\sum_{14} C_{Nutz}^{Bat}$	Substituierte Heizungen				$\sum_{14} W_{Obj}^{Bezug}$	$\sum_{14} Q_{KWK+ZHG}^{Erz}$	$\sum_{14} E_{KWK}^{Erz}$
		Gesamt	Erdgas	Öl	Kohle			
Einheit	kWh	#				MWh	MWh	MWh
Stirling	35,05	7	6	0	1	187,80	155,17	19,50
Otto	31,03	5	5	0	0	267,71	219,15	43,77
BZ	18,00	2	0	2	0	120,62	99,40	17,50
Gesamt	84,08	14	11	11	0	576,13	473,72	80,77

\* bezogen auf  $H_{i 2020}$  Bottrop: 9,29 kWh/m<sup>3</sup> [75]

Betrachtet man den Anlagenpool mit 14 Anlagen wird im Mittel eine Einsparung von 37,9 % bezogen auf die Altheizung erzielt. Bezogen auf die mit Erdgas betriebenen Altheizungen wird eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von 32,8 % erzielt. Bezogen auf die mit Öl betriebenen Altheizungen wird eine mittlere Einsparung von 40,0 % erzielt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass zwei Brennstoffzellen bilanziert werden, bei denen der thermische Deckungsanteil aufgrund der hohen Stromkennzahl bei unter 15 % liegt. Somit wird der Großteil der bilanzierten Wärme aus dem Spitzenlastkessel gedeckt. Betrachtet man eine mit Kohle betriebene Altheizung kann eine Einsparung von 73,4 % erzielt werden. Ergebnisse der jeweils nach Altheizung aufgeteilten kumulierten Emissionen von getrennter und gekoppelter Erzeugung sind in Abbildung 7.26 dargestellt.

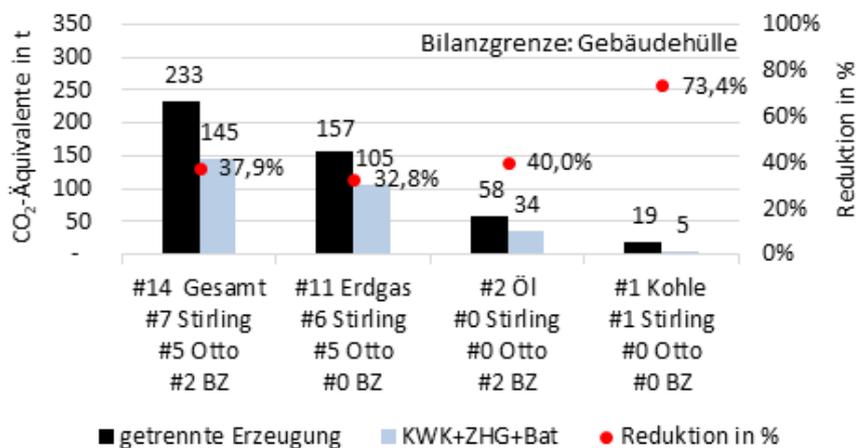


Abbildung 7.26: CO<sub>2</sub>-Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen, für 14 Objekte, bei denen das KWK-System um einen Batteriespeicher erweitert wurden. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 18,2 kW, die kumulierte nutzbare Batteriekapazität beträgt 84,08 kWh.

Bei Verwendung der äquivalenten Methodik zur Bestimmung der primärenergetischen Einsparungen liegt, bezogen auf mit Erdgas betriebene Altheizungen, eine mittlere Einsparung von 22,7 % vor. Erneut ist zu berücksichtigen, dass die Bilanzgrenze Gebäudehülle gewählt wurde und somit die Einsparungen nicht direkt auf die KWK-Anlage sondern auf das Versorgungssystem bestehend aus KWK-Anlage, Spitzenlastkessel und Batterie zu beziehen

sind. Bezogen auf Öl Altheizungen liegt eine relative Einsparung von 19,9 % vor. Bezogen auf Kohle Altheizungen liegt eine relative Einsparung von 54,5 % vor.

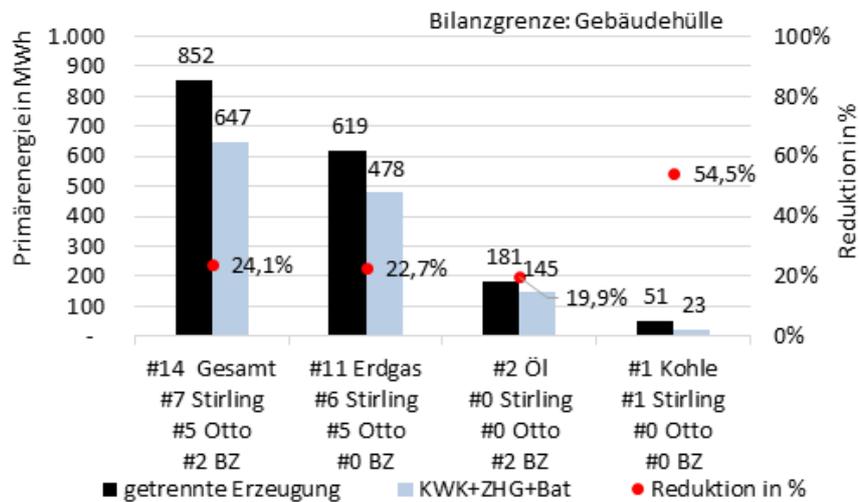


Abbildung 7.27: PE-Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen, für 14 Objekte, bei denen das KWK-System um einen Batteriespeicher erweitert wurde. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 18,2 kW, die kumulierte nutzbare Batteriekapazität beträgt 84,08 kWh.

Neben dem Vergleich mit Altheizungen wird mit der oben beschriebenen Methodik ein Vergleich mit neuen Gasbrennwertgeräten durchgeführt, für die ein Jahresnutzungsgrad von 92 % angenommen wird [67]. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die KWK-Anlagen 2014 in Betrieb genommen wurden und somit zum Teil in der Bilanzierungsperiode im sechsten Betriebsjahr sind. Weiterhin sind in den Jahresbilanzen teils kurze Anlagenausfälle mit bilanziert. Längere Anlagenausfälle sind als Ausschlusskriterium gewertet worden. Im Mittel führt der Einsatz der KWK-Systeme in Kombination mit einer Batterie zu einer Einsparung an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von 17,7 %. Im Vergleich zu Gasbrennwertgeräten kann mit den installierten Systemen eine Primärenergieeinsparung von 8,7 % erreicht werden.

Die direkt durch die Batterieentladung erzielte CO<sub>2</sub>- bzw. PE-Einsparung, resultierend aus dem Netzbezug, wird anhand der von den Batterien entladenen Energie  $E_{Bat}^{DC}$  bestimmt. Zu welchem Anteil der Hausverbrauch aus der Batterie gedeckt werden kann, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, wie dem Überschuss an KWK-Erzeugung, dem elektrischen Verbrauchsprofil des Haushaltes sowie Umwandlungs- und Speicherverlusten der Batterie. Die genannten Parameter und deren Abhängigkeiten werden in Abschnitt 7.4 im Detail analysiert. Als Einsparung an Netzbezug wird die Entladung der Batterie abzüglich der Netzladung  $E_{Bat}^{GCH}$ , also dem Mehraufwand an Netzbezug, der durch die Batterie verursacht wird, berechnet. Die energetische Bilanzierung mit der aus der Batterie entladenen Energie  $E_{Bat}^{DC}$  sowie der Netzladung  $E_{Bat}^{GCH}$  sind in Abbildung 7.28 dargestellt.

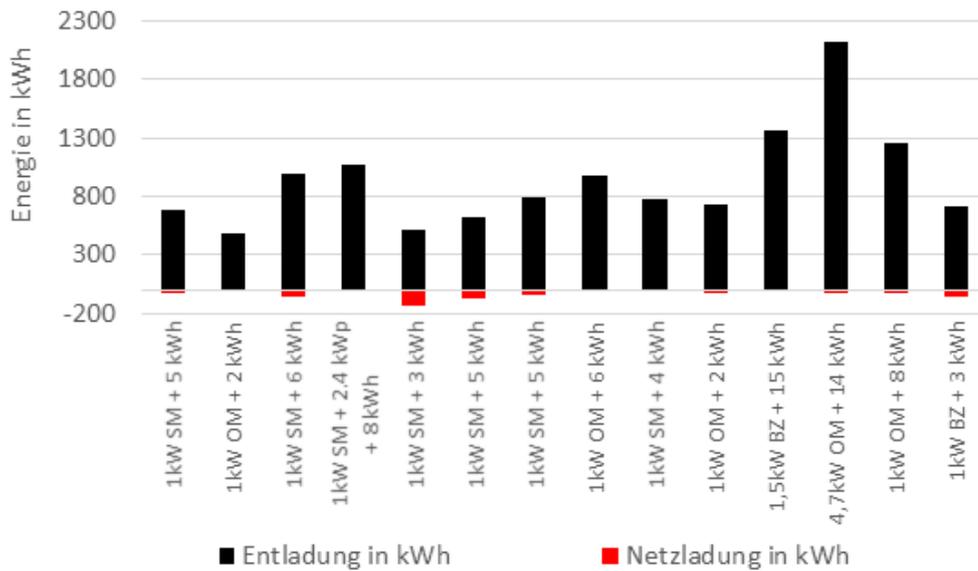


Abbildung 7.28: Jährliche Entladung und Netzladung der 14 bilanzierten Batterien mit zugehöriger KWK-Technologie und Nutzkapazität, wobei das Kürzel SM für stirlingmotorisch und OM für ottomotorische KWK-Anlagen steht.

Der kumulierte Wert für die Entlade-Energie der 14 Batterien für den Bilanzzeitraum beträgt 13.155 kWh. Die im gleichen Zeitraum auftretende Netzladung  $E_{Bat}^{GCH}$  beträgt 512 kWh. Somit entsteht netto ein vermiedener Netzbezug von 12.643 kWh. Bezogen auf den angenommen NRW Strommix entspricht dies 9.848 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, bezogen auf den DE-Mix 7.080 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten sowie 22.757 kWh Primärenergie. In Tabelle 7.13 sind die berechneten Werte zusammengefasst sowie die durch Umwandlungs- und Speicherverluste entstandene Reduktion der Einsparungen aufgeführt.

Tabelle 7.13: Kumulierte Energie der Batterieentladung, Netzladung, Umwandlungs- und Speicherverlust sowie netto Batterieentladung (vermiedener Netzbezug) zur Bestimmung von CO<sub>2</sub>- und PE-Einsparung bezogen auf Netzbezug und DE/NRW mit Faktoren aus [73].

	$\sum_{14} E_{Bat}^{DC}$	$\sum_{14} E_{Bat}^{GCH}$	Umwandlungs- und Speicherverluste	Batterieentladung netto
Energie in kWh	13.155	512	4.786	12.643
NRW-Mix CO <sub>2</sub> -Äquivalente in kg	10.248	399	3.728	9.849
DE-Mix CO <sub>2</sub> -Äquivalente in kg	7.367	287	2.680	7.080
PE-DE in kWh	23.680	922	8.615	22.757

### 7.2.2 Qualitative Bewertung des Nutzereinflusses

Als Nutzereinfluss werden unterschiedliche Kennzahlen des Anlagenpools im Detail betrachtet. Hierzu zählt der gesamte Wärmebedarf des Gebäudes  $Q_{KWK+ZHG}^{Erz}$ , welcher den Heizwärmebedarf des Gebäudes  $Q_{Heiz}^{Verbrauch}$ , die Speicherverluste des thermischen Speichers sowie

den Trinkwarmwasserverbrauch  $Q_{TWW}^{Verbrauch}$  beinhaltet. Vermessen werden die gesamte Erzeugung  $Q_{KWK+ZHG}^{Erz}$  sowie der Heizwärmebedarf  $Q_{Heiz}^{Verbrauch}$ . Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, welcher Anteil der gesamten Gebäudefläche beheizt ist. Einfluss auf den gesamten Wärmebedarf haben die beheizte Fläche, die Temperatur, welche in beheizten Räumen gehalten wird, sowie der Dämmstandard der Gebäude und das Lüftungsverhalten der Bewohner. Weiterhin spielt der Bedarf an Brauchwarmwasser eine Rolle, die die Bewohner direkt beeinflussen können. Der auf die Gebäudefläche bezogene spezifische Heizwärmebedarf  $Q_{S_{Heiz}}^{Verbrauch}$  in  $\frac{kWh}{m^2}$  gibt den Heizwärmebedarf pro Fläche an. In Abbildung 7.29 sind die thermischen Energieverbräuche von 15 Objekten dargestellt. Auf der x-Achse wurden das Baujahr, sowie die Wohnfläche aufgetragen.<sup>7</sup>

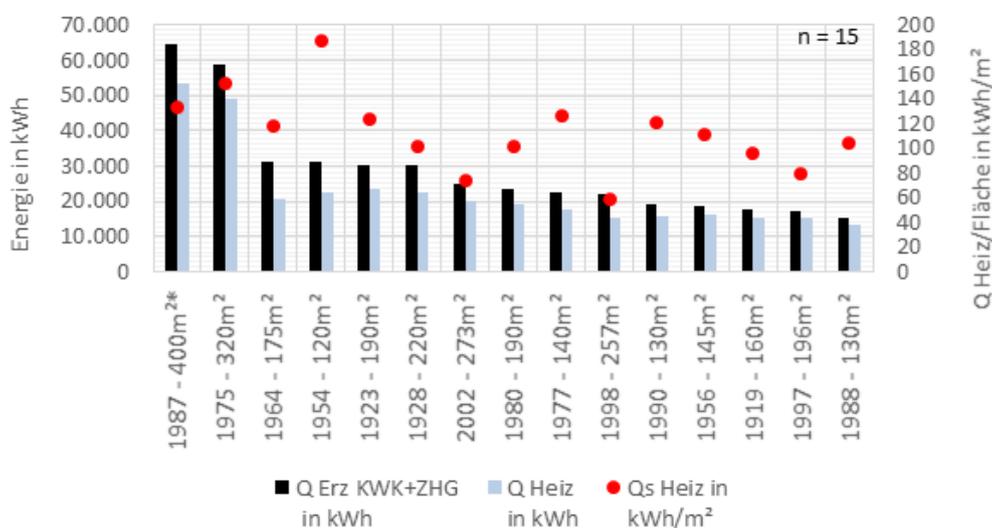


Abbildung 7.29: Jährlicher Wärmebedarf, Heizwärmebedarf, sowie spezifischer Heizwärmebedarf von 15 Objekten, welche um einen Batteriespeicher erweitert wurden, sortiert nach jährlichem Wärmebedarf. \*: Wohngebäude mit Gewerbe.

Den geringsten Heizwärmebedarf von 58,82 kWh/m² weist ein Gebäude mit dem Baujahr 1998 und 257 m² Fläche auf. Den höchsten spezifischen Wärmebedarf weist ein Gebäude mit 120 m² Fläche mit dem Baujahr 1954 auf. Der Wärmebedarf des Gebäudes bestimmt direkt die Laufzeit von motorischen KWK-Anlagen. Absolut ist der geringste Gesamtwärmebedarf  $Q_{KWK+ZHG}^{Erz}$  15.444 kWh/a und der Höchstwert 64.743 kWh/a. Bei 10 der 15 Anlagen beträgt der Anteil an Heizenergie über 80 % der erzeugten Energie. Bei den verbleibenden Haushalten liegt ein höherer Verbrauch an Brauchwarmwasser vor. Weiterhin relevant für KWK-Anlagen ist das Verhältnis von thermischem und elektrischen Verbrauch, da bei der Erzeugung ein festes Verhältnis, ausgedrückt über die Stromkennzahl, vorliegt. Gesamtwärmebedarfe der Gebäude  $Q_{KWK+ZHG}^{Erz}$  sowie der Stromverbrauch  $E_{Obj}^{Verbrauch}$  der 15 Objekte sind in Abbildung 7.30 dargestellt. Das größte Verhältnis von

<sup>7</sup> Teilweise konnten die Gebäude trotz nicht berücksichtigter elektrischer Bilanzierung thermisch vollständig bilanziert werden, daher wurden 15 Haushalte berücksichtigt.

elektrischem zu thermischen Verbrauch von 32 % liegt bei einem Gebäude mit 400 m<sup>2</sup> Fläche und dem Baujahr 1987 vor, welches nicht ausschließlich als Wohngebäude genutzt wird. Das mit 11 % geringste Verhältnis liegt bei einem Gebäude mit 190 m<sup>2</sup> Fläche aus dem Jahr 1980. Außer dem zum Teil gewerblich genutzte Gebäude weisen alle Gebäude ein Verhältnis von elektrischem zu thermischen Verbrauch von unter 25 % auf. Zehn der fünfzehn Gebäude weisen ein Verhältnis von elektrischem zu thermischen Bedarf von unter 20 % auf. Werden die Verhältnisse mit typischen Stromkennzahlen von ottomotorischen Mikro-KWK-Anlagen verglichen, liegen diese bei 0,4 bzw. für stirlingmotorische Anlagen bei 0,2. Für den betrachteten Gebäudepool liegt die Stromkennzahl von stirlingmotorischen KWK-Anlagen näher an dem gemessenen Verhältnis von elektrischem zu thermischem Verbrauch. Bei ottomotorischen KWK-Anlagen ist dementsprechend mit einem höheren elektrischen Überschuss und einer geringeren EVQ zu rechnen. Inwiefern der elektr. Überschuss durch die Batterie im Gebäude genutzt werden kann, wird in Abschnitt 7.4 analysiert. Ohne Batterie ist unter dem Gesichtspunkt der möglichst hohen Stromeigennutzung für den hier abgebildeten Gebäudepool die niedrigere Stromkennzahl von stirlingmotorischen KWK-Anlagen nicht von Nachteil.

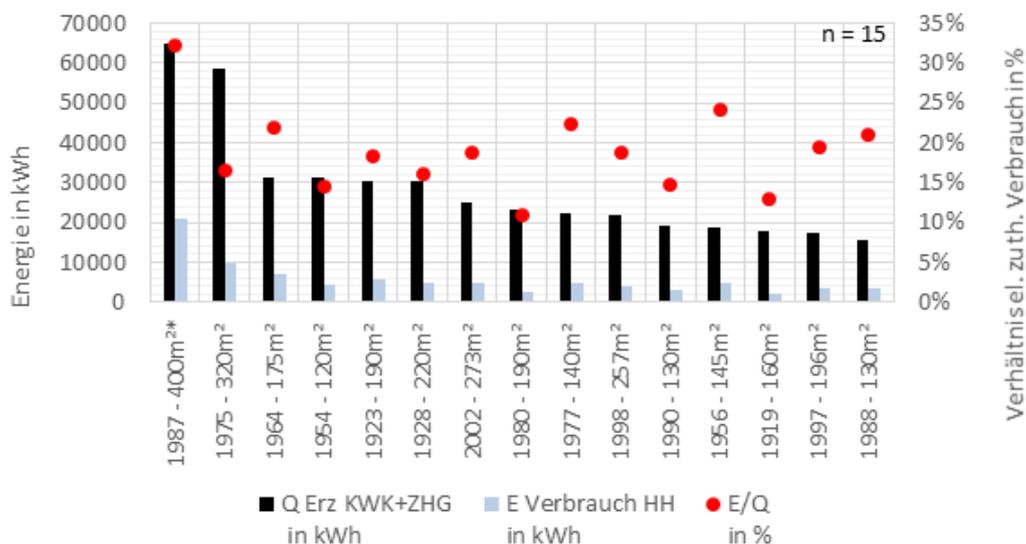


Abbildung 7.30: Jährlicher elektrischer und thermischer Verbrauch von 15 Objekten, welche um einen Batteriespeicher erweitert wurden, sortiert nach jährlichem Gesamtwärmebedarf. \*: Wohngebäude mit Gewerbe.

Neben der Analyse der Jahresverbräuche wird der Nutzereinfluss auch anhand der Verbrauchsprofile analysiert. Dies geschieht in einem ersten Schritt qualitativ über Heatmaps der Verbrauchsprofile, welche den elektrischen Objektverbrauch jedes Tages im Jahresverlauf darstellen. Anschließend werden die Verbrauchsprofile anhand von Jahresdauerkennlinien auch quantitativ ausgewertet. Viele Haushalte weisen den qualitativen Verlauf der Standardlastprofile mit einem Verbrauchspeak um ca. 8 Uhr, einem Peak zur Mittagszeit zwischen 12 - 13 Uhr sowie einen Abendpeak um ca. 20 Uhr auf. Bei Standardlastprofilen ist der Abendverbrauchspeak der höchste. 13 vergleichbare

Haushalte der Gebäudetypen D/R-Haus, EFH, und MFH wurden in Form von Heatmaps und Jahresdauerkennlinien ausgewertet, um den Nutzereinfluss darzustellen. Hierbei kann anhand von Heatmaps für jedes Objekt ein charakteristisches, wiederkehrendes Verbrauchsprofil identifiziert werden. Im Folgenden wird nach unterschiedlichen Verbrauchstypen unterschieden, abhängig von Uhrzeit des/der Verbrauchspeaks. Der erste betrachtete Haushalt weist einen erhöhten Verbrauch zur Mittagszeit um 12 Uhr auf und abends einen erhöhten Grundverbrauch. Das gesamte tägliche Verbrauchsprofile für den Auswertungszeitraum ist in Abbildung 7.31 dargestellt.

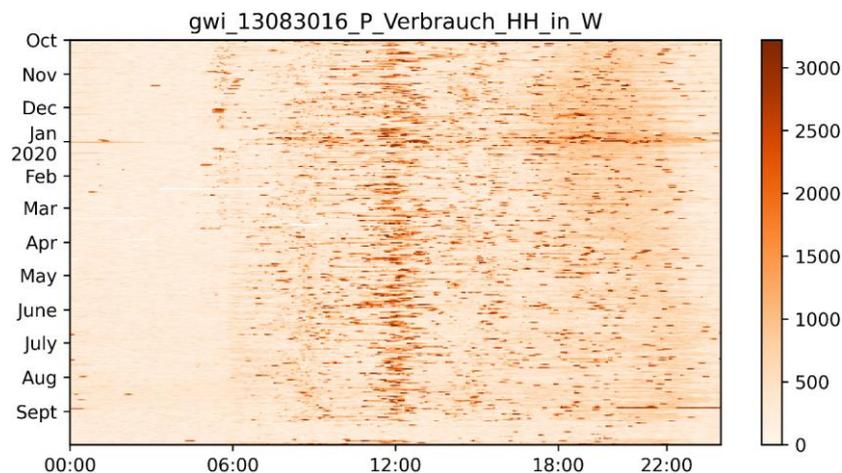


Abbildung 7.31: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 4.544 kWh und einer Grundfläche von 120 m<sup>2</sup>, mit einem Verbrauchspeak um 12 Uhr und einem erhöhten Grundverbrauch zwischen 18 und 22 Uhr.

Die folgende Darstellung (Abbildung 7.32) stellt einen ähnlichen Verbrauchstyp dar. Die abendliche Verbrauchserhöhung ist allerdings weniger stark ausgeprägt. Weiterhin ist der Verbrauchspeak zur Mittagszeit deutlich ausgedehnter. Bei den in der Heatmap dargestellten Werten handelt es sich um die Verbrauchsdaten eines Objektes mit 190 m<sup>2</sup> Grundfläche.

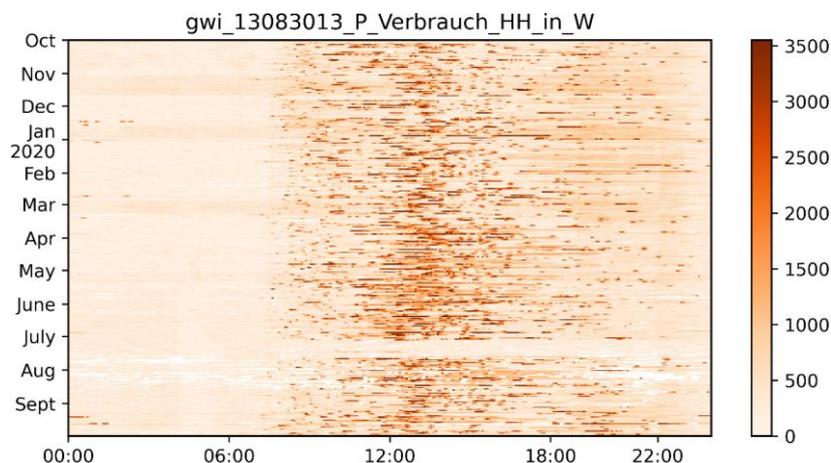


Abbildung 7.32: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 5.589 kWh und einer Grundfläche von 190 m<sup>2</sup>, mit einem Verbrauchspeak zwischen 11 und 15 Uhr und einem erhöhten Grundverbrauch zwischen 18 und 22 Uhr.

Ein abweichender Verbrauchstyp lässt sich anhand von drei Verbrauchspeaks (Morgens, Mittags und Abends) identifizieren. Beispielhaft hierfür ist das elektrische Verbrauchsprofil eines Objektes mit einem jährlichen Gesamtverbrauch von 2.538 kWh und 190 m<sup>2</sup> Grundfläche in Abbildung 7.33 dargestellt.

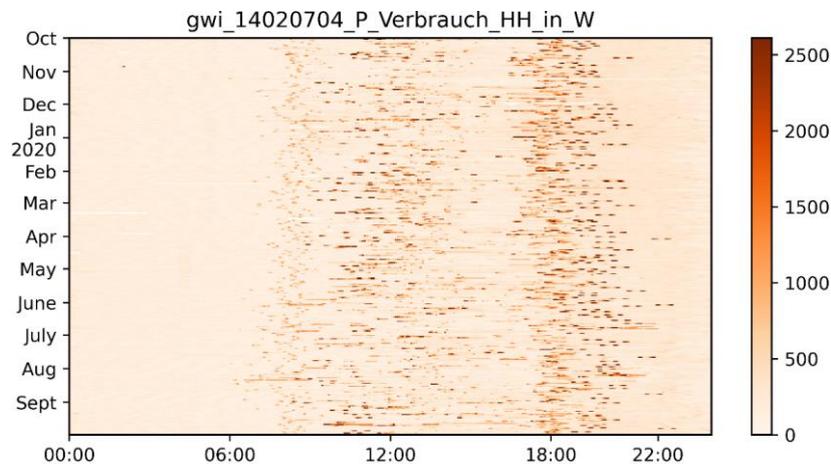


Abbildung 7.33: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 2.538 kWh und einer Grundfläche von 190 m<sup>2</sup>, mit Verbrauchsspeaks um 9 Uhr, 12 Uhr sowie abends zwischen 18 Uhr und 20 Uhr.

Ein Objekt mit drei Verbrauchsspeaks, welche sich nicht so deutlich voneinander abgrenzen ist in Abbildung 7.34 dargestellt, wobei morgens eine relativ geringe und kurze Verbrauchsspitze auftritt. Mittags ist ein Verbrauchsspeak vorhanden sowie ab 17 Uhr ein erhöhter Grundverbrauch.

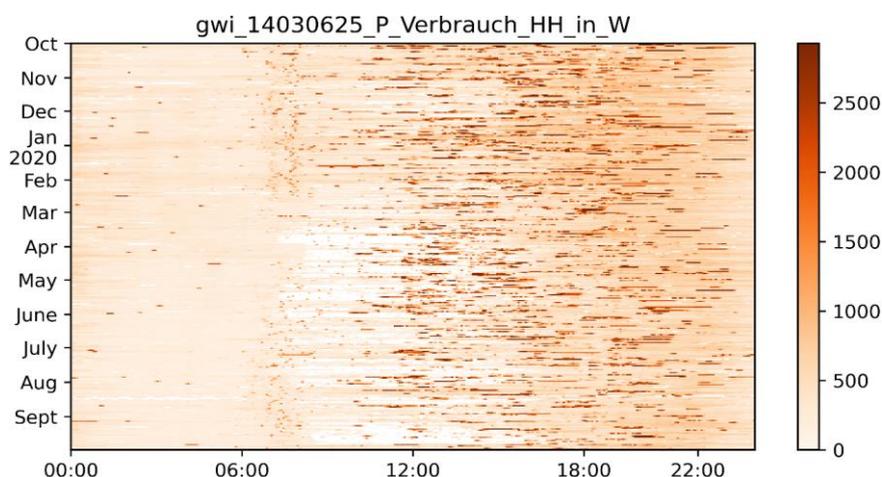


Abbildung 7.34: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 4.664 kWh und einer Grundfläche von 273 m<sup>2</sup>, mit Verbrauchsspeaks um 8 Uhr, 12 Uhr sowie abends zwischen 17 Uhr und 22 Uhr.

Neben den ersten beiden identifizierten Verbrauchertypen gibt es auch Objekte, welche Morgens den größten Verbrauchsspeak aufweisen, wie das in Abbildung 7.35 dargestellte Verbrauchsprofil.

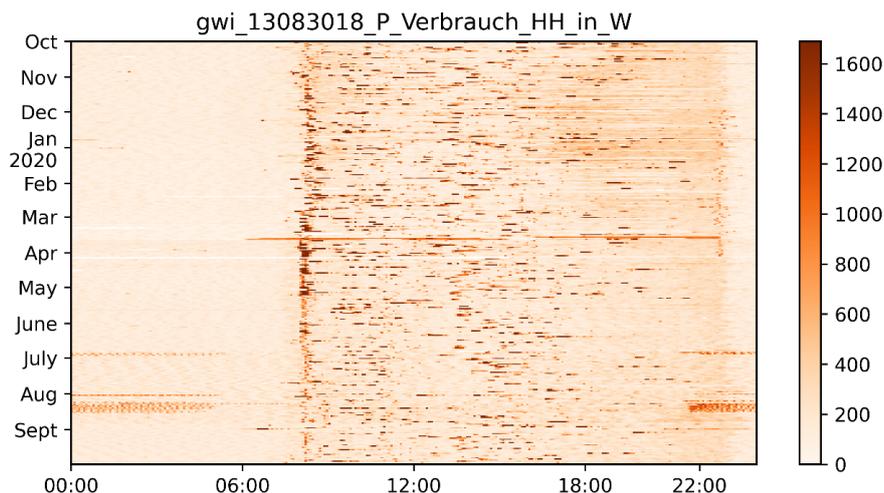


Abbildung 7.35: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 2.275 kWh und einer Grundfläche von 160 m<sup>2</sup>, mit Verbrauchspeaks um 8 Uhr und 16 Uhr.

Zur quantitativen Bewertung der Verbrauchsprofile wurden weiterhin die Jahresdauerkennlinien der Haushalte erstellt und anhand von fünf charakteristischen Punkten verglichen. Hierzu werden die Grenzleistungen bestimmt, welche in  $P_{90\%}^{Grenz}$ ,  $P_{75\%}^{Grenz}$ ,  $P_{50\%}^{Grenz}$ ,  $P_{25\%}^{Grenz}$ ,  $P_{5\%}^{Grenz}$  sowie  $P_{1\%}^{Grenz}$  der gemessenen 5-Min Zeitschritte nicht überschritten werden. Die Leistung, welche in 90 % des Jahres nicht unterschritten wird, wird im Folgenden als Grundlast bezeichnet. Sie gibt an, wie hoch die Leistung von Verbrauchern ist, die ganzjährig eingeschaltet sind und nicht vom Nutzer oder einer Zeitschaltuhr gesteuert werden. Beispielhaft wird die Jahresdauerkennlinie eines Haushaltes mit einem Jahresverbrauch von 2.275 kWh in Abbildung 7.36 dargestellt.

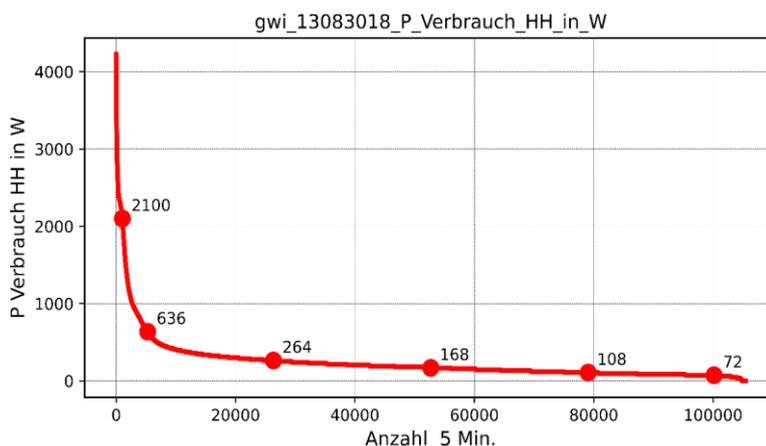


Abbildung 7.36: Jahresdauerkennlinie des elektrischen Verbrauchsprofils in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 2.275 kWh und einer Grundlast von 72 W. 1 % der Verbrauchswerte liegen über 2.100 W, 10 % der Verbrauchswerte liegen über 636 W.

Ein Anteil von 50 % der Leistung ist kleiner als 168 W. Bis zur 75 %-Grenzleistung  $P_{75\%}^{Grenz}$  tritt nur ein verhältnismäßig geringer Anstieg auf 264 W auf. 5 % der Leistung ist größer 636 W und 1 % der Leistung größer als 2.100 W. Bei dem dargestellten Haushalt handelt es sich um den Haushalt mit dem geringsten Stromverbrauch. Stellt man diesem Haushalt die Jahresdauerkennlinie eines Haushaltes mit einem Jahresverbrauch von 6.837 kWh

gegenüber, zeigen sich Unterschiede in der Grundlast, welche 300 W beträgt. Auch ist der Anstieg der Jahresdauerkennlinie bis zu einer Grenzleistung von  $P_{25\%}^{Grenz}$ , welche 828 W beträgt, deutlich steiler als bei der zuvor betrachteten Jahresdauerkennlinie.

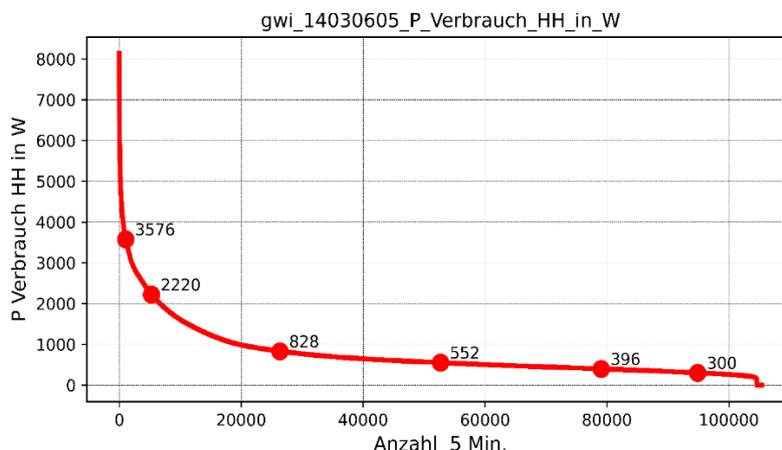


Abbildung 7.37: Jahresdauerkennlinie des elektrischen Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 6.836 kWh und einer Grundlast von 300 W. 1 % der Verbrauchswerte liegen über 3.576 W, 10 % der Verbrauchswerte liegen über 2.200 W.

Der Vergleich der Jahresdauerkennlinien der betrachteten 12 elektrischen Verbrauchsprofile ist in Abbildung 7.38 dargestellt. Profile mit höherer Grundlast weisen auch höhere Peakverbräuche auf.

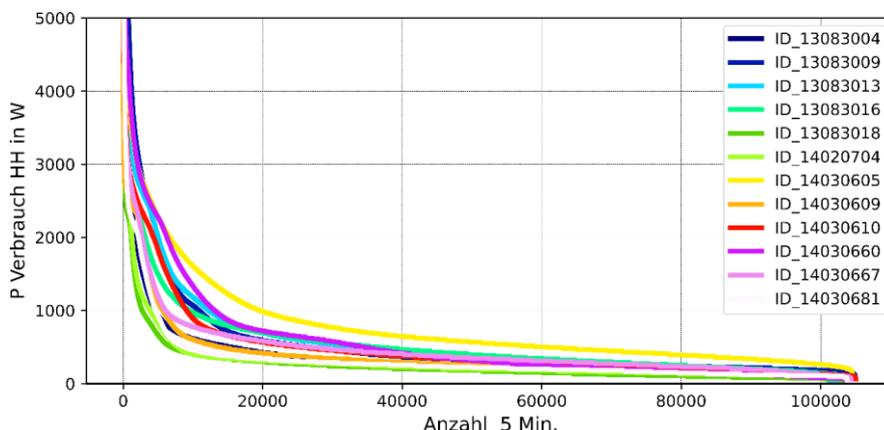


Abbildung 7.38: Vergleich der Jahresdauerkennlinien des elektrischen Verbrauchsprofil in W von 12 Objekten.

Die dargestellten Profile werden anhand des jährlichen Stromverbrauchs  $E_{HH}^{Ver}$  in kWh, dem mittleren Stromverbrauch  $\bar{P}_{Obj}^{Ver}$  in W, den oben beschriebenen fünf charakteristischen Grenzleistungen, der Energie der Grundlast  $E_{Obj}^{Grund}$  in kWh sowie dem Anteil der Grundlast am gesamten Verbrauch  $\rho_{Grund}$  in % charakterisiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.14 zusammengestellt.

Tabelle 7.14: Kennwerte zur quantitativen Bewertung von 12 Verbrauchsprofilen: Jährlicher elektrischer Verbrauch  $E_{Obj}^{Ver}$  in kWh, mittlerer Verbrauch  $\bar{P}_{Obj}^{Ver}$  in W, Grenzleistungen in W, die den jeweiligen zeitlichen Anteil überschreiten, Energie der Grundlast  $E_{Obj}^{Grund}$  in kWh sowie der Anteil der Grundlast am gesamten Verbrauch  $\rho_{Grund}$  in %.

	$E_{Obj}^{Ver}$ in kWh	$\bar{P}_{Obj}^{Ver}$ in W	1%	5%	25%	50%	75%	90%	$E_{Obj}^{Grund}$ in kWh	$\rho_{Grund}$ in %
ID_14030605	6.837	778	3576	2220	828	552	396	300	2.635	39
ID_13083013	5.589	636	3360	1920	588	360	228	120	1.054	19
ID_14030660	4.989	568	3792	2220	624	300	168	108	949	19
ID_14030610	4.570	520	2844	1740	492	300	204	144	1.265	28
ID_13083016	4.544	517	2676	1440	612	384	252	180	1.581	35
ID_13083009	4.542	517	4308	1884	504	312	240	204	1.792	39
ID_14030667	4.100	467	2760	1140	504	336	240	168	1.476	36
ID_13083004	3.396	387	2436	888	360	228	168	120	1.054	31
ID_14030609	3.239	369	2484	1056	372	240	156	108	949	29
ID_14030681	2.786	317	2304	876	300	216	156	120	1.054	38
ID_14020704	2.538	289	2316	780	288	192	144	108	949	37
ID_13083018	2.275	259	2100	636	264	168	108	84	738	32

Hierbei liegt der höchste jährliche Verbrauch bei 6.837 kWh, der geringste bei 2.275 kWh. Die hieraus abgeleiteten mittleren Verbräuche liegen entsprechend bei 778 W und 259 W. Die Grundlast dieser Objekte ( $P_{90\%}^{Grenz}$ ) liegt bei 300 W sowie 84 W. Betrachtet man die Grenzleistung welche nur von 1 % der Leistungen überschritten werden  $P_{1\%}^{Grenz}$ , so ergibt sich ein maximaler Wert von 3.576 W sowie 2.100 W für die beiden Haushalte. Die Objekte ID\_13083016 und ID\_13083009 liegen bezogen auf den gesamten Verbrauch mit 4.544 kWh und 4.542 kWh sehr nah beieinander und werden direkt miteinander verglichen. Hierbei weicht das Peaklastverhalten von ID\_13083009 ( $P_{1\%}^{Grenz} = 4.308 W$ ) deutlich von dem der ID\_13083016 ab ( $P_{1\%}^{Grenz} = 2.676 W$ ). Auch  $P_{5\%}^{Grenz}$  liegt mit 1.884 W deutlich über dem Vergleichshaushalt mit 1.440 W. Die hohen Grenzleistungen für Anteile von 1 % und 5 % können durch mehr vom Nutzer steuerbare Verbraucher mit höherer kurzfristiger Leistung in diesem Objekt erklärt werden. In den Bereichen  $P_{25\%}^{Grenz}$ ,  $P_{50\%}^{Grenz}$ ,  $P_{75\%}^{Grenz}$  liegt die Leistung bei ID\_13083016 höher. Der Anteil der Grundlast liegt zwischen maximal 39 % und einem minimalen Wert von 19 %.

Das Entladeverhalten der Batterien sollte an die Verbrauchsprofile in dem Sinne angepasst sein, dass die Wirkungsgradverluste in dem am häufigsten auftretenden Lastpunkt am geringsten sind. Die dargestellten Jahresdauerkennlinien legen nahe, dass dieser Punkt zwischen den Objekten abweicht und bei der Auslegung berücksichtigt werden muss. Dieser Punkt wurde auch in [39] behandelt. In den in diesem Abschnitt betrachteten Objekten wird ein Großteil der Leistung unterhalb von 300 W abgegeben.

### 7.2.3 Wirtschaftlichkeit

Um die Integration der Batterien zu bewerten, werden die Objekte mit Batteriespeicher nach dem Verfahren der VDI 2067 bewertet und mit anderen Versorgungssystemen, wie in den Vorberichten [66], [43], verglichen. Hierbei handelt es sich um ein dynamisches Verfah-

ren der Investitionskostenrechnung, welches auf der Annuitätenmethode basiert. Die Annuitätenmethode bildet die Lebenszykluskosten aller im System verbauten Komponenten ab und legt diese auf eine jährliche Annuität für alle betrachteten Systeme um, welche einen direkten Vergleich der Systeme ermöglicht. Da es sich um Systeme der häuslichen Versorgung handelt, fällt die Gesamtannuität  $A_g$  immer negativ aus. Sie setzt sich aus der Annuität der Erlöse  $A_{g,Erlöse}$  abzüglich der vier auftretenden Annuitäten der kapitalgebundenen Kosten  $A_{g,Kapital}$ , betriebsgebundenen Kosten  $A_{g,Betrieb}$ , bedarfsgebundenen Kosten  $A_{g,Bedarf}$  sowie der Annuität der sonstigen Kosten  $A_{g,S}$  zusammen. Die Gesamtannuität bildet für einen Betrachtungszeitraum  $T$ , die unter Berücksichtigung von Kapitalkosten jährlich anfallende Zahlung. Für die Analysen dieses Berichts wird die Methodik aus dem Vorprojekt übernommen und daher nur auf Änderungen eingegangen, für eine genaue Beschreibung der angewandten Methodik sei auf [76] und [65] verwiesen. Die Grundannahmen zur Bewertung der Systeme sind in Tabelle 7.15 zusammengefasst. Wobei alle Annahmen zur Nutzungsdauer der Anlagen der VDI 2067 entnommen sind. Lediglich die zyklische Lebensdauer der Batterien ist den jeweiligen Herstellerangaben entnommen. Annahmen zu Investitionskosten und Wartungskosten sind [69] entnommen. Die aktuellen Arbeits- sowie Grundpreise zur Versorgung mit Strom, Wärmepumpenstrom sowie Erdgas sind der Website des regionalen Versorgungsunternehmens ELE Verteilnetz GmbH entnommen [77]. Alle Gas- und Wärmemenge in dem Abschnitt Wirtschaftlichkeit beziehen sich auf den Brennwert. Die spezifischen Preise für CO<sub>2</sub> wurden aus dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) entnommen, wobei im Zeitraum ab 2026 der mittlere Preiskorridor ohne weitere Steigerung angenommen wurde, was dem Vorgehen von [78] entspricht. Die im Projekt betrachteten Anlagen wurden größtenteils 2013/14 in Betrieb genommen und fallen unter das Förderregime des KWKG 2012. Da die Batterien im Jahr 2018/19 nachträglich installiert wurden, wird für die Wirtschaftlichkeitsberechnung ein fiktives gemeinsames Inbetriebnahme-Datum gewählt, damit ein Vergleich mit anderen Versorgungstechnologien sinnvoll ist. Hierbei werden KWK-Anlagen und Batterien einmal in einem geförderten Fall betrachtet, um den Fall der Projektteilnehmenden abzubilden als auch in einem Fall in dem die marktüblichen Investitionskosten angenommen werden, um die Technologiekombination auch unabhängig von der Projektförderung nach aktuellen Fördersätzen zu betrachten.

Tabelle 7.15: Übersicht über Annahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung zum Vergleich unterschiedlicher Versorgungssysteme.

	Einheit	Wert	Quelle
Betrachtungszeitraum	Jahre	15	[65], [76]
Nutzungsdauer GBG	Jahre	18	[76]
Nutzungsdauer KWK	Jahre	15	[76]
Nutzungsdauer Batterie	Zyklen	Herstellerangabe	Hersteller
Kosten Inv GBG*	€	5.600	[69]
Kosten Inv KWK*	€	Projektpreis: 3.300 € /Realbetrag	[65]
Kosten Inv Batterie*	€	Projektpreis: 0 € /Realbetrag	Hersteller
Kosten Wartung GBG	€/a	191	[69]
Kosten Wartung KWK	€	Realbetrag	Hersteller
Kosten Wartung Batterie	€	0	Hersteller
Jahresnutzungsgrad GBG	%	92	[67]
spez. Strompreis	ct/kWh	27,68	[77]

Grundpreis Strom	€/Monat	9,31	
spez. Gaspreis	ct/ kWh <sub>H<sub>s</sub></sub>	6,56	[77]
Grundpreis Gas	€/Monat	11,9	
Brennwert Erdgas H <sub>s</sub>	kWh <sub>H<sub>s</sub></sub> /m <sup>3</sup>	10,31	[75]
Umrechnungsfaktor H <sub>s</sub> /H <sub>i</sub>	-	1,11	[79]
Zinsfaktor	%	3	[69]
Preisänderung Wartung	%	0	[69]
Preisänderung Erdgas	%	0	[80]
Preisänderung Strom	%	1	[81]
spez. Preis CO <sub>2</sub> < 2021	€/ t <sub>CO<sub>2</sub></sub>	0	
spez. Preis CO <sub>2</sub> 2021	€/t	25	
spez. Preis CO <sub>2</sub> 2022	€/ t <sub>CO<sub>2</sub></sub>	30	
spez. Preis CO <sub>2</sub> 2023	€/ t <sub>CO<sub>2</sub></sub>	35	[82]
spez. Preis CO <sub>2</sub> 2024	€/ t <sub>CO<sub>2</sub></sub>	45	
spez. Preis CO <sub>2</sub> 2025	€/ t <sub>CO<sub>2</sub></sub>	55	
spez. Preis CO <sub>2</sub> >= 2026	€/ t <sub>CO<sub>2</sub></sub>	60	
BAFA Basisförderung	€	P ≤ 1 IBN ≤ 31.12.14: 1.425 € P ≤ 1 IBN > 01.01.15: 1.900 € P ≤ 4 IBN ≤ 31.12.14: 1425€+285€/kW P ≤ 4 IBN > 01.01.15: 1.900 €+300 €/kW P ≤ 10 IBN ≤ 31.12.14: 2280€+95€/kW P ≤ 10 IBN > 01.01.15: 3400 €+10 €/kW	[83]
BAFA Bonusförderung**	€	Nach Liste förderfähige Anlagen	[83]
Progres.nrw – KWK**	€	BAFA Basisförderung IBN ≤ 31.12.14	[84]
BAFA Förderung BZ	€	6800 € + 550€/kW	[85]

\*Inklusive Installationskosten \*\*Beide Förderprogramme sind zum heutigen Zeitpunkt ausgelaufen.

Für die betrachteten Anlagen wird von einem pauschalierten KWK-Zuschuss für eine Inbetriebnahme (IBN) vor dem 01.01.2016 ausgegangen, welcher geringer ausfällt als der Zuschlag für eine IBN nach dem 01.01.2016. Die aus dem „Mini-KWK-Impulsprogramm“ stammende Förderung ist zum 31.12.2020 ausgelaufen und eine Basisförderung sowie Bonusförderung für besonders strom- oder wärmeeffiziente Anlagen kann nicht mehr in Anspruch genommen werden [86]. Die Möglichkeit zur Bezuschussung einer Brennstoffzelle besteht über das Programm der KfW „Energieeffizientes Bauen und Sanieren“ [85].

Weiterhin werden im Folgenden die Annahmen zur Berechnung der Erlöse sowie Steuer- und Umlagepflichten beschrieben, welche in Tabelle 7.16 zusammengefasst sind. Zur Berechnung der Einnahmen wird ein üblicher Preis von 3,4645 ct/kWh für die eingespeiste Energie angenommen [87]. Es wird mit einer pauschalierten KWK-Zuschlagszahlung von 5,41 ct/kWh für 30.000 VBH gerechnet, welche dem KWKG 2012 entspricht. Die Bezuschlagung für Anlagen, die nach dem 01.01.2016 in Betrieb genommen wurden und für Anlagenbetreibende die sich für die pauschalierte Bezuschlagung entschieden haben, beträgt 4 ct/kWh für 60.000 VBH für Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 2 kW<sub>el</sub>. Wird keine pauschalierte Bezuschlagung gewählt wird ein Zuschlagssatz von 8 ct/kWh für den in das Stromnetz eingespeisten Strom sowie 4 ct/kWh für selbst verbrauchten Strom ausgezahlt. [87] Für einen tiefergehenden Einblick und Vergleich von Vergütungssätzen und Vergütungsoptionen für KWK-Anlagen größerer Leistungsklassen und abweichender Inbetriebnahmezeitpunkte sei auf [88] verwiesen.

Tabelle 7.16: Übersicht über Förderung, Steuern, und Mikro-KWK-Anlagen, welche für die Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 genutzt werden.

	Einheit	Wert	Quelle
Üblicher Preis	ct/kWh	3,47 (Durchschnitt der letzten sechs Quartale)	[89]
KWK-Zuschlag	ct/kWh	Pauschaliert für IBN < 01.01.2016 5,41 ct/kWh für 30.000 VBH	[87]
KWK-Zuschlag	ct/kWh	Pauschaliert für IBN >= 01.01.2016 4 ct/kWh für 60.000 VBH	[87]
Energiesteuer	ct/kWh	Teilentlastung über volle Betriebsdauer (Brennwertbezogen) 0,442	[90]
vermiedene Netzentgelte	ct/kWh	0,74	[91]
Stromsteuer	-	Befreiung für Eigenverbrauch nach § 12 d StromStv	[92]
EEG-Umlage	-	§ 61 a Entfall der EEG-Umlage: Kleinanlagenregelung, EEG-Umlage befreit für installierte Leistung < 10 kW und Eigenverbrauch < 10 MWh/a	[93] [94]
Umsatzsteuer	-	§ 19 UStG: nach Besteuerung von Kleinunternehmern: wenn Umsatz zuzüglich der darauf entfallenden Steuer im vorangegangenen Kalenderjahr 22.000 € nicht übersteigen	[88] [95]
Einkommenssteuer	-	Durch Installation der Batterie steigt die EVQ in einigen Fällen über 90 %, was dazu führt, dass unter 10 % betrieblicher Nutzung der KWK-Anlage vorliegt → keine einkommensteuerliche Berücksichtigung Tritt ein Totalgewinn (Summe alle das BHKW/Batterie betreffender – Ein oder Ausgaben) auf, wird eine Einkommenssteuer nach der in [42] beschriebenen Methodik berechnet.	[42]

Eine Änderung aus dem Jahr 2018 im Energiesteuergesetz betrifft auch die Bestandsanlagen mit IBN vor dem 31.12.2014. Durch die Novelle im Energiesteuergesetz sind ab dem Jahr 2018 die Investitionsförderungen einer vollständigen Energiesteuererstattung gegenzurechnen. Hierbei werden für alle Investitionskosten Zuschüsse ab dem Jahr 2012 berücksichtigt. Es wird also nicht die volle Energiesteuer erstattet, sondern abzüglich der Investitionsbeihilfen. [86] Somit kann es ökonomisch sinnvoll sein, nur die Teilerstattung in Anspruch zu nehmen, welche für den gesamten Nutzungszeitraum erstattet wird. In dieser Betrachtung wird mit den aufgeführten Investitionszuschüssen gerechnet. Folglich wird von einer Teilerstattung der Energiesteuer von 0,442 ct/kWh, die für das von der KWK-Anlage bezogene Erdgas erhoben wurde, gerechnet. [90] Weiterhin werden für eingespeisten KWK-Strom 0,74 ct/kWh vermiedene Netzentgelte als Erlöse angenommen. [96]

Es wird von einer Befreiung von der Stromsteuer für den selbst verbrauchten Strom nach § 12 d StromStv ausgegangen. Der aktuelle Stromsteuersatz würde ohne Befreiung 2,05 ct/kWh betragen [88]. Auch wird von einer Befreiung der EEG-Umlage, nach § 61 a des EEG 2011, auf selbst verbrauchten Strom ausgegangen, da die „Kleinanlagenregelung“ für installierte Leistungen <10 kW greift. Alle Strommengen bis 10 MWh/a Eigenverbrauch werden EEG-umlagebefreit betrachtet. Der darüber hinaus gehende Eigenverbrauch wird mit 40 % EEG-Umlage belastet. Für tieferegehende Informationen zu den 2018 neu geregelten Bestimmungen zur EEG-Umlage auf eigenerzeugte Strommengen, sei auf [97] verwiesen.

Für die in diesem Abschnitt durchgeführten Berechnungen werden die betrachteten Objekte nach der Kleinunternehmerregelung nach § 19 UStG behandelt. Was aus der angenommenen Unterschreitung des Grenzwertes von 22.000 € Brutto-Umsatz im Kalenderjahr resultiert. Abhängig von Einnahmen aus Einspeisung und Bezuschussung der Investitionskosten kann die Umsatzgrenze überschritten werden und ist im Einzelfall zu prüfen. Weiterhin muss je nach Option (Regelbesteuertes Unternehmen/ Kleinunternehmer) zwischen dem Aufwand für eine Umsatzsteuererklärung und den Einnahmen eines Vorsteuerabzuges gewählt werden. Soll der Aufwand für die Abrechnung gering gehalten werden, ist die Kleinunternehmer-Regelung zu wählen. [98] Für weitere Hinweise zur Umsatzsteuer sei auf [42], [99] und [100] verwiesen.

Zur Berechnung der abzuführenden Einkommenssteuer sind unterschiedliche Fälle zu betrachten. Es ist zu unterscheiden, ob durch die installierte Batterie die EVQ über 90 % steigt. Ist dies der Fall entfällt die Einkommenssteuer, da unter 10 % der Anlagen gewerblich (Anteil der ins Netz eingespeisten Energie) genutzt werden. [42] Liegt die EVQ unter 90 %, wird Abhängig davon, ob im Betrachtungszeitraum ein Totalgewinn vorliegt oder nicht, die Einkommenssteuer erhoben. Der Totalgewinn wird aus allen Einnahmen und Ausgaben über den Betrachtungszeitraum berechnet.

Zum Projektende (02.06.2021) wurde vom bayrischen Landesamt für Steuern eine umfassende und eindeutige Hilfestellung für die steuerliche Behandlung von PV-Anlagen und KWK-Anlagen bis zu einer elektrischen Leistung von 2,5 kW herausgegeben. Diese beinhaltet eine standardisierte Erklärung, welche fehlende Gewinnabsicht bescheinigt und somit von einkommenssteuerlichen Verpflichtungen befreit. Weiterhin sind auch die Grenzwerte für umsatzsteuerliche Grenzwerte transparent erläutert. [101]

Vergleicht man die Objekte mit und ohne Batterie, werden unterschiedliche Kosten- und Erlösbestandteile durch die Batterie beeinflusst. Neben der Steigerung der Investitionskosten treten auch Änderungen bedarfsgebundener Kosten auf. Die Entladung der Batterie führt zu einer Reduktion der Strombezugskosten. Demgegenüber stehen entgangene Erlöse durch die Beladung der Batterie, welche aus der Vergütung mit dem üblichen Preis bzw. der Erstattung der vermiedenen Netznutzungsentgelte ohne Batterie resultieren würden. Da von einer pauschalierten Zuschlagszahlung ausgegangen wird, welche nicht zwischen Einspeisung und Eigenverbrauch unterscheidet, ändert sich der KWK-Zuschlag nicht. Neben der unterschiedlichen Gewichtung unterscheiden sich die Energiemengen auf Grund der Speicherverluste. Die Kosten für Gasbezüge ändern sich nicht, da die KWK-Anlagen wärmegeführt betrieben werden. Weiterhin steigen die Strombezugskosten der Objekte mit Batterie um den erhöhten Netzbezug zur Ladung der Batterie. In einem ersten Schritt wird die Wirtschaftlichkeit eines Versorgungssystems aus KWK-System und Batterie gegenüber einem neu installierten Gasbrennwertgerät mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % verglichen. [69] Hierbei wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass für die Vergleichssysteme die vollen Investitionskosten betrachtet werden, für die KWK-Systeme 3.300 € sowie für die Batterien

0 €, was den für die Teilnehmenden angefallenen Investitionskosten entspricht. [65] In einem zweiten Schritt werden die Systeme mit marktüblichen Investitionskosten verglichen. Zur Darstellung der Methodik wird im Folgenden die wirtschaftliche Vergleichsrechnung eines Objektes mit einer Wohnfläche von ca. 140 m<sup>2</sup> analysiert, welches einen Heizwärmebedarf von ca. 18.000 kWh sowie einem Stromverbrauch von ca. 5.000 kWh im Bilanzzeitraum hatte. Im Objekt ist eine ottomotorische KWK-Anlage der Leistungsklasse 1 kW sowie ein Batteriespeicher mit 6 kWh Kapazität verbaut. Die KWK-Anlage hat ca. 5.440 kWh elektrische Energie erzeugt. Hiervon wurden ca. 3.850 kWh im Objekt verbraucht (einschließlich Ladung der Batterie). 1.590 kWh wurden ins Netz eingespeist. Mit ca. 1.290 kWh wurde die Batterie aus dem KWK-Überschuss beladen, mit 10 kWh aus dem Netz. Die Batterie hat im Betrachtungszeitraum ca. 980 kWh in das Hausnetz entladen, was einem Jahresnutzungsgrad von ca. 75 %<sup>8</sup> entspricht. Um die Auswirkungen der Batterie darzustellen sind in Abbildung 7.39 die jährlichen Annuitäten der Energiekosten für Heizung/KWK-System, Strombezugskosten, kapitalgebundener Kosten, betriebsgebundener Kosten sowie die Annuität der Erlöse dargestellt.

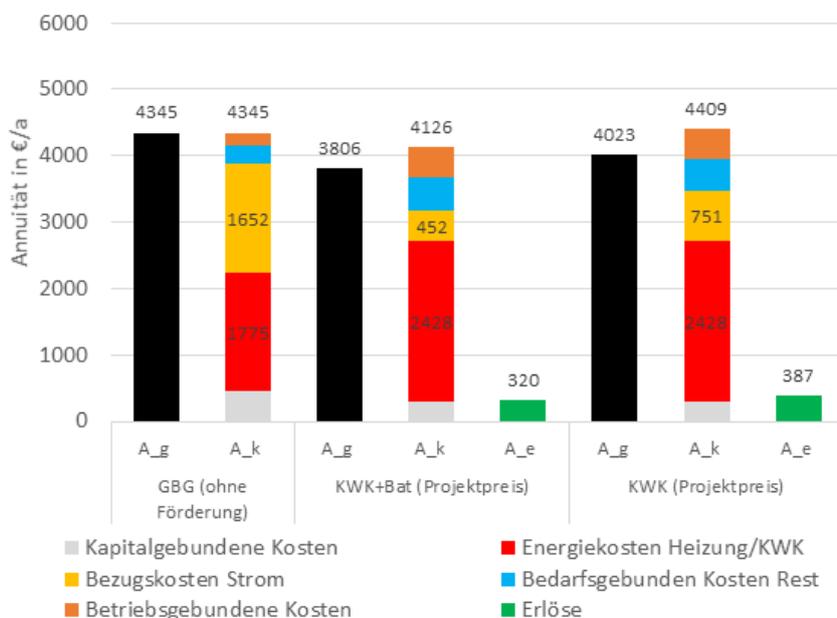


Abbildung 7.39: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (Projektkosten) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung).

Vergleicht man das KWK-System mit und ohne Batterie, so ergibt sich für das System mit Batterie eine Reduktion der Gesamtannuität  $\Delta A_g$  von 217 €/Jahr. Die Gasbezugskosten bleiben unverändert zwischen Systemen mit und ohne Batterie. Die Strombezugskosten reduzieren sich um 299 €/Jahr. Die Erlöse reduzieren sich um 67 €/Jahr durch die reduzierte Einspeisung. Weiterhin erhöhen sich die restlichen bedarfsgebundenen Kosten (CO<sub>2</sub>-Steuer, Umsatzsteuer, die durch fiktive Rücklieferung vom EVU anfällt) um 16 €/Jahr. Für die im Projekt vorliegenden Rahmenbedingungen konnte so im Vergleich zur Installation eines

<sup>8</sup> Unter Berücksichtigung vom Ladungszustand zum Beginn und Ende des Bilanzierungszeitraums.

neuen Gasbrennwertgerätes die jährliche Gesamtannuität um 539 €/Jahr gesenkt werden. Wäre im gleichen Zeitraum nur eine KWK-Anlage verbaut gewesen, wäre eine Reduktion um 322 €/Jahr erzielt worden. Vergleicht man GBG und KWK-System erhöht sich durch den erhöhten Gasbezug eines KWK-Systems die CO<sub>2</sub>-Steuer über 15 Jahre in der Annuität um 192 €/a. Im Folgenden werden Gesamtannuitäten auf das Referenzsystem mit Gasbrennwertgerät normiert und die Reduktion im Vergleich zu diesem angegeben. Der relative Vergleich von zehn motorischen KWK-Systemen der Leistungsklasse 1 kW ist in Abbildung 7.40 dargestellt. Im Mittel wird eine Reduktion der  $\Delta A_g$  zwischen Systemen mit und ohne Batterie von ca. 4 % erreicht. Bei den zehn betrachteten Systemen tritt eine minimale Einsparung von 2 % bzw. 97 €/Jahr für eine 1 kW ottomotorische KWK-Anlage in Kombination mit einer 4,8 kWh Batterie auf. Die maximale Einsparung von 5 % tritt bei einer 1 kW stirlingmotorischen KWK-Anlage in Kombination mit einer 5 kWh Batterie auf.

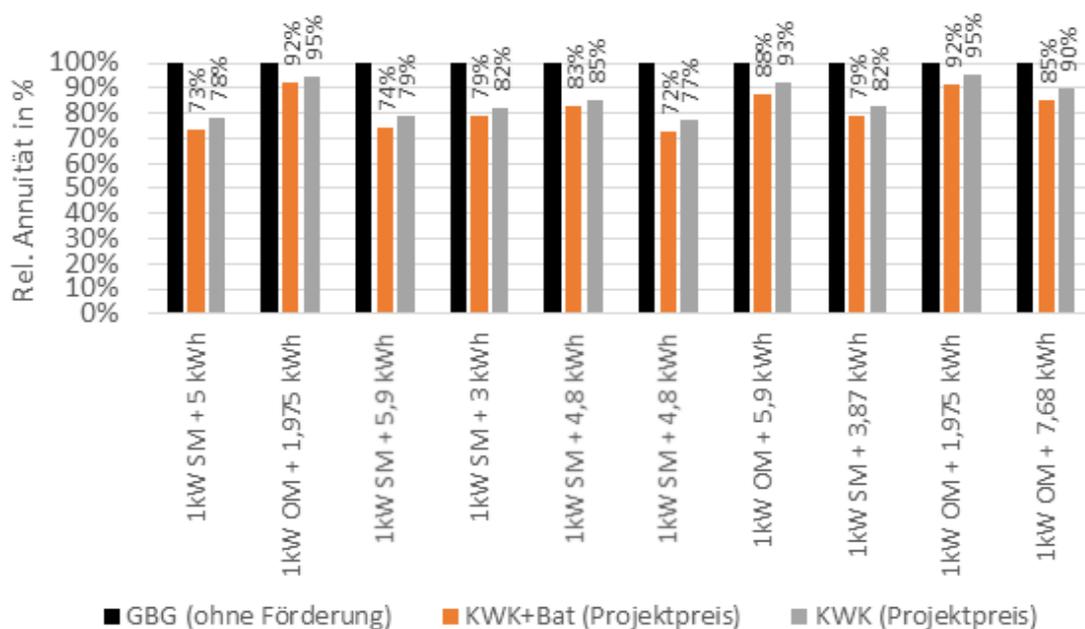


Abbildung 7.40: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (Projektkosten) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung) mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % von 10 motorischen Blockheizkraftwerken der Leistungsklasse 1 kW. Der schwarze Balken gibt die Gesamtannuität  $A_g$  des Gasbrennwertgerätes an, welche auf 100 % normiert sind. Der orange und graue Balken gibt die durch das KWK-System/Batterie erzielten Einsparungen an.

Die Einsparungen durch die Batterien sind als relativ gering zu bewerten, was durch unterschiedliche Faktoren zu erklären ist. Grundsätzlich ist bei dem Vergleich zwischen Systemen mit KWK-Anlage die wirtschaftliche Gewichtung des KWK-Überschusses entscheidend. Wird dieser ohne Batterie ins Netz eingespeist und mit dem üblichen Preis vergütet sowie vermiedene Netznutzungsentgelte berücksichtigt, resultieren mit den Annahmen aus Tabelle 7.15, Einnahmen in Höhe von 4,2 ct/kWh. Durch die Batterie kann 1 kWh KWK-Überschuss gespeichert werden und abzüglich des Wirkungsgrades von ca. 70 % einem Netzbezug von 19,376 ct/kWh gegengerechnet werden. Es liegt eine Differenz von 15,17 ct/kWh für jede

in die Batterie eingespeiste kWh vor. Je höher die in der Batterie zwischengespeicherten Energiemengen, desto mehr kommt der beschriebene Kostenvorteil zum Tragen.

Im Feldversuch hat sich gezeigt, dass bei der Kombination mit motorischen KWK-Anlagen und Batterien im Winter häufig ein Zustand entsteht, bei dem die Batterie einen SoC von 100 % aufweist, da die KWK-Anlage lange läuft und es zu keiner Batterieentladung kommt. Dieser Zustand stellt sich tendenziell eher bei ottomotorischen KWK-Anlagen ein, da diese bedingt durch ihre geringere thermische Leistung in der Heizperiode mehr laufen. Oft läuft die KWK-Anlage hier durch und die elektrische Leistung der KWK-Erzeugung liegt über der Grundlast des Objektes. Die beiden ottomotorischen KWK-Anlagen der Leistungsklasse 1 kW, welche mit den 2 kWh Batterien kombiniert wurden, erreichen daher geringe Einsparungen der Batterie von 2 % bzw. 3 %. Bei stirlingmotorischen KWK-Anlagen ist dies seltener der Fall, dafür ist die auftretende Netzladung hier höher, was den Effekt teilweise kompensiert. Im Sommer stellt sich der gegenteilige Zustand ein, die KWK-Anlage läuft wenig und die Batterie kann keine überschüssige Energie aufnehmen. Dieses Verhalten wird in Abschnitt 7.4 quantitativ bewertet. Das beschriebene Erzeugungsverhalten motorischer KWK-Anlagen in Kombination mit einer Batterie ist im Vergleich zu einer PV-Anlage mit einer Batterie als Nachteil zu bewerten, da im PV-Fall die Batterie nach Sonnenuntergang täglich ein Zeitfenster zum Entladen der Batterie aufweist. Im Fall von wärmegeführten motorischen KWK-Anlagen ist dies nicht zwangsläufig gegeben. Bei weiterer technischer Entwicklung müsste dieser Umstand auch in der Regelung der Anlage berücksichtigt werden. Ein weiterer negativer Einflussfaktor ist die im Sommer auftretende Netzladung, welche zusätzlichen Netzbezug verursacht, der mit dem vollen Strompreis stark ins Gewicht fällt und bei einer Systemauslegung zu berücksichtigen ist. Ein System, bei dem die Batterie aus PV oder einer Brennstoffzelle gespeist wird, weist geringere Anteile von Netzladung auf, da auch im Sommer ausreichend Überschüsse erzeugt werden, um die Batterie über dem minimalen SoC zu halten. Jedoch ist der Jahresnutzungsgrad der Batterie in Kombination mit einer Brennstoffzelle, aufgrund der geringeren Beladeleistung, geringer.

Im Folgenden werden die Systeme ohne Förderung der Batterie betrachtet. Die spezifischen Kosten exklusive und inklusive Installationskosten der verwendeten Batterie sind in Abbildung 7.41 dargestellt. Sowohl bei den Batteriepreisen an sich als auch bei den Investitionskosten treten erhebliche Unterschiede auf. Die Installationskosten der Handwerksbetriebe liegen zwischen 952 € und 4.505 €. Unterschiedliche Faktoren haben Einfluss auf die Installationskosten. Hierzu zählen:

- Ist zur Installation der Batterie mehr als eine Person notwendig, z.B. weil die Batterie aufgrund von Größe oder Gewicht nicht allein transportiert werden kann?
- Wie ist die Einbausituation im Haus? Wo soll die Batterie stehen und wo befindet sich der Stromverteilerkasten?
- Ist die Elektroverteilung auf dem erforderlichen Stand? In einigen Objekten müssen auch Teile der Elektroverteilung erneuert werden.

- Wie groß ist die Erfahrung des Installateurs mit der jeweiligen Batterie und der verwendeten Software?
- Treten bei der Installation Fehler auf?

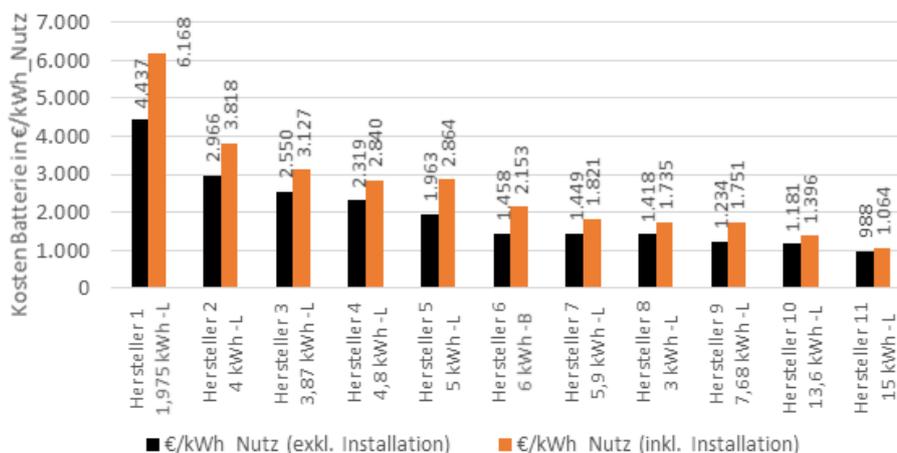


Abbildung 7.41: Spezifische Investitionskosten der im Feld installierten Batteriespeicher von elf unterschiedlichen Herstellern sortiert nach spezifischen Batteriekosten in €/kWh\_Nutz brutto inklusive und exklusive Installationskosten.

Betrachtet man den marktüblichen Fall, bei dem zum betrachteten Inbetriebnahmezeitpunkt für KWK-Anlagen die BAFA-Förderung sowie die Progres.NRW Förderung in Anspruch genommen werden konnten und für das Gasbrennwertgerät keine Förderung, ergeben sich für den oben beschriebenen Haushalt die in Abbildung 7.42. dargestellten Annuitäten. In der Abbildung haben sich im Vergleich zum oben dargestellten Fall ausschließlich die Annuitäten der kapitalgebundenen Kosten verändert. Die Batterie geht in diesem Fall mit vollen Investitions- und Installationskosten ein.

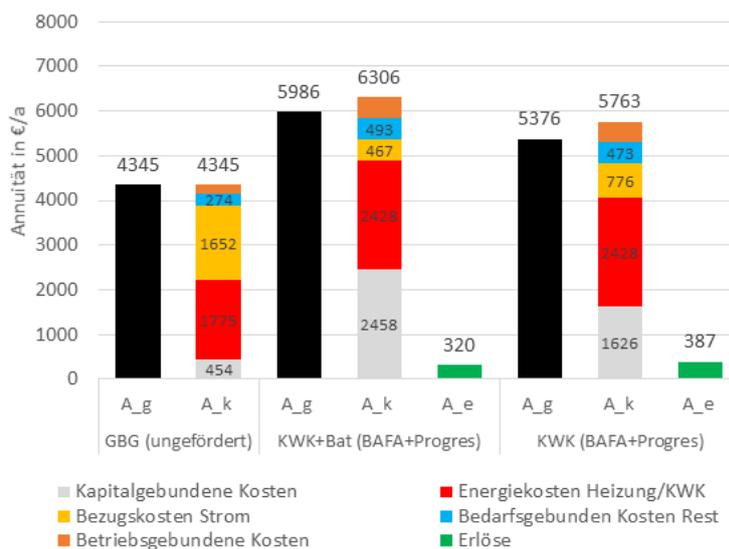


Abbildung 7.42: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (BAFA+Progres.NRW-Förderung) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung). Der schwarze Balken gibt die Gesamtannuität  $A_g$  an, welche sich aus der Summe der Annuität der Kosten  $A_k$  abzüglich der Annuität der Erlöse  $A_e$  zusammensetzt. In der Annuitätenmethode wird von einem Bilanzierungszeitraum von 15 Jahren und einem Zinssatz von 3 % angenommen.

Die dargestellten Annuitäten zeigen, dass sich die Investitionskosten der Batterie für den abgebildeten Fall nicht amortisieren, da die Gesamtannuität für das System mit Batterie mit 5.986 €/Jahr um 610 €/Jahr über dem Objekt ohne Batterie liegt. Dieses weist eine Gesamtannuität von 5.376 €/Jahr auf. Im Vergleich zum Gasbrennwertgerät ergeben sich jährliche Mehrkosten von 1.641 €/Jahr für das System mit Batterie und 1.031 €/Jahr an Mehrkosten für ein System ohne Batterie. Die hohen Investitionskosten von motorischen KWK-Anlagen können sich für den betrachteten Fall gegenüber einem Gasbrennwertgerät nicht amortisieren. In Abbildung 7.43 werden die zehn oben verglichenen Systeme im Fall einer BAFA und Progres.NRW Förderung betrachtet. In keinem der zehn Systeme gleicht die Reduktion der Strombezugskosten die Investitionskosten der Batterie aus.

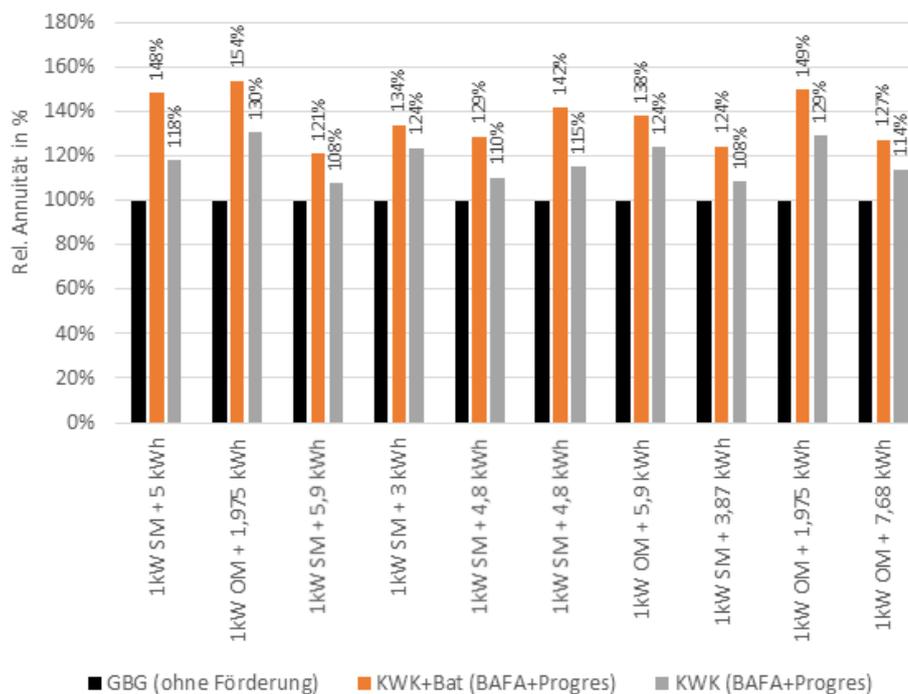


Abbildung 7.43: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (BAFA+Progres.NRW) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung) mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % von zehn motorischen Blockheizkraftwerken der Leistungsklasse 1 kW. Der schwarze Balken gibt die Gesamtannuität  $A_G$  des Gasbrennwertgerätes an, welche auf 100 % normiert sind. Der orange und der graue Balken geben die Annuitäten der KWK- sowie KWK+Batterie-Systeme an.

Bei vollen Investitionskosten hätten die Batterien im Mittel zu einer Erhöhung der jährlichen Annuität um 19 % geführt. Der günstigste Fall tritt bei einem 1 kW stirlingmotorischen KWK-System in Kombination mit einer 3 kWh Batterie auf, welche zu einer Kostenerhöhung der Batterie von 10 % führt. Im ungünstigsten Beispiel führt die Batterie zu einer Erhöhung der Gesamtannuität von 30 %. Unter den aktuellen Vergütungsoptionen von Batterien und KWK-Anlagen kann durch die Technologiekombination in den betrachteten Fällen keine Kosteneinsparung erzielt werden. Jedoch kann in allen Fällen durch die Batterie eine Reduktion der Kosten für den Stromnetzbezug erzielt werden. Wie hoch die Einsparung bei den Kosten für Netzbezug (ausschließlich Strom) für den Fall mit vollem Netzbezug, mit KWK-Anlage sowie mit KWK-Anlage und Batterie ist, ist in Abbildung 7.44 dargestellt. Besonders

hoch ist die Reduktion der Strombezugskosten bei einem Haushalt, in dem neben Batterie und KWK-Anlage eine PV-Anlage mit 2,4 kWp verbaut ist. Hier konnten die Netzbezugskosten für Strom auf 10 % gesenkt werden.

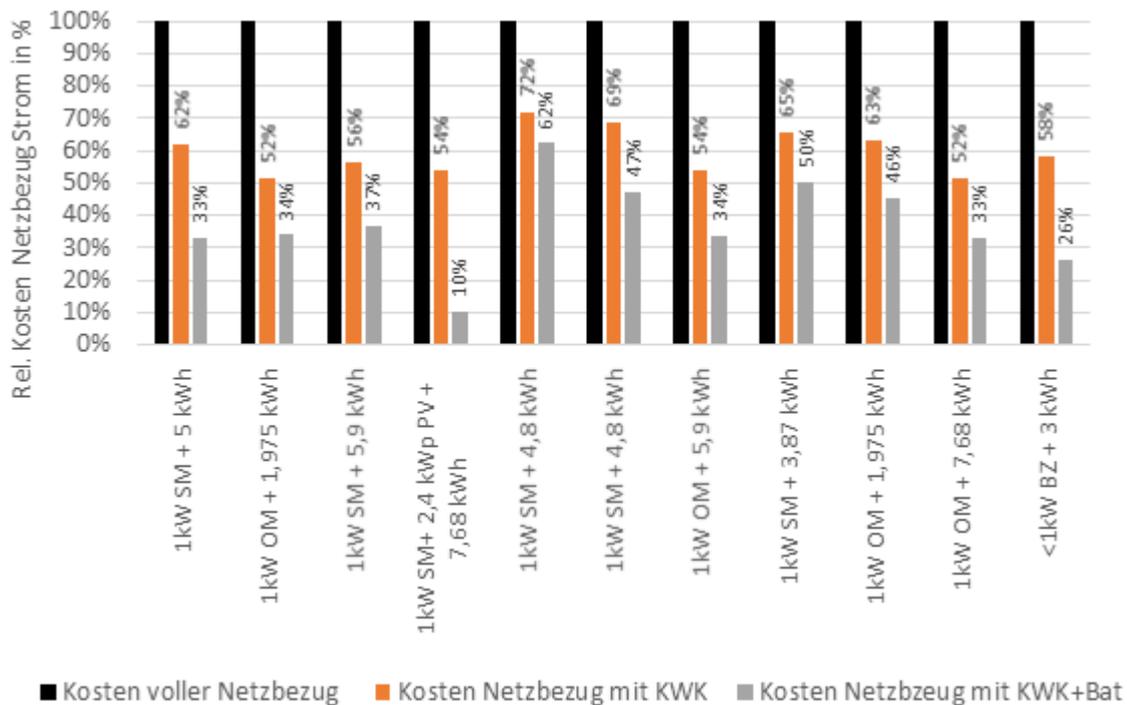


Abbildung 7.44: Ökonomische Gegenüberstellung von Kosten für Netzbezug bei vollständigem Netzbezug, reduziertem Netzbezug durch eine KWK-Anlage sowie KWK-Anlage und Batterie für motorische KWK-Anlagen und Brennstoffzelle. In einem Haushalt ist weiterhin eine PV-Anlage verbaut.

Um die Systeme wirtschaftlich besser zu stellen, sind unterschiedliche technische Ansätze denkbar. In Kombination mit einer Batterie ist der rein wärmegeführte Betrieb der motorischen KWK-Anlagen nicht optimal. Hier müsste in einem ersten Schritt eine übergeordnete Steuerung zur Entladung der Batterie abhängig vom Erzeugungsverhalten der KWK-Anlage entwickelt werden. Diese könnte anhand der Temperatur des thermischen Speichers sowie dem historischen thermischen Verbrauch des Gebäudes erfolgen.

Eine weitere wirtschaftliche Stärkung wäre dadurch möglich, dass sowohl die KWK-Anlagen als auch die Batterien auf Signale des EVUs zur Stabilisierung des öffentlichen Stromnetzes reagieren. Hierbei ist ein energetisch besonders leicht zu hebendes Potenzial die Energieaufnahme von Batterien im Sommer. Im Betrieb mit motorischen KWK-Anlagen sind diese oft leer und könnten beispielsweise eingesetzt werden, um Abregelungsverluste bei Erzeugungsspeaks von PV-Anlagen zu reduzieren. Eine ähnliche Synergie würde sich für die erhöhte elektrische Erzeugung von motorischen KWK-Anlagen in der Heizperiode ergeben. Hier könnte der Überschuss genutzt werden, um Schwankungen im Netz, z.B. durch Verbrauchsspeaks von Wärmepumpen, auszugleichen. Ein ähnlicher Ansatz wird in [102] verfolgt und detailliert analysiert.

Bleibt man bei der Systemgrenze der im Objekt verbauten Anlagen, ist eine weitere Senkung der Investitionskosten essenziell, um sowohl motorische KWK-Anlagen als auch Brennstoffzellen wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu machen. Dieses gilt auch für die betrachteten Batterien.

#### **7.2.4 Vergleich unterschiedlicher Heizperioden**

Im Folgenden werden unterschiedliche Messperioden miteinander verglichen. Da die Installation der Anlagen in den Jahren 2013/2014 erfolgte, könnte für einige Anlagen ein Vergleich über mehrere Jahre erfolgen. Unterschiedliche Messperioden können über eine Witterungsbereinigung der Jahresbilanzen sowie der gemessenen Bilanzzeiträume der im Bericht betrachteten Periode direkt miteinander verglichen werden. Die witterungsbereinigten Bedarfswerte der Objekte werden über die Gradtagzahl berechnet, was es ermöglicht, den Energieverbrauch unabhängig vom Einfluss der Witterung zu betrachten. [108] [109] Die Gradtagzahl, angegeben in Kelvin days (Kd), wird aus der gehaltenen Raumtemperatur, Heizgrenztemperatur sowie der Außentemperatur berechnet, wobei die Differenzen von Außentemperatur und Raumtemperatur über einen Monat kumuliert werden. Die Heizgradtage geben die kumulierte Differenz zwischen Heizgrenztemperatur und Außentemperatur für einen Monat an. Hierbei wurden die Daten der Wetterstation Duisburg-Baerl genutzt, welche die nächstgelegene zum Projektgebiet ist. [110] Die im Projektzeitraum aufgetretenen GTZ sowie die der Vorjahre und der des langjährigen Mittels (LTA 2007 - 2020) sind in Abbildung 7.54 dargestellt. Die GTZ des langjährigen Mittels beträgt 3.263 Kd. Die mittlere GTZ der letzten 6 Jahre (2015 – 2020) beträgt 2.865 Kd, was zeigt, dass der mittlere Wärmebedarf zwischen 2007 und 2020 höher gewesen ist als zwischen 2015 und 2020. im Mittel liegt ein Unterschied von ca. 14 % zwischen den Perioden vor. Zwischen 2015 und 2016 trat eine Steigerung von 3.000 Kd auf 3.026 Kd auf, welche ab dann bis 2020 stetig sank. Im Jahr 2020 lag eine GTZ von 2.632 Kd vor. Die in der Messperiode vorliegende GTZ liegt mit 2.659 Kd 27 Kd über der in 2020 aufgetretenen GTZ. Bezieht man die GTZ aus dem Messzeitraum auf die mittlere GTZ der letzten sechs Jahre (2015 – 2020) liegt diese ca. 7 % über der des Betrachtungszeitraums.

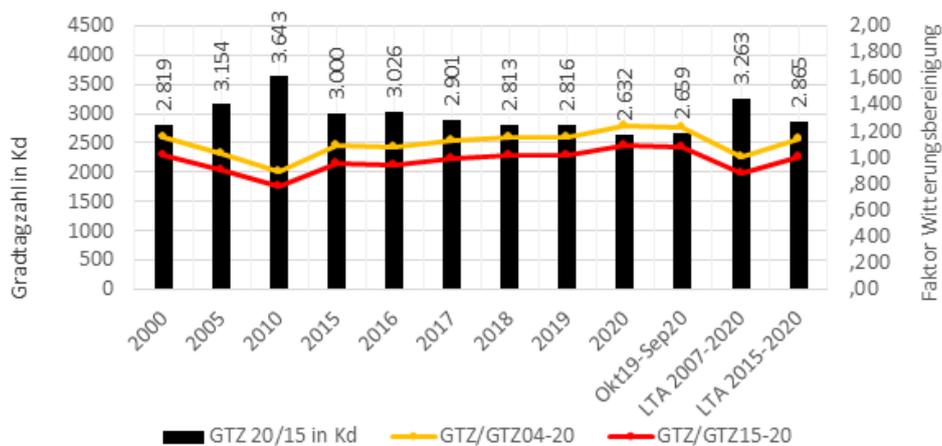


Abbildung 7.45: Im Projektzeitraum sowie in Vergleichszeiträumen aufgetretene Gradtagzahlen und die daraus abgeleiteten Faktoren zur Witterungsbereinigung. [110]

Betrachtet man weiterhin die in der Periode auftretenden Heiztage, mittleren Außentemperaturen sowie mittleren Außentemperaturen an Heiztagen, dargestellt in Abbildung 7.46, zeigt sich, dass die Periode des langfristigen Mittels von 2007 bis 2020 mit 274 Heiztagen deutlich über dem Mittel der letzten fünf Jahre liegt. Aufgrund der deutlichen Abweichung wird die Witterungsbereinigung auf die mittlere GTZ von 2015 - 2020 bezogen, da der mittlere Wert von 2007 - 2020 als unverhältnismäßig hoch betrachtet wird.

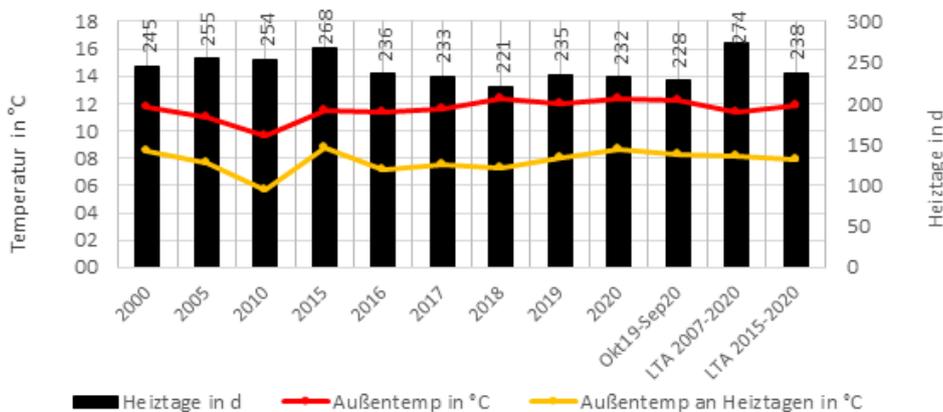


Abbildung 7.46: Im Projektzeitraum sowie in Vergleichszeiträumen aufgetretene mittlere Außentemperaturen sowie Heiztage. [110]

Werden die Heizwärmeverbräuche um die oben genannten Faktoren bereinigt, zeigen sich die in Abbildung 7.47 dargestellten Heizwärmeverbräuche normiert auf das Jahr 2016. Hierbei zeigt sich bereits, dass der Heizwärmebedarf bei einigen Objekten steigt und bei anderen sinkt.

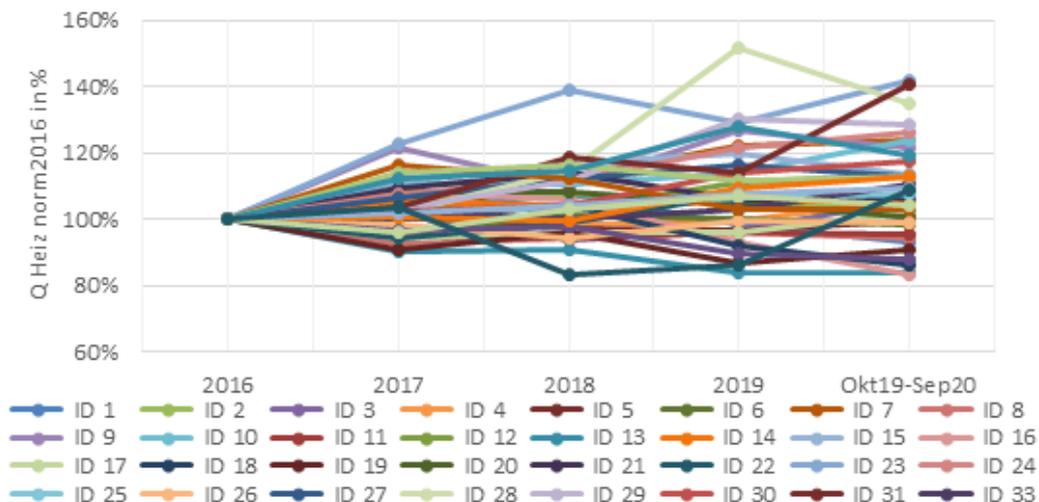


Abbildung 7.47: Heizwärmebedarf von 33 Objekten über fünf Bilanzjahre. ID-Zuweisung der Gebäude wurden randomisiert und sind nicht rückverfolgbar.

Die statistische Auswertung zeigt, wie sich die Heizenergieverbräuche bezogen auf das Jahr 2016 entwickelt haben, dargestellt in Abbildung 7.57. Im Bilanzzeitraum 2017 weisen jeweils 14 % der Objekte einen um 0 – 5 % bzw. -5 – -10 % reduzierten Heizenergieverbrauch auf. Kein Objekt weist einen Verbrauch auf, der um mehr als 10 % gesunken ist. 37 % der Objekte weisen in 2017 einen um 0 – 5 % gestiegenen Heizenergieverbrauch auf. 16 % einen um 5 – 10 % gestiegen Verbrauch und weitere 12 % einen Verbrauch, der um 10 – 15 % gestiegen ist. Bei 7 % der Objekte ist der Verbrauch um mehr als 15 % gestiegen. Somit liegen 93 % der Objekte in einer Verbrauchsänderung von +/- 15 %. Im Jahr 2018 liegt die Steigerung des Heizwärmebedarfs von 88 % der Objekte im Intervall von +/- 15 %. 58 % weisen eine Steigerung um 0 – 15 % auf und 30 % eine Reduktion um 0 – 15 %. Jeweils 2 % der Objekte weisen einen Verbrauch auf, welcher um 15 – 20 % gesenkt wurde. 9 % der Objekte hatten eine Verbrauchssteigerung von über 15 %. 2019 liegen 77 % im Verbrauchsentwicklungsintervall +/- 15 %. 44 % der Objekte hatten eine Verbrauchssteigerung um 0 – 15 % sowie 33 % eine Reduktion des Verbrauchs um 0 – -15 %. 9 % der Objekte weisen eine Reduktion um mehr als 15 % auf und 21 % eine Erhöhung des Verbrauchs um mehr als 15 %.

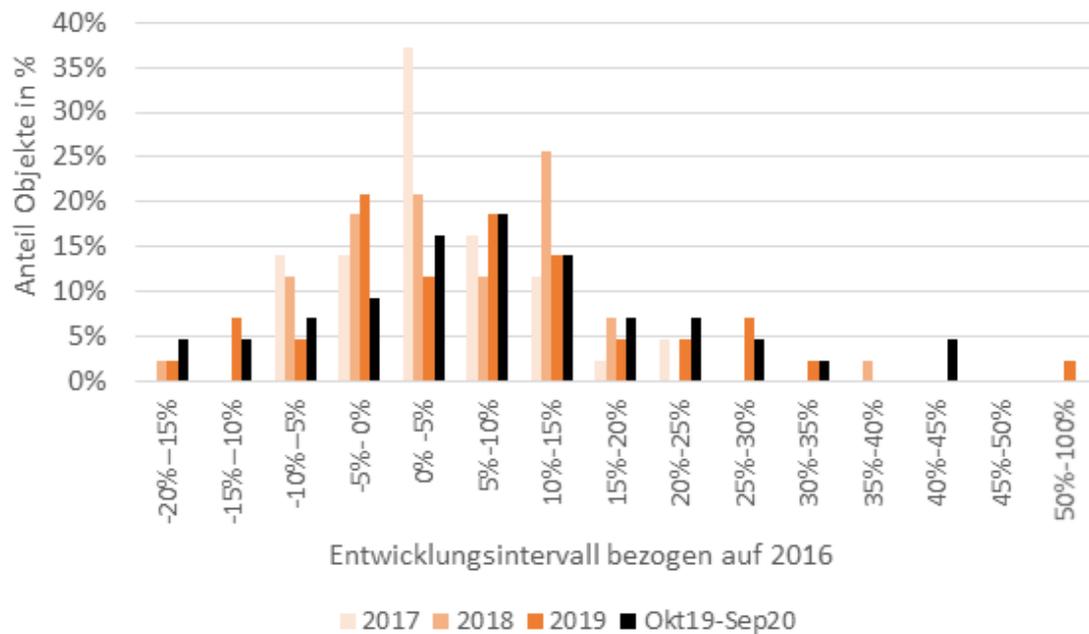


Abbildung 7.48: Verteilung der Wachstumsraten von der Entwicklung des Heizwärmebedarfs von 42 Objekten über fünf Bilanzjahre bezogen auf das Jahr 2016.

Neben der Untersuchung der Entwicklung der thermischen Verbräuche kann ein Vergleich der Jahresbilanz für 15 ottomotorische und 13 stirlingmotorische KWK-Anlagen für den Zeitraum 2016 – 2019 durchgeführt werden. Hierbei wird bewusst keine Witterungsbereinigung der Daten vorgenommen, um das Verhalten der KWK-Systeme für unterschiedliche Bilanzierungsperioden zu analysieren. Um trotzdem den Einfluss der Witterung abzubilden, wurde die Trendgerade, welche sich aus dem Mittelwert jeweils aller Werte des Bezugsjahres ergibt, auf eins normiert und mit normierten GTZ abgeglichen. Abbildung 7.58 stellt die gemessenen Gasbezüge dar, für alle Objekte, in denen für den dargestellten Zeitraum eine vollständige Bilanzierung durchgeführt werden konnte. Die Gasbezüge sind über die vier betrachteten Jahresbilanzen hinweg als relativ konstant zu bewerten. Liegt der Fall vor, dass eine KWK-Anlage länger ausgefallen ist, sinkt der Gasbezug des Objektes, da sich der thermische Deckungsanteil des Zusatzheizgerätes erhöht. Weiterhin steigt der absolute Jahresnutzungsgrad. Es zeigt sich, dass im Mittel der Gasbezug der Objekte klar mit der GTZ korreliert. Weiterhin weichen einige Gasbezugswerte vom Trend der GTZ ab. Hier können Änderungen im Nutzerverhalten oder kürzere Anlagenausfälle vorliegen. Anlagen mit längeren Ausfällen sind von der Betrachtung ausgeschlossen.

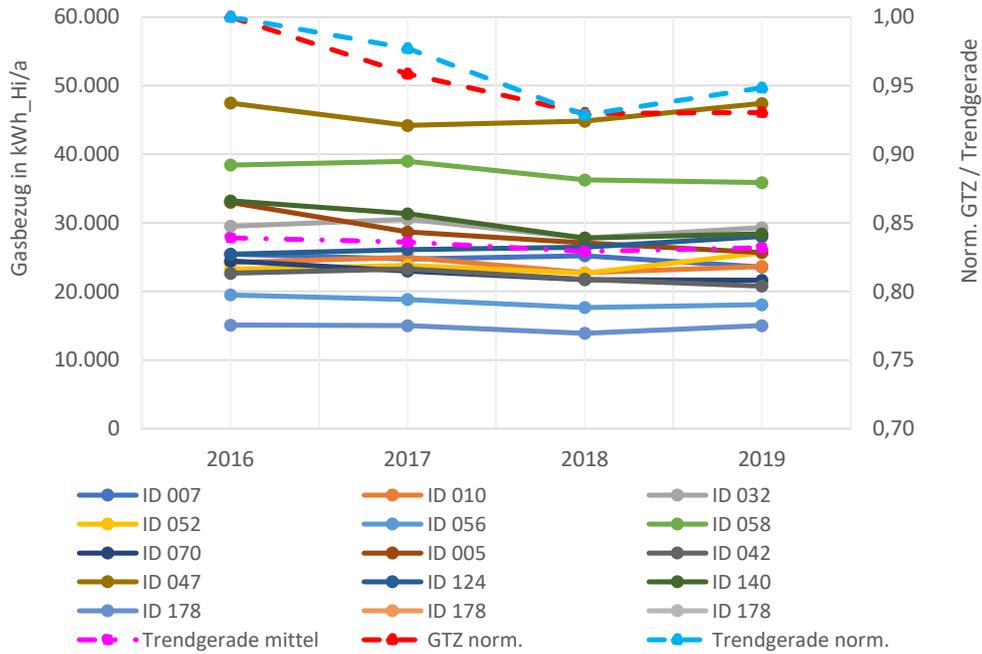


Abbildung 7.49: Gasbezug in kWh<sub>Hi</sub>/a von 13 stirlingmotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten.

Neben dem Gasbezug der Objekte wird der Jahresnutzungsgrad der vier bilanzierten Jahre betrachtet, welche die erzeugte thermische und elektrische Energie zum Gasbezug in Relation setzt. Der Verlauf der JNG der 13 bilanzierten Systeme ist in Abbildung 7.50 dargestellt.

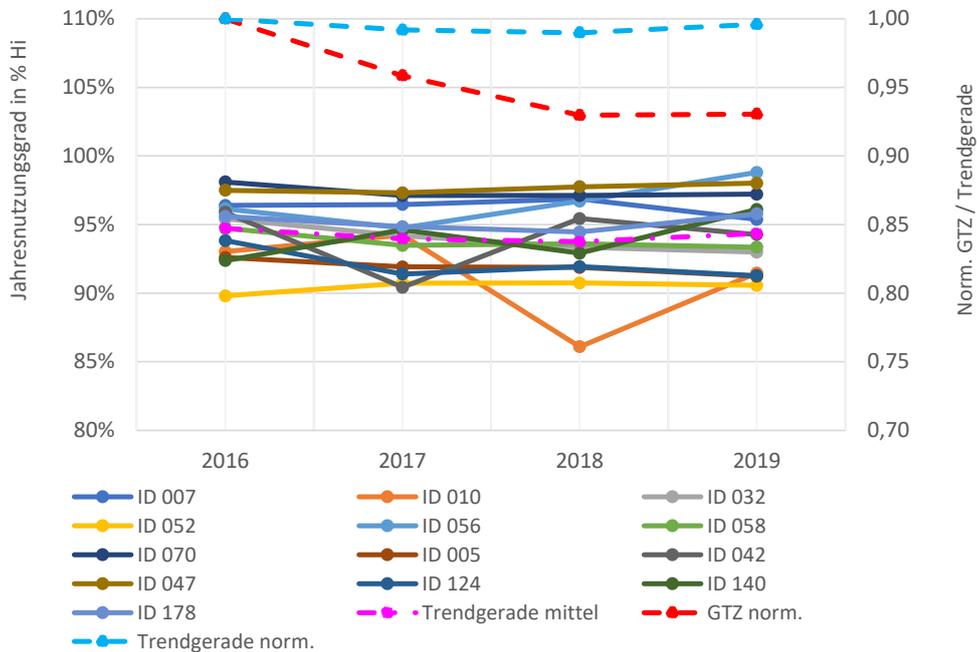


Abbildung 7.50: Heizwertbezogener Jahresnutzungsgrad von 13 stirlingmotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten.

Der Jahresnutzungsgrad der KWK-Systeme bleibt über die vier Jahre konstant im Mittel bei 93,8 % und korreliert nicht mit der GTZ. Im Folgenden werden die äquivalenten Kennzahlen für 15 ottomotorische KWK-Anlagen betrachtet. Der Gasbezug der 15 Objekte ist in Abbildung 7.51 dargestellt. Eine grundsätzliche Korrelation von GTZ und normierter Trendgerade

des Gasbezugs ist ersichtlich, jedoch steigt der Gasverbrauch zwischen 2018 und 2019 überproportional an. Trotz sinkender GTZ zwischen 2016 und 2018 von 2026 auf 2813 K sinkt der Gasbezug nur verhältnismäßig wenig, mit einer Reduktion von 2%.

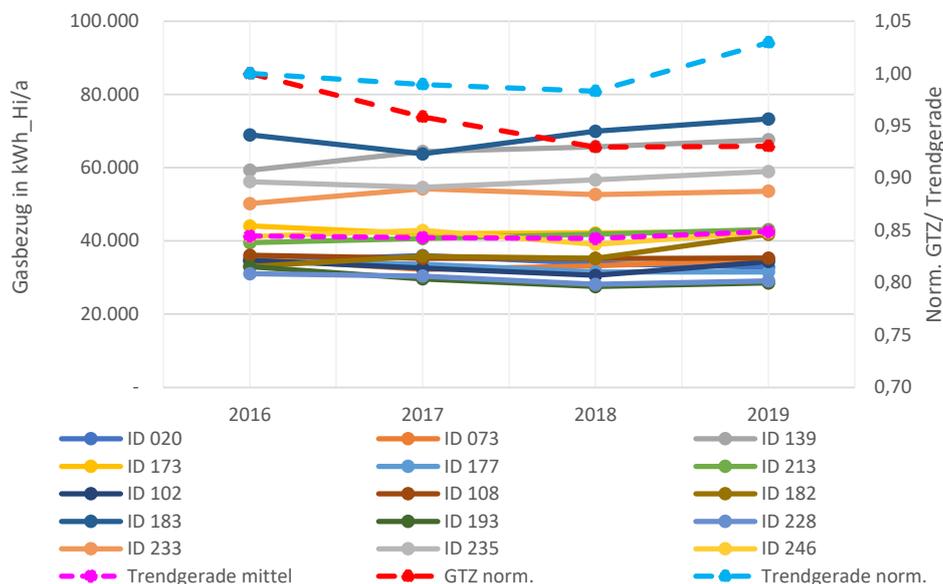


Abbildung 7.51: Gasbezug in kWh<sub>Hi</sub>/a von 15 ottomotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten.

Der gestiegene Gasbezug ist mit dem gestiegenen Wärmebedarf der Objekte zu begründen, wie Abbildung 7.52 darstellt. In einzelnen Objekten hat sich die Wohnfläche erhöht bzw. die Anzahl der Bewohner im Projektverlauf verändert, was zu einem gestiegenen Wärmebedarf führt.

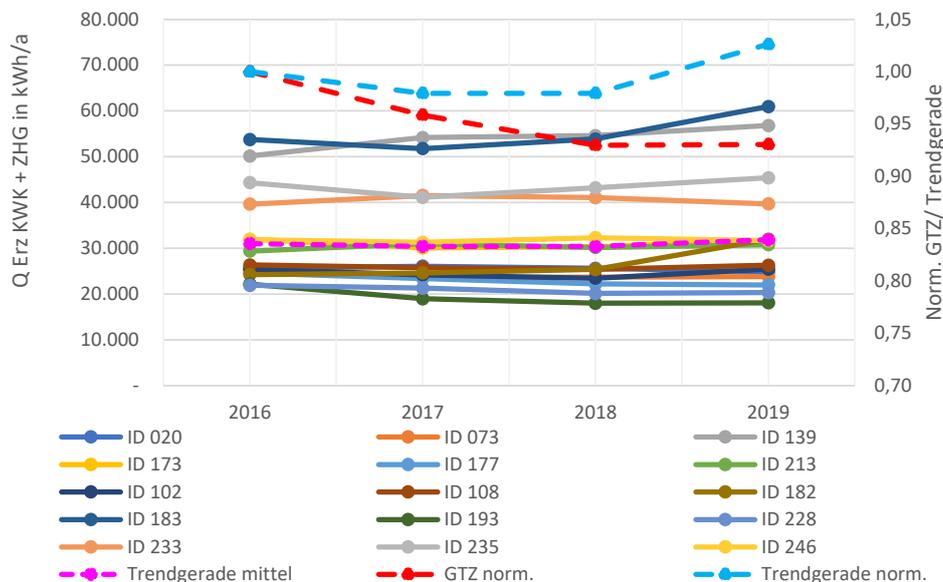


Abbildung 7.52: Thermisch 16 ottomotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten.

Abbildung 7.53 verdeutlicht, dass auch für die ottomotorischen KWK-System der Jahresnutzungsgrad über die vier bilanzierten Jahre konstant bleibt.

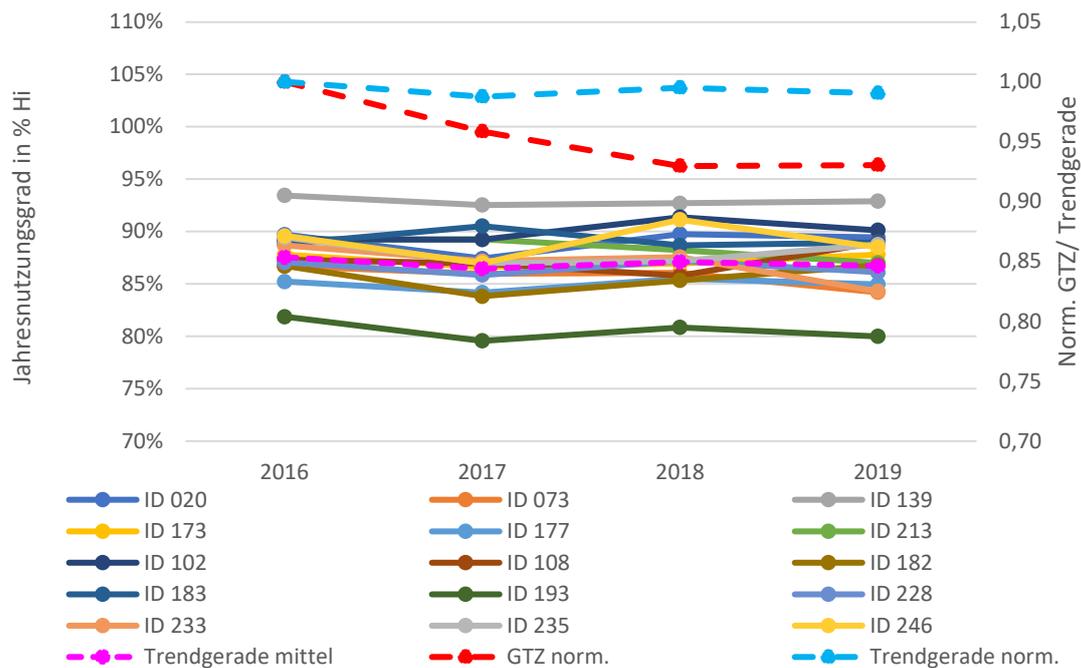


Abbildung 7.53: Heizwertbezogener Jahresnutzungsgrad von 15 ottomotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten.

## 7.3 Fortführung der Objektanalysen über weitere Heizperioden

### 7.3.1 CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung

In einem ersten Schritt werden alle Objekte, für die für den Bilanzzeitraum eine vollständige Energiebilanz aufgestellt werden kann, hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie dem Primärenergieverbrauch ausgewertet. Hierbei wird nach der in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen Methodik vorgegangen. Weiterhin werden Anlagen aus der Auswertung ausgeschlossen, die weniger als 1.000 kWh erzeugt haben. Insgesamt können 39 Anlagen für den Zeitraum 01.10.2019 - 30.09.2020 bilanziert werden. Der abgebildete Anlagenpool setzt sich aus 16 stirlingmotorischen KWK-Anlagen, 20 ottomotorischen KWK-Anlagen sowie drei Brennstoffzellen zusammen. Bei den ersetzten Altheizungen handelt es sich um 27 Erdgasheizungen, neun Ölheizungen sowie drei Kohleheizungen. Insgesamt werden im Bilanzzeitraum 1.359 MWh Wärme durch KWK und ZHG bereitgestellt, sowie 213 MWh Strom durch die 39 bilanzierten Anlagen erzeugt. Der betrachtete Anlagenpool ist in Tabelle 7.17 dargestellt

Tabelle 7.17: Substitutionsmatrix konventioneller Heizungssysteme und KWK-Systeme. Bilanzierte Energien beziehen sich auf den Zeitraum 01.10.2019– 30.09.2020.

Einheit	Substituierte Heizungen				$\sum_{39} W_{HH}^{Bezug}$	$\sum_{39} Q_{KWK+ZHG}^{Erz}$	$\sum_{39} E_{KWK}^{Erz}$
	Gesamt	Erdgas	Öl	Kohle			
	#				MWh	MWh	MWh
Stirling	16	13	1	2	457,29	375,92	45,98
Otto	20	14	5	1	1.111,82	865,67	148,51
BZ	3	0	3	0	152,18	118,08	19,31
Gesamt	39	27	9	3	1.721,29	1.359,67	213,79

\* bezogen auf  $H_{i 2020}$  Bottrop: 9,29 kWh/m<sup>3</sup> [75]

Insgesamt wird durch den dargestellten Anlagenpool eine Reduktion von 612 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Emissionen Altheizungen + Netzbezug) auf 383 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Emissionen gekoppelte Erzeugung durch KWK + ZHG) erreicht. Dies entspricht einer Reduktion von 229 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten bzw. 37,4 %. Bezogen auf die Erdgas-Altheizungen wird eine Einsparung von im Mittel 32,3 % erreicht, was einer absoluten Einsparung von 116 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht. Bezogen auf die Altheizungen, welche mit Öl betrieben wurden, werden 36,4 % bzw. 71 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart. Für Haushalte, in denen Altheizungen, die mit dem Energieträger Kohle befeuert wurden, ersetzt wurden, ergibt sich für den Bilanzzeitraum eine relative Einsparung von 73,7 %. Eine Übersicht der Einsparungen ist in Abbildung 7.54 dargestellt.

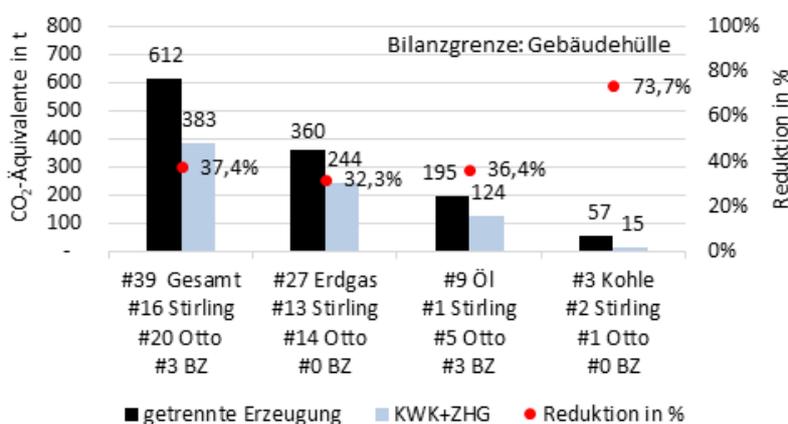


Abbildung 7.54: CO<sub>2</sub>-Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen, für 39 Haushalte, bei denen ein KWK-System verbaut ist. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 47,9 kW. Der angenommene spez. Emissionsfaktor für Erdgas beträgt 0,24 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh Erdgas, 0,56 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh Bezug aus dem Stromnetz sowie 0,86 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh eingespeistem KWK-Strom. [73]

Werden nur die erdgasbetriebenen Altheizungen betrachtet, können durch stirlingmotorische KWK-Anlagen im Mittel ca. 25 % CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden. Die mittlere Einsparung von ottomotorischen KWK-Anlagen fällt für die hier betrachtete Stichprobe 6 % höher aus mit ca. 31 % CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Die höchste Einsparung von stirlingmotorischen KWK-Systemen

liegt bei 36 %, die niedrigste bei 17 %. Die höchste mit ottomotorischem KWK-System erreichte Einsparung liegt bei 39 %, die niedrigste bei 25 %. Die höhere Laufzeit der ottomotorischen Anlagen, bedingt durch die höhere Stromkennzahl, wirkt sich positiv auf ihre CO<sub>2</sub>-Bilanz aus, da sie im Vergleich zu stirlingmotorischen KWK mehr Strom erzeugen. Im Einzelfall hängt dies allerdings von der Dimensionierung der Anlagen ab. Weiterhin wirkt sich der im GEG hohe Verdrängungsmix von 0,86 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro eingespeister kWh darauf aus. Sinkt dieser verschiebt sich die Einsparung in Richtung stirlingmotorischer KWK-Systeme, unter der Annahme, dass geringe elektrische Erzeugung auch zu geringer Einspeisung führt. Die statistischen Kennzahlen des Vergleichs zwischen otto- und stirlingmotorischen KWK-Systemen sind in Abbildung 7.55 dargestellt.

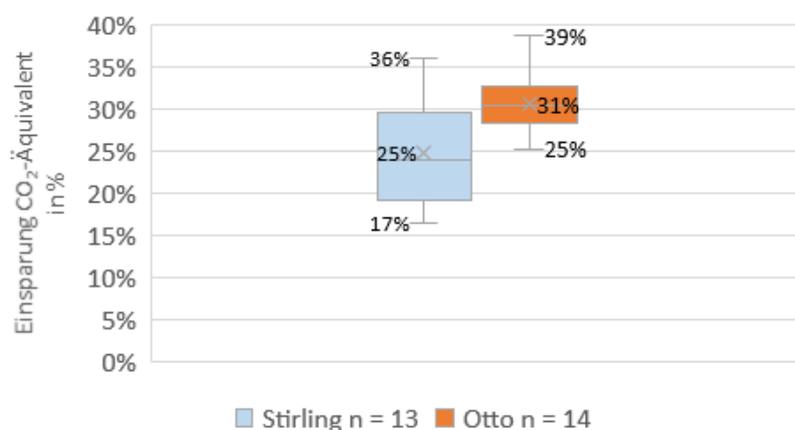


Abbildung 7.55: CO<sub>2</sub>-Einsparung von 13 stirlingmotorischen KWK-Anlagen sowie 14 ottomotorischen KWK-Anlagen gegen über den verbauten Altheizungen. Die angenommenen spez. Emissionsfaktoren für Erdgas beträgt 0,24 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh Erdgas sowie 0,56 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh für Strombezug aus dem Netz der allgemeinen Versorgung.

Bezogen auf Altheizungen, welche mit Öl betrieben wurden, kann durch stirlingmotorische KWK-Systeme eine Einsparung von 40 % (n = 1), durch ottomotorische KWK-Systeme eine mittlere Einsparung von 32 % (n = 6) sowie mit Brennstoffzellen-Systemen eine Einsparung von 26 % im Mittel (n = 3) erzielt werden. Da die Brennstoffzellen im Systemverbund einen deutlich geringeren thermischen Deckungsanteil aufweisen, liegt ihre Einsparung unter denen der motorischen Systeme, da ein höherer Anteil des thermischen Bedarfs der Objekte aus dem ZHG gedeckt wird. Würde man die Bilanzgrenze um die Brennstoffzelle legen, würde ihre Einsparung deutlich höher ausfallen. Vergleichswerte hierfür sind in [88] einsehbar. Bezogen auf Kohle als Brennstoff liegt die Einsparung der stirlingmotorischen KWK-Systeme (n = 2) bei 71 % im Mittel sowie bei einem ottomotorischen KWK-System bei 65 % (n = 1). Bei den Energieträgern Öl und Kohle können aufgrund der geringen Stichproben keine statistischen Aussagen getroffen werden.

Bezieht man die CO<sub>2</sub>-Emissionen der KWK-Anlagen auf die Referenzwerte eines neuen Gasbrennwertgerätes ergeben sich mittlere Einsparungen von 21,8 % durch KWK und ZHG. Die kumulierten Nennleistungen der 39 Anlagen ist in Abbildung 7.56 dargestellt. Die CO<sub>2</sub>-Äquivalente wurden durch den Einsatz von KWK-System von 552 t auf 431 t gesenkt.

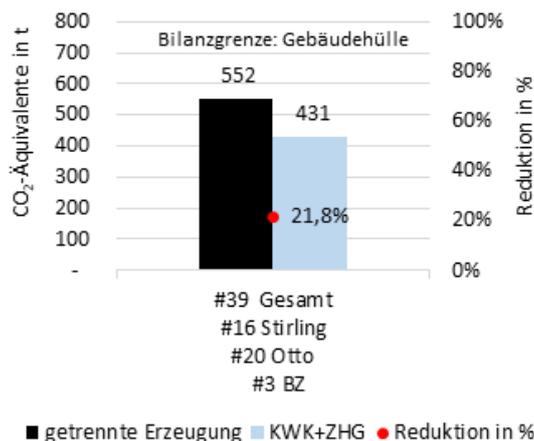


Abbildung 7.56: CO<sub>2</sub>-Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf neues Gasbrennwertgerät mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % bezogen auf den Heizwert [67], für 39 Haushalte bei denen ein KWK-System verbaut ist. Der angenommene spez. Emissionsfaktor für Erdgas beträgt 0,24 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh Erdgas, 0,56 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh Bezug aus dem Stromnetz sowie 0,86 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/ kWh eingespeistem KWK-Strom [73].

Betrachtet man die relative Einsparung der verbauten KWK-Systeme getrennt nach KWK-Technologie wird durch stirlingmotorische KWK-Systeme (n = 16) eine mittlere Einsparung von 22 % erreicht. Die minimale Einsparung beträgt 13 %. Die maximale Einsparung beträgt 32 %. Die ottomotorischen KWK-Systeme (n = 20) haben im Mittel zu einer Einsparung von 21 % geführt. Die minimale sowie maximale Einsparung beträgt 10 % bzw. 36 %. Bei den drei Brennstoffzellensystemen wird eine mittlere Einsparung von 17 % sowie eine minimale Einsparung von 13 % bzw. maximale Einsparung von 20 % erzielt.

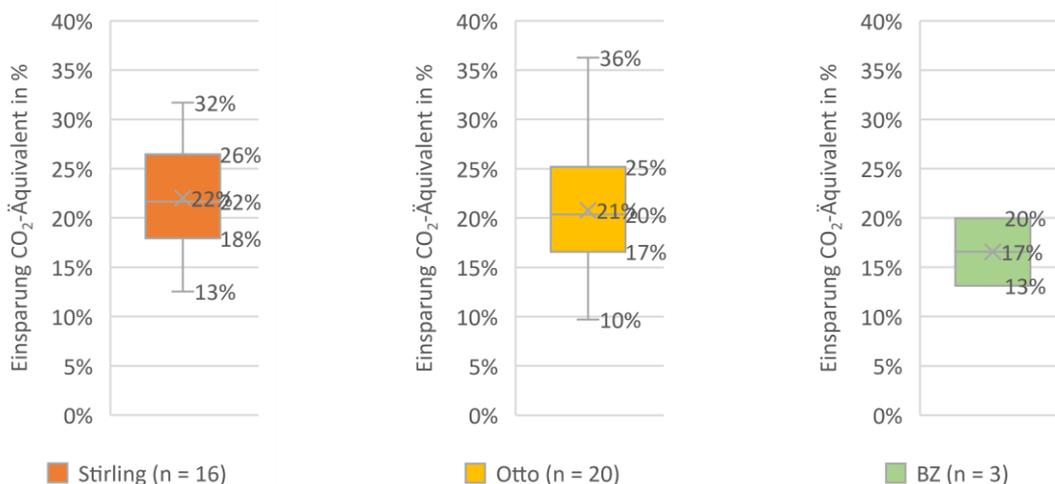


Abbildung 7.57: CO<sub>2</sub>-Einsparung vom KWK-Anlagen Pool, bezogen auf neues Gasbrennwertgerät mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % bezogen auf den Heizwert [67], für 39 Haushalte bei denen ein KWK-System verbaut ist. Der angenommene spez. Emissionsfaktor für Erdgas beträgt 0,24 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh Erdgas, 0,56 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh Bezug aus dem Stromnetz sowie 0,86 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh eingespeistem KWK-Strom [73].

Bei Objekten mit hohem thermischem Energieverbrauch von über 30.000 kWh, wie den betrachteten Bestandsgebäuden, können Brennstoffzellen keinen thermischen Deckungsanteil

von über 18,3 % erreichen (angenommene thermische Jahreserzeugung von 5.500 kWh). Dies führt dazu, dass der Differenzbetrag der benötigten Wärme aus dem Zusatzheizgerät gedeckt werden muss und die relativen CO<sub>2</sub>-Einsparungen gemindert werden. In Neubauten können höhere thermische Deckungsanteile erreicht werden und somit auch höhere relative CO<sub>2</sub>-Einsparungen [103].

Im Folgenden wird die gemessene CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Objektes mit einem jährlichen elektrischen Energiebedarf von 5.000 kWh sowie einem gesamten thermischen Bedarf (Heizung und TWW) von 22.400 kWh mit anderen Versorgungssystemen verglichen. Im Gebäude ist eine 1 kW otomotorische KWK-Anlage verbaut, welche im Bilanzzeitraum ca. 5.400 kWh elektrische Energie erzeugt hat. Das Erzeugungsverhalten der KWK-Anlage sowie der Objektverbrauch führen zu einer EVQ von 41 % sowie ein AG von 51 %. Die Emissionen der Altheizung sowie des KWK-Systems werden den Emissionen bei einer Versorgung über ein Gasbrennwertgerät, eine Wärmepumpe sowie über eine PV-Anlage + Gasbrennwertgerät gegenübergestellt. Die Annahmen bezüglich JAZ der Wärmepumpe werden mit 3,5 angenommen [69]. Für die PV-Anlage wird eine Eigenverbrauchsquote von 37 % sowie ein Autarkiegrad des Objektes von 21 % angenommen.<sup>9</sup> Neben der Variation des spezifischen Emissionsfaktors für netzbezogene elektrische Energie variiert der Emissionsfaktor für bezogenes Erdgas. Hierbei werden die im Gebäudeenergiegesetz aufgeführten Emissionsfaktoren für Biogas und gebäudenah erzeugtes Biogas genutzt, welche mit 140 bzw. 75 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh angegeben werden. [73] Weitere Faktoren sind Tabelle 7.11 beschrieben.

Betrachtet man die aktuelle Versorgungssituation, in dem der Emissionsfaktor für Stromnetzbezug bei 560 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh sowie für Erdgas bei 240 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh liegt, würde der Tausch der Altheizung gegen ein neues Gasbrennwertgerät zu einer Emissionseinsparung von 1.311 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente bzw. 15 % führen. Die Einsparungen im Folgenden beziehen sich auf die Versorgung über ein neues Gasbrennwertgerät sowie elektrische Bedarfsdeckung über Netzbezug. Die Versorgung mittels KWK-System führt zu einer Reduktion von 21 %. Der Wechsel zu einer Wärmepumpe, welche mit Netzstrom betrieben wird, führt zu einer Einsparung von 26 %. Ein GBG in Kombination mit einer 3 kWp PV-Anlage führt zu einer Einsparung von 17 %. Der Einsatz eines KWK-Systems in Kombination mit einer Batterie erhöht die Emissionen des Systems im Vergleich ohne Batterie um 10 %, da die Einspeisegutschrift den verminderten Netzbezug übersteigt. Dies liegt an den hohen Faktoren für den KWK-Verdrängungsmix, den Speicher- und Umwandlungsverlusten sowie der auftretenden Netzladung für die Batterie. Diese Situation liegt grundsätzlich auch bei PV-Anlagen mit Speicher vor, wenn die gesamten Verluste und der Mehraufwand für die Regelung mit bilanziert werden. [39] Zur weiteren Steigerung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen sind die Standby-Verluste sowie die Wechselrichterverluste zu reduzieren. Die gesamten Emissionen aller beschriebenen Systeme sind

---

<sup>9</sup> Werte entsprechen dem Unabhängigkeitsrechner der HTW Berlin für eine 3 kWp PV-Anlage 45°-Neigungswinkel, Südausrichtung [179], [201].

in Abbildung 7.58 dargestellt. Liegt ein spez. Emissionsfaktor für Netzstrom von über 600 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh vor, führt das KWK-System zu der höchsten CO<sub>2</sub>-Reduktion.

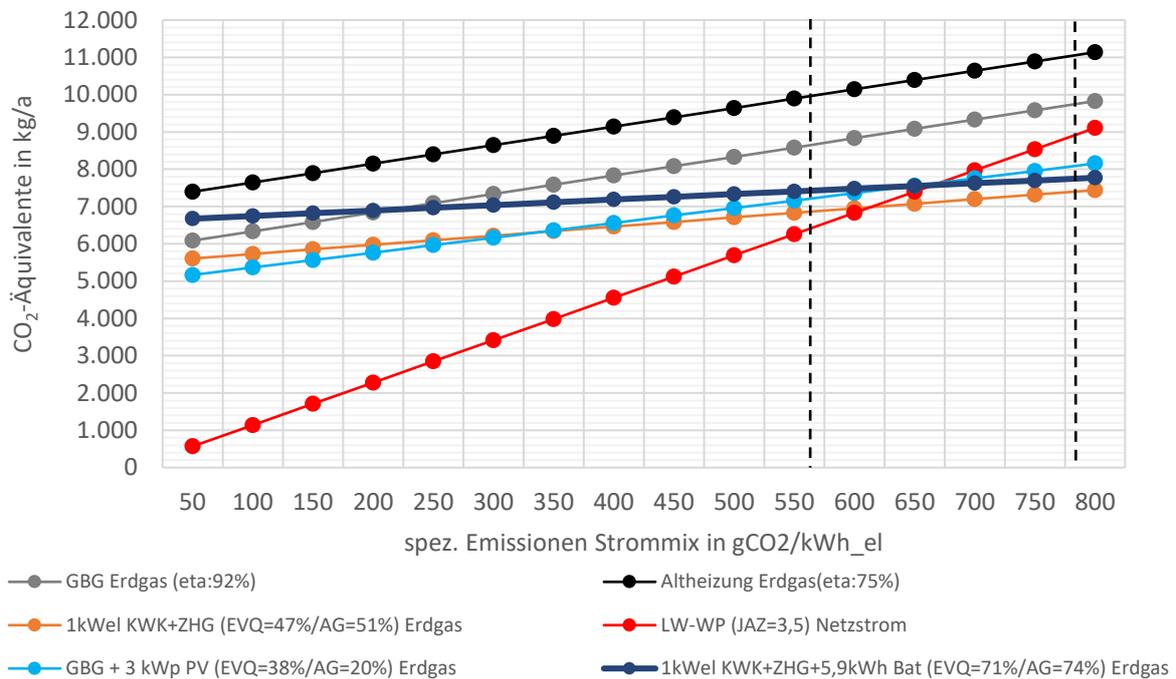


Abbildung 7.58: Vergleich ausgestoßener CO<sub>2</sub>-Äquivalente unterschiedlicher Versorgungssysteme für die Jahresbilanz eines beispielhaften Objektes mit einem elektrischen Bedarf von 5.000 kWh sowie einem thermischen Bedarf (Heiz und TWW) von 22.400 kWh für einen spez. Emissionsfaktor für netzbezogenen Strom zwischen 50 und 800 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh.

Bis 2050 ist eine Senkung der spezifischen Emissionen für Stromnetzbezug auf 50 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh zu erwarten, weshalb die Sensibilität unterschiedlicher Systeme auf anstehende Entwicklungen betrachtet werden. [104] Am stärksten würde ein Objekt, welches mit einer Wärmepumpe und Netzbezug versorgt wird, von einer Emissionsreduktion des Stromnetzes profitieren. Je höher der Autarkiegrad des Systems ist, desto weniger wirkt sich die Emissionsreduktion des spezifischen Emissionsfaktors auf den Netzbezug aus. Damit KWK-Anlagen weiterhin ihren Effizienz-Vorteil gegenüber Gasbrennwertgeräten sowie den Vorteil, dass Wärme dann effizient erzeugt wird, wenn sie benötigt wird, behalten, ist eine Dekarbonisierung der Gasversorgung anzustreben. Dies kann über Biomethan oder den Einsatz synthetischer Kraftstoffe erreicht werden. Wie sich der Einsatz von Biogas sowie gebäudenah erzeugtem Biogas auf die Emissionsbilanz unterschiedlicher Versorgungssysteme auswirkt ist in Abbildung 7.59 zusammengefasst. Durch den Einsatz von Biogas wäre das KWK-System bis zu einem spez. Emissionsfaktor von 500 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh konkurrenzfähig. Ohne den Einsatz eines stärker dekarbonisierten Brennstoffes sinken die CO<sub>2</sub>-Äquivalente der Wärmepumpe unterhalb von 500 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh für Stromnetzbezug soweit, dass die Einsparungen höher sind. Durch den Einsatz von gebäudenah erzeugtem Biomethan würden diese weiter sinken.

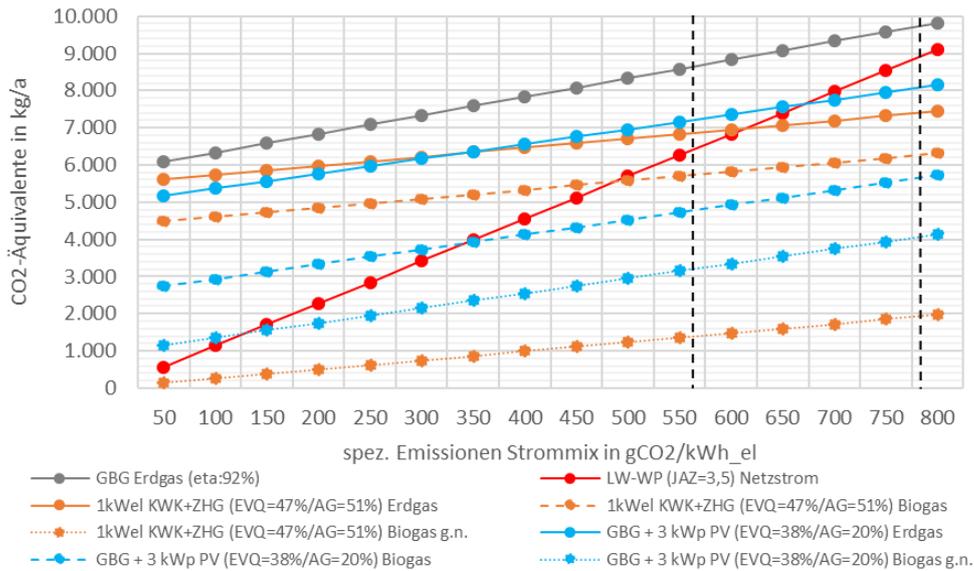


Abbildung 7.59: Vergleich ausgestoßener CO<sub>2</sub>-Äquivalente unterschiedlicher Versorgungssysteme für die Jahresbilanz eines beispielhaften Objektes mit einem elektrischen Bedarf von 5.000 kWh sowie einem thermischen Bedarf (Heiz und TWW) von 22.400 kWh für einen spez. Emissionsfaktor für netzbezogen Strom zwischen 500 und 800 g CO<sub>2</sub>-Äquivalente/kWh sowie für den Einsatz von Biomethan und gebäudenah erzeugtem Biomethan.

Betrachtet man den Anlagenpool unter dem Aspekt der Primärenergieeinsparung, können im Mittel 22,6 % Primärenergie eingespart werden. Insgesamt wurde durch die KWK-Systeme der Primärenergieverbrauch von 2.375 MWh auf 1.838 MWh gesenkt. Die 27 ersetzten Altheizungen, welche in der Messperiode bilanziert wurden, haben im Mittel eine Einsparung von 22,1 % erreicht. Bei den neun ersetzten Ölheizungen haben die installierten KWK-Systeme zu einer Einsparung von 16,2 % geführt. Bei den drei substituierten Kohleheizungen wurde eine Einsparung von 54,5 % an Primärenergie erreicht. Die Ergebnisse der Bilanzierung der Primärenergie der Altheizungen sowie der gekoppelten Erzeugung aus KWK-Anlage und Zusatzheizgerät sind in Abbildung 7.60 zusammengefasst.

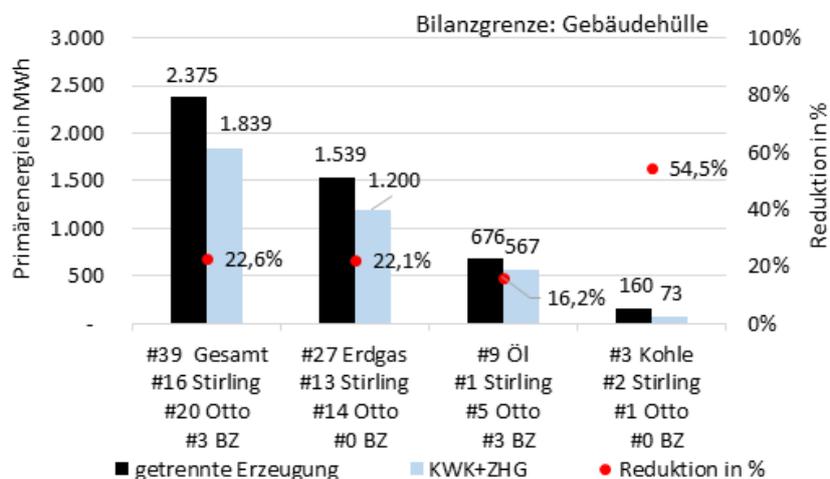


Abbildung 7.60: Einsparung an Primärenergie vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen für 39 Haushalte, bei denen ein KWK-System verbaut ist. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 47,9 kW. Die Primärenergiefaktoren wurden entsprechend [73] angenommen.

Vergleicht man die Einsparungen an Primärenergie gegenüber neuen Gasbrennwertgeräten kann im Mittel eine Einsparung von 21,6 % erzielt werden. Der absolute Verbrauch an Primärenergie wird von 2.347 kWh auf 1.839 kWh reduziert. Die vergleichende Bilanzierung von KWK-Systemen zu neuen Gasbrennwertgeräten ist in Abbildung 7.61 dargestellt.

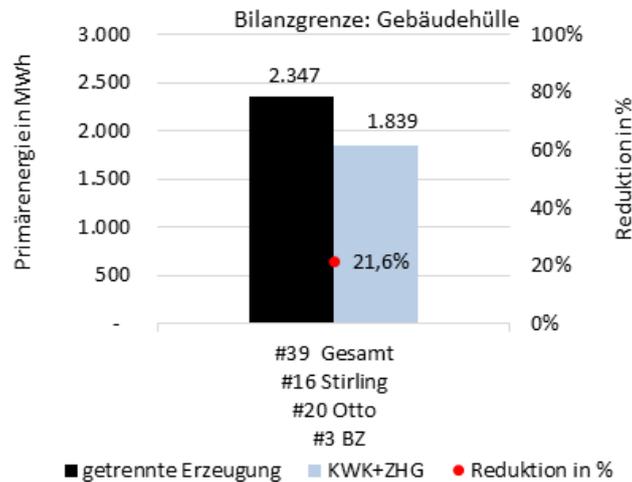


Abbildung 7.61: Einsparung an Primärenergie vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf neue Gasbrennwertgeräte für 39 Haushalte, bei denen ein KWK-System verbaut ist. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 47,9 kW. Die Primärenergiefaktoren wurden entsprechend [73] angenommen.

### 7.3.2 Wirtschaftlichkeit

Die 2020 in Kraft getretene Novelle des KWKG vereinheitlicht die Förderdauer unabhängig der Leistungsklasse der KWK-Anlage auf 30.000 Vollbenutzungsstunden, welche im KWKG 2016 noch 60.000 Vbh betragen. Im KWKG 2016 betragen die Zuschlagssätze für selbst verbrauchte Energie 4,0 ct/kWh sowie 8,0 ct/kWh für ins Netz der allgemeinen Versorgung eingespeisten Strom für Anlagen mit einer Nennleistung unterhalb von bis zu 50 kW. Es gibt keinen Höchst-satz für jährlich geförderte Vbh. [105] Im KWKG 2020 werden die ab 2025 jährlich geförderten Vollbenutzungsstunden auf 3.500 Vbh begrenzt. Bis dahin sieht das Gesetz eine schrittweise Absenkung von 5.000 geförderten Vbh für die Jahre 2021 und 2022 vor. Für die Jahre 2023 und 2024 werden maximal 4.000 Vbh gefördert und ab 2025 maximal 3.500 Vbh. Durch die Verdoppelung der spezifischen Fördersätze sowie Halbierung der Förderdauer, verändert sich die gesamte Förderung von KWK-Anlagen nicht, sondern verteilt sich zeitlich anders. [106] [107] Der Dauerbetrieb von Anlagen wird nicht mehr gefördert und es bleibt Anlagenbetrei-benden selbst überlassen, ob sie nach Ablauf der jährlichen Förderdauer ihre Anlage weiter betreiben oder abschalten. Die Zuschlagssätze für Eigenversorgung betragen 8,0 ct/kWh so-wie 16 ct/kWh für den in das Netz der allgemeinen Versorgung eingespeisten Strom. [106] Weiterhin gibt es nach KWKG 2020 §9 für Anlagen mit einer Leistung von bis zu 2 kW die Mög-lichkeit einen pauschalierten Zuschlag in Höhe von 4 ct/kWh für 60.000 Vbh von dem Netzbe-treibenden zu erhalten. Ob Anlagenbetreibende die pauschalierte Zuschlagszahlung oder ei-nen Zuschlag nach Eigenverbrauch und Einspeisung wählen, ist ihnen selbst überlassen.

Tabelle 7.18 fasst die Zuschläge für KWK-Anlagen von bis zu 50 kW elektrischer Leistung zusammen.

Tabelle 7.18 Zuschläge für KWK-Anlagen von bis zu 50 kW elektrischer Leistung nach KWKG 2020. [106]

	KWKG 2020
Maximale jährliche Förderdauer in Vbh/Jahr	2021: 5.000
	2022: 5.000
	2023: 4.000
	2024: 4.000
	ab 2025: 3.500
Gesamte Förderdauer in Vbh	30.000
KWK-Strom der in ein Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist wird	16,0
KWK-Strom der nicht ins Netz der allgemeinen Versorgung eingespeist wird (Eigenverbrauch)	8,0
Pauschaler Zuschlag für KWK-Anlagen mit einer elektrischen Nennleistung von bis zu 2 kW	4,0 ct/kWh für 60.000 Vbh

Entsprechend dem Gesetz zur Modernisierung der Netzentgeltstruktur (NEMoG) wird bei einem Inbetriebnahmedatum nach dem 01.01.2023 die Vergütung von vNNE eingestellt. Dies trifft für PV- und Windkraftanlagen bereits seit 2018 zu. Für KWK-Anlagen, welche bis zum 31.12.2022 in Betrieb genommen werden, kann die Erstattung noch beantragt werden. [42]

Im Folgenden wird die Einnahmesituation, welche nach dem KWKG 2020 beurteilt wird, von vier Objekten betrachtet, in denen unterschiedliche KWK-Technologien verwendet werden. Es wird der Betrieb mit einer ottomotorischen und stirlingmotorischen Anlage sowie einer PEM-Brennstoffzelle und einer Festoxidbrennstoffzelle betrachtet. Die Betriebsdaten der vier Anlagen sind in Tabelle 7.19 zusammengestellt. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den gewählten Anlagen um Einzelfallbetrachtungen handelt, welche nicht auf jede Anlage des gleichen Typs übertragen werden können. Um eine Übertragbarkeit zu ermöglichen, wird im Folgenden die EVQ variiert.

Tabelle 7.19: Charakterisierung von vier unterschiedlichen KWK-Technologien anhand ihrer Betriebsdaten, der elektrischen Erzeugung der KWK-Anlage, dem ins Netz der öffentlichen Versorgung eingespeiste Strom sowie dem selbst verbrauchten Strom jeweils in kWh.

Technologie	Otto	Stirling	PEM	SOFC
el. Nennleistung in kW	1	1	0,75	1,5
KWK Erzeugung in kWh	5.420	4296	4.900	12.751
Einspeisung in kWh	2.818	1.933	3.283	1.785
Eigenverbrauch in kWh	2.602	2.363	1.617	10.966
EVQ in %	48	55	33	86
Th. Bedarf Objekt (Heiz + TWW) in kW	22.400	24.800	19.000	64.700

Im Folgenden werden die mittleren jährlichen Erlöse betrachtet, welche der KWK-Anlage durch ihre elektrische Erzeugung gutgeschrieben werden können. Die angenommenen Parameter zur Bestimmung der Einnahmen sind in Tabelle 7.20 zusammengestellt, wobei die Zuschlagsvergütung über einen Zeitraum von 15 Jahren verteilt wird und so eine mittlere jährliche Zahlung bestimmt wird, die nicht diskontiert wird.

Tabelle 7.20: Angenommene Parameter zur Bestimmung der jährlichen Einnahmen.

	Einheit	Wert	Quelle
Üblicher Preis	ct/kWh	3,47	[89]
Vermiedene Netznutzungsentgelte	ct/kWh	0,74	[91]
vermiedener Strombezug	ct/kWh	27,68	[77]

Betrachtet man die Einnahmensituation der ottomotorischen KWK-Anlage, konnte im vermessenen Objekt eine  $EVQ_{KWK}$  von 48 % erreicht werden, was einem Eigenverbrauch von 2.640 kWh sowie einer Einspeisung von 2.860 kWh entspricht. Die mittlere jährliche Einnahme beträgt 1.094 €/a welche zu 22 % aus dem KWK-Zuschlag besteht. Der Erlös, welcher aus vermiedenem Strombezug entsteht, beträgt 731 €/a und ist mit 67 % die höchste Einnahmeposition. Die Einnahmen aus dem üblichen Preis betragen 9 % sowie 2 % vNNE. Die Zusammensetzung der Erlöse, im Feld vermessenen KWK-Anlage sowie die Änderung der Erlösstruktur zwischen einer  $EVQ$  von 0 % und 100 % ist in Abbildung 7.62 dargestellt. Es ist anzumerken, dass eine  $EVQ_{KWK}$  von 100 % nur in wenigen Fällen erreicht werden kann und daher eher als theoretischer Wert zu betrachten ist, technisch aber nicht unmöglich ist. Unter der aktuellen Marktsituation ist nach wie vor die Maximierung der Eigenverbrauchsquote das Auslegungskriterium, um Erlöse zu steigern. Die Betriebsweise Volleinspeisung ist wirtschaftlich deutlich schlechter gestellt als Anlagen, welche höhere Eigenverbrauchsquoten aufweisen. Damit hohe Eigenverbrauchsquoten erzielt werden können, müssen das Erzeugungsverhalten der KWK-Anlage sowie das elektrische Verbrauchsprofil bei der Auslegung möglichst genau angepasst werden. Weiterhin zeigt sich, dass der Anteil der Erlöse aus dem üblichen Preis bei der im Feld erzielten  $EVQ_{KWK}$  mit 9 % relativ gering ist und ein Betrieb von KWK-Anlagen mit geringen  $EVQ$ s und tendenziell sinkender geförderter Zuschläge wirtschaftlich schwer darstellbar ist. Damit eine Mikro-KWK-Anlage von der Seite der Erlöse ohne Bezuschlagung über das KWKG und geringere  $EVQ_{KWK}$  konstant bleibt, müssen für die Zukunft Vermarktungsoptionen der KWK- Erzeugung erarbeitet werden.

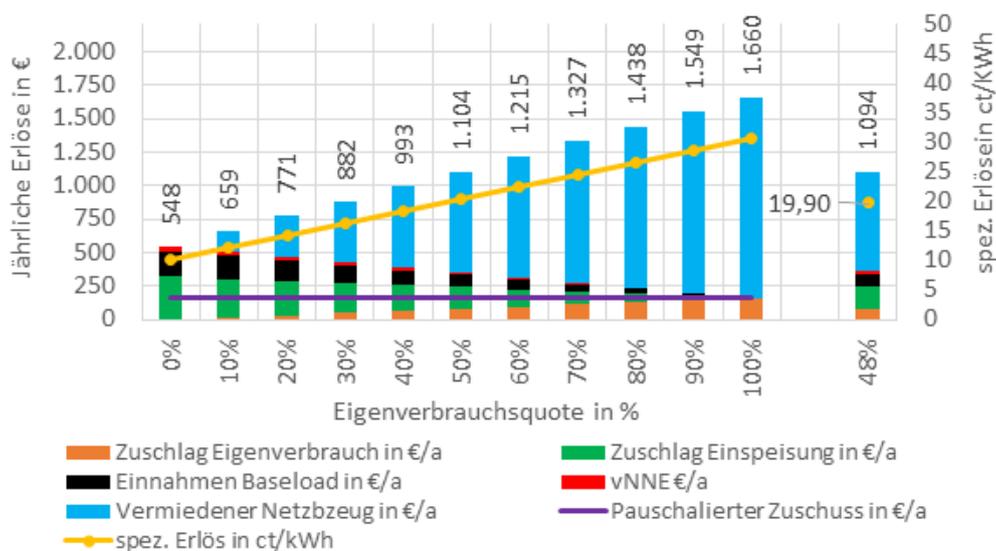


Abbildung 7.62: Links: Jährliche Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer ottomotorischen KWK-Anlage, welche im Bilanzzeitraum 5.420 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse.

Stirlingmotorischen KWK bei einer  $EVQ_{KWK}$  von 55 % erzielen mittlere jährliche Erlöse von 967 €/a sowie spezifische Erlöse von 22,52 ct/kWh. Durch die Steigerung des Eigenverbrauchs von 55 % auf 100 % wäre eine weitere Steigerung der Einnahmen um 383 €/a möglich. Auch bei der stirlingmotorischen KWK-Anlage ist die Maximierung des Eigenverbrauchs als zentrales Instrument zu sehen. Die erzielte Eigenverbrauchsquote von 55 % ist als gut zu bewerten, was zu den relativ hohen spezifischen Erlösen von 22,52 ct/kWh KWK-Erzeugung führt. Die pauschalierte Bezuschlagung führt in allen Fällen zu einem geringen Verlust in den Erlösen, außer es liegt eine  $EVQ_{KWK}$  von 100 % vor. Die absolute Differenz zwischen den erzielten Erlösen aus KWK-Zuschlag, welcher nach Eigenverbrauch und Einspeisung bezuschlagt wird, sowie der pauschalierten Bezuschlagung ist in Tabelle 7.21 dargestellt. Die Mehreinnahmen durch die Variante der getrennten Bezuschlagung sind durch  $\Delta Erlöse$  in € ausgedrückt. Bei geringen  $EVQ_{KWK}$  ist die getrennte Abrechnung durchaus profitabel, auch wenn dieser Zustand grundsätzlich, wie oben dargestellt, unwirtschaftlicher ist. Den höheren Einnahmen ist allerdings der höhere Aufwand bei der Abrechnung gegenüberzustellen und ist von jedem Anlagenbetreibenden individuell abzuwägen.

Tabelle 7.21: Differenzbetrag zwischen pauschalierter Bezuschlagung und getrennter Bezuschlagung nach Eigenverbrauch und Einspeisung.

EVQ in %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\Delta Erlöse$ in €	160	144	128	112	96	80	64	48	32	16	0

Die Erlössituation bei unterschiedlichen EVQs sowie der im realen Objekt erzielten Erlöse stellt Abbildung 7.63 dar. Grundsätzlich fallen die absoluten Erlöse der elektrischen KWK-Erzeugung geringer als bei der ottomotorischen KWK-Anlage aus, was mit der geringeren Laufzeit bzw. der geringen Stromkennzahl zu begründen ist. Der höhere thermische Wirkungsgrad führt zu

höheren Einsparungen in der thermischen Seite der Objektversorgung, welche hier nicht inbegriffen ist. Eine Aussage über Wirtschaftlichkeit im Sinne der VDI 2067 kann hieraus also nicht abgeleitet werden. Trotzdem kann es als charakteristisch bewertet werden, dass stirlingmotorische KWK, aufgrund ihrer höheren thermischen Leistung, eine geringe Laufzeit haben.<sup>10</sup> Durch die dadurch höhere  $EVQ_{KWK}$  liegen die spezifischen Erlöse über denen der ottomotorischen KWK-Anlage.

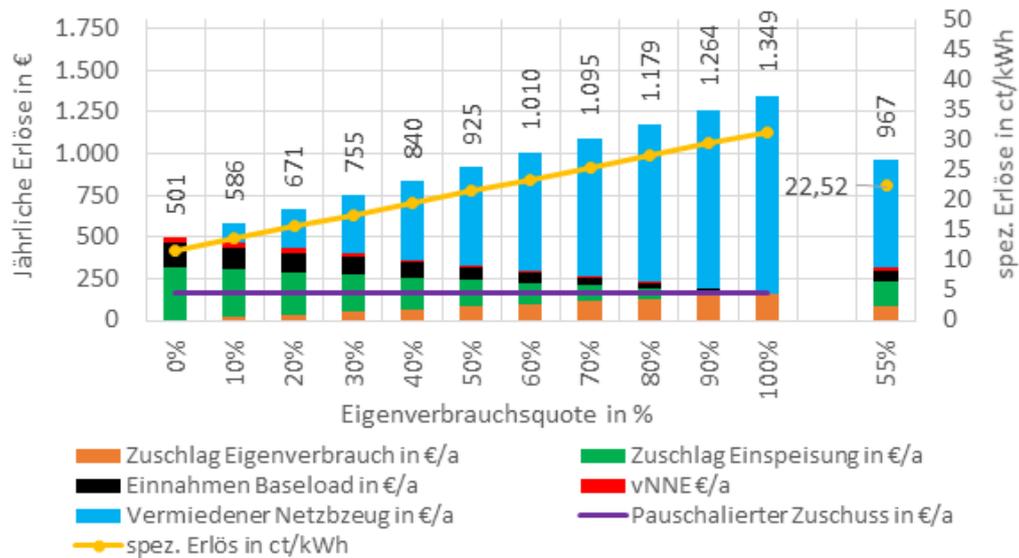


Abbildung 7.63: Links: Jährlich Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer stirlingmotorischen KWK-Anlage, welche im Bilanzzeitraum 4.296 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse.

Im Folgenden wird die Erlössituation eines Objektes betrachtet, welches mit einer PEM-Brennstoffzelle versorgt wird, die im bilanzierten Zeitraum 4.848 kWh erzeugt hat. Die erzielte  $EVQ_{KWK}$  im realen Objekt beträgt 33 %, was zu spezifischen Erlösen von 16,03 ct/kWh Stromerzeugung führt. Die erzielte  $EVQ_{KWK}$  ist als verhältnismäßig gering zu bewerten. Trotz geringerer elektrischer Nennleistung von 750 W, was 250 W unterhalb der zuvor betrachteten Systeme liegt, wird ein deutlich größerer Anteil der KWK-Erzeugung ins Netz eingespeist, was mit dem elektrischen Bedarfsprofil des Objektes zu begründen ist. Die mittleren jährlichen Erlöse betragen 786 €/a, was einem Differenzbetrag zum maximalen Erlösen bei einer  $EVQ_{KWK}$  von 100 % von 690 €/a entspricht. Eine höhere  $EVQ_{KWK}$  würde die Erlössituation deutlich verbessern und ist bei der Auslegung besonders zu berücksichtigen. Der maximale Differenzbetrag ( $EVQ_{KWK} = 0 %$ ) zwischen pauschalierter Vergütung und getrennter Vergütung von Einspeisung und Eigenverbrauch beträgt 120 €. Die Parametervariation der  $EVQ_{KWK}$  sowie die im Objekt erzielte  $EVQ_{KWK}$  und Erlöse sind in Abbildung 7.64 dargestellt.

<sup>10</sup> Aussage gültig für EFH mit geringem thermischem Bedarf.

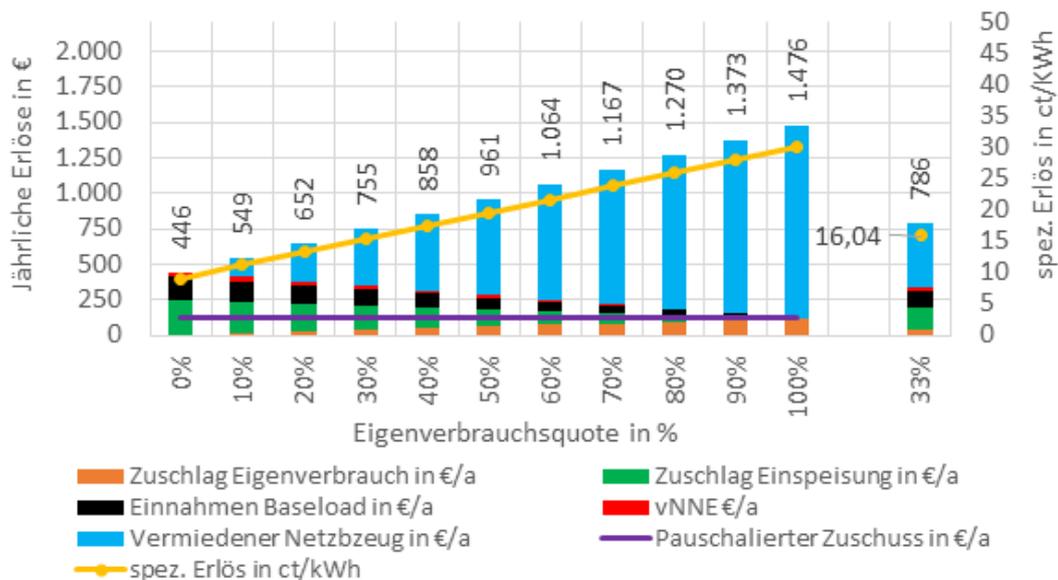


Abbildung 7.64: Links: Jährlich Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer PEM-Brennstoffzelle, welche im Bilanzzeitraum 4.838 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse.

Die oben beschriebene Festoxidbrennstoffzelle mit einer KWK-Erzeugung von 12.751 kWh konnte im realen Objekt eine  $EVQ_{KWK}$  von 86 % erreichen. Die erzielten spezifischen Erlöse betragen 26,54 ct/kWh und sind bedingt durch die hohe  $EVQ_{KWK}$  die höchsten der vier betrachteten Objekte. Die maximalen Erlöse bei  $EVQ_{KWK} = 100\%$  von 3.768 €/a können im Objekt nicht vollständig erreicht werden. Jedoch ist der erzielte Wert mit 3.384 €/a nah am maximalen Betrag. Der maximale Differenzbetrag ( $EVQ_{KWK} = 0\%$ ) zwischen pauschalierter Vergütung und getrennter Vergütung beträgt 240 €. Die gesamte Erlössituation ist in Abbildung 7.65 dargestellt.

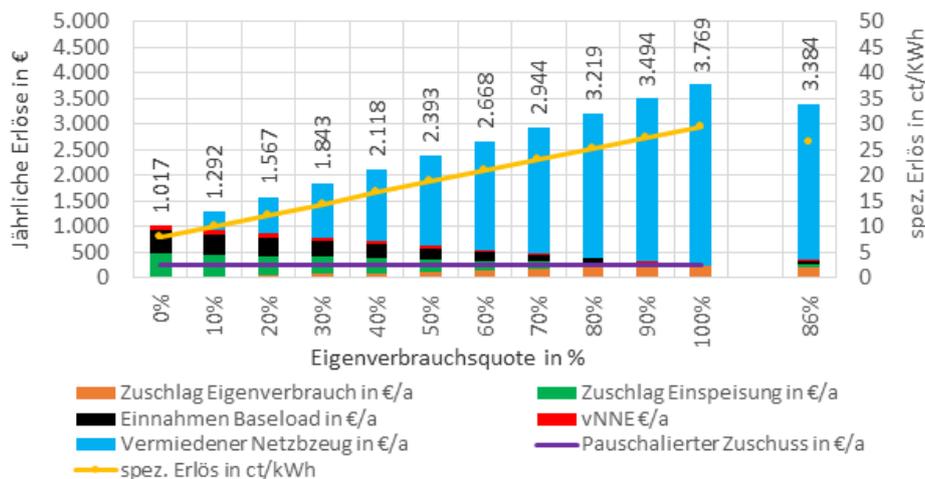


Abbildung 7.65: Links: Jährliche Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer Festoxidbrennstoffzelle, welche im Bilanzzeitraum 12.751 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse.

Unter dem Aspekt der Möglichkeit zur Flexibilisierung des KWK-Betriebs können unterschiedliche Punkte aus dem Erzeugungsverhalten sowie der aktuellen Erlössituation abgeleitet werden. Diese unterscheiden sich für verschiedene KWK-Technologien. Technologisch eignen sich

motorische KWK-Anlagen besser, um auf Netzsignale zu reagieren, da neben der Temperatur des thermischen Speichers keine Einschränkung für den fremdgesteuerten Anlagenbetrieb bestehen. Geht man von ähnlichen Verbräuchen im Objekt aus, eignen sich ottomotorische KWK-Anlagen tendenziell besser, da durch die geringere Stromkennzahl höhere Laufzeiten möglich sind. Dies hängt aber vom thermischen Verbrauch der Gebäude ab und es kann mit beiden Technologien, bei gleicher elektrischer Nennleistung, gleich viel Strom im Jahr erzeugt werden. Betrachtet man die Einnahmensituation von motorischen KWK-Anlagen, wäre bei einem Wegfall der Vergütung aus dem KWKG und geringen  $EVQ_{KWK}$  eine weitere Erlösposition nötig, um die Anlagen wirtschaftlich darstellbar zu betreiben.

## 7.4 Auswertung zu Deckungsgraden und eigenerzeugtem Strom

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Batterie auf EVQ und AG der Objekte analysiert. Hierbei wird auf unterschiedliche Bilanzgrenzen eingegangen. Die Bilanzgrenze KWK umfasst die Energieflüsse der KWK-Anlage. Die auf das Objekt ohne Batterie bezogene Eigenverbrauchsquote  $EVQ_{KWK}$  wird entsprechend aus der elektrischen KWK Erzeugung  $E_{KWK}^{Erz}$ , der Energie mit der die Batterie aus der KWK beladen wird  $E_{Bat-CH}^{KWK}$  sowie der vom Objekt ins Netz der öffentlichen Versorgung eingespeisten Energie  $E_{Obj}^{Einspeisung}$ , nach F. 7.12 und F. 7.13 berechnet.

$$EVQ_{KWK} = E_{KWK}^{EV} / E_{KWK}^{Erz} \quad \text{F. 7.12}$$

$$\text{wobei: } E_{KWK}^{EV} = E_{KWK}^{Erz} - E_{Bat-CH}^{KWK} - E_{Obj}^{Einspeisung} \quad \text{F. 7.13}$$

Die EVQ für das Objekt mit Batterie  $EVQ_{Obj}$  wird entsprechend nach F. 7.14 bilanziert.

$$EVQ_{Obj} = (E_{KWK}^{Erz} - E_{Obj}^{Einspeisung}) / E_{KWK}^{Erz} \quad \text{F. 7.14}$$

Die Steigerung der Eigenverbrauchsquote  $\Delta EVQ$  wird entsprechend aus der Differenz aus  $EVQ_{Obj}$  und  $EVQ_{KWK}$  nach F. 7.15 berechnet.

$$\Delta EVQ = EVQ_{Obj} - EVQ_{KWK} \quad \text{F. 7.15}$$

Die unterschiedlichen Bilanzgrenzen sind in Abbildung 7.66 dargestellt.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Der Energiemengenzähler der Batterie ist aus Batteriesicht hinter dem Wechselrichter installiert. Somit werden alle Verluste des Batteriebetriebs erfasst.

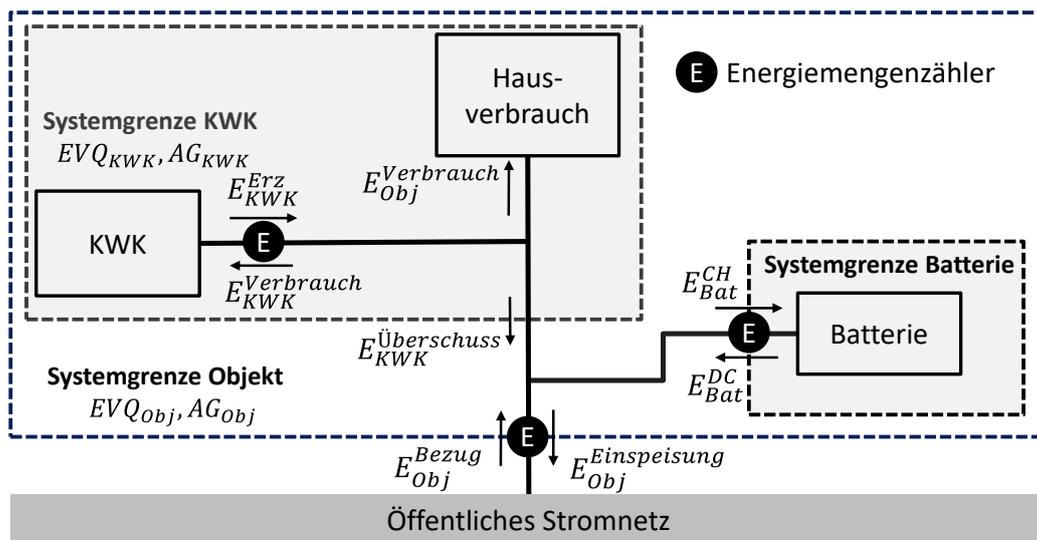


Abbildung 7.66: Bilanzgrenzen zur Bestimmung der Steigerung in Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad in den vermessenen Objekten mit Batterie.

Der  $AG_{KWK}$  setzt den Objektverbrauch  $E_{Obj}^{Verbrauch}$  mit dem Eigenverbrauch der KWK-Erzeugung in Relation und drückt aus, welcher Anteil aus der KWK gedeckt werden kann, entsprechend F. 7.16.

$$AG_{KWK} = \frac{E_{KWK}^{EV}}{E_{Obj}^{Verbrauch}} \quad \text{F. 7.16}$$

Durch die Batterie kann der Eigenverbrauch des Objektes  $EVQ_{Obj}$  erhöht werden, wodurch sich auch der  $AG_{Obj}$  erhöht. Der AG des Objektes mit Batterie  $AG_{Obj}$  wird entsprechend F. 7.17 berechnet.

$$AG_{Obj} = \frac{E_{Obj}^{EV}}{E_{Obj}^{Verbrauch}} \quad \text{F. 7.17}$$

Die Steigerung des AGs  $\Delta AG$  wird äquivalent zur Steigerung der EVQ nach F. 7.18 berechnet.

$$\Delta AG = AG_{Obj} - AG_{KWK} \quad \text{F. 7.18}$$

In einem ersten Schritt wird die Energie betrachtet, mit der die Batterien über den Bilanzierungszeitraum beladen  $E_{Bat}^{CH}$  und entladen  $E_{Bat}^{DC}$  wird, um so die Jahresnutzungsgrade ( $JNG_{Bat}$ ) der Batterien zu bestimmen. Die Differenz der Energien wird um die Differenz der Ladezustände bereinigt. Der resultierende formale Zusammenhang ist in F. 7.19 beschrieben.

$$JNG_{Bat} = E_{Bat}^{CH} - E_{Bat}^{DC} - \Delta E_{Bat}^{SoC} \quad \text{F. 7.19}$$

14 Systeme konnten mit vollständigen Jahresbilanzen erfasst werden, dargestellt in Abbildung 7.67. Der zugehörige Messpunkt zu den gemessenen Energien ist vor dem Batteriewechselrichter. Somit werden alle auftretenden Verluste erfasst. Da im Feld nur ein Messpunkt installiert ist, kann zwischen den Verlustarten nicht unterschieden werden. Es zeigen sich starke Abweichungen im JNG der Batterie. Der höchste tritt mit 81 % bei einer Batterie mit 14 kWh

Nutzkapazität in Kombination mit einer 4,7 kW ottomotorischen KWK-Anlage auf. Der niedrigste JNG tritt bei einer stirlingmotorischen KWK-Anlage in Kombination mit einer Batterie der Nutzkapazität 3 kWh auf. Im Mittel treten Jahresnutzungsgrade von 71 % auf. Betrachtet man nur KWK-Systeme mit einer elektrischen Nennleistung von unter 2 kW tritt ein mittlerer JNG von 69 % auf. Die Batteriebeladung  $E_{Bat}^{CH}$  hängt von den Einsatzzeiten der KWK sowie dem Hausverbrauch  $E_{Obj}^{Verbrauch}$  ab. Im Mittel wurden 1.381 kWh genutzt, um die Batterie zu beladen und knapp 995 kWh entladen.

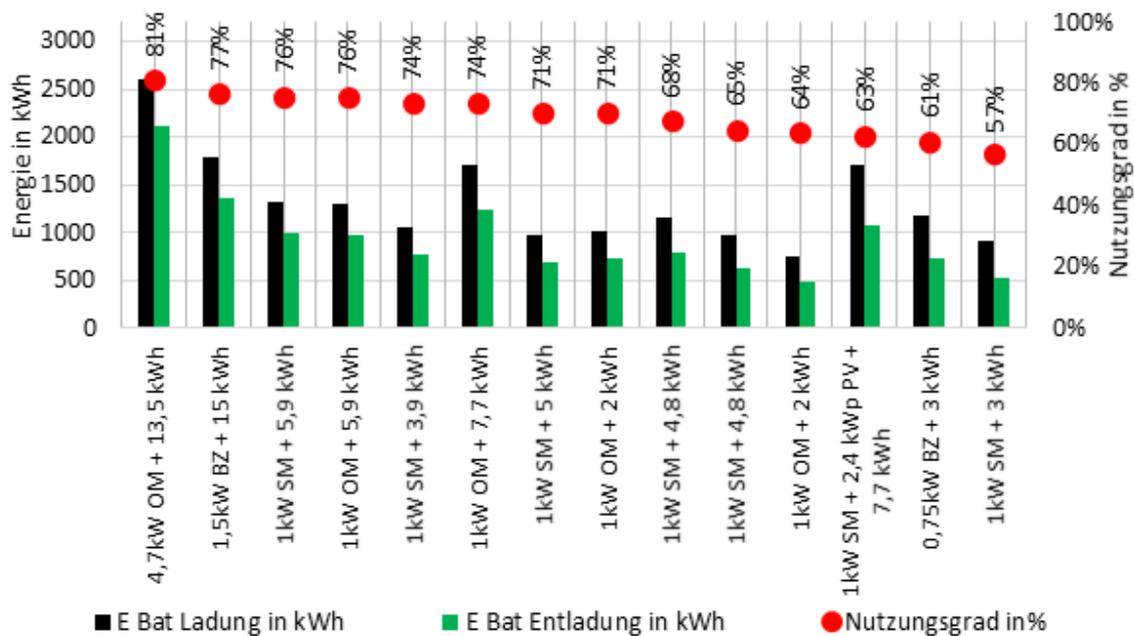


Abbildung 7.67: 14 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Energie mit welcher die Batterien im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2020 be- und entladen wurden sowie der daraus resultierende Jahresnutzungsgrad, welcher um den Unterschied im SoC zu Beginn und Ende der Messperiode bereinigt wurde.

Bezieht man die entladenen Energien der Batterien auf die installierte KWK-Leistung, so wurden im Mittel 836 kWh pro 1 kW elektrischer Nennleistung der KWK-Anlage entladen. Negativ auf den  $JNG_{Bat}$  wirken sich die während der Sommerperiode auftretenden Netzladungen der Batterie aus, welche auftreten, wenn nicht ausreichend KWK-Überschuss erzeugt wird, um den minimalen SoC der Batterie zu halten. Abbildung 7.68 stellt dar, wie hoch der Anteil der Netzladung an der gesamten Batteriebeladung ist. Im Mittel liegt dieser bei 34,8 kWh/Jahr, was einem relativen Anteil von 3 % entspricht. In dem Pool von 14 Anlagen findet sich ein Objekt, in der der Anteil der Netzladung 14 % beträgt. Hier lag eine längere KWK-Störung vor, was zu einer erhöhten Netzladung führte. Ohne diesen Ausreißer beträgt die mittlere Netzladung 24,4 kWh bzw. 2,2 % des gesamten Netzbezugs. In der Technologiekombination KWK-System und Batterie sind KWK-Störungen oder längere Wartezeiten auf Wartungstermine als besonders problematisch zu bewerten, da so der Strombezug der Objekte erhöht wird. Dieser Sachverhalt schlägt sich auch im  $JNG_{Bat}$  nieder, da die Batterie beladen wird, ohne später entladen zu werden.

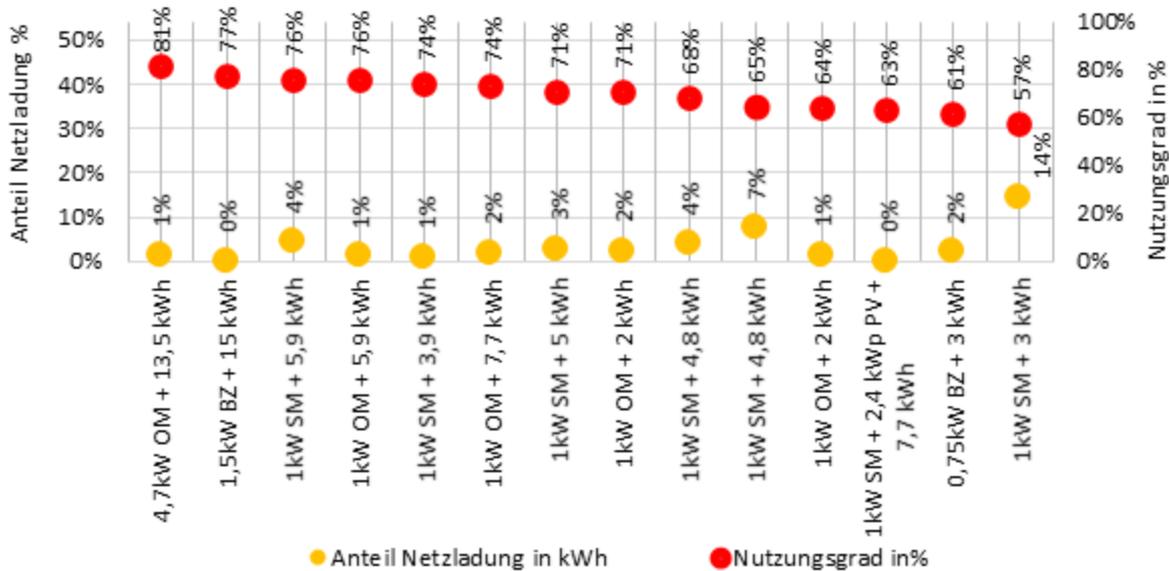


Abbildung 7.68: 14 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Jahresnutzungsgrad sowie der Anteil der Batteriebeladung, welcher in der Bilanzierungsperiode aus dem Netz erfolgte.

Neben der Analyse der Be- und Entladeenergie wird untersucht, mit welchen Leistungen die Batterien be- und entladen werden. Die Be- und Entladeleistung konnten als weiterer Einflussfaktor auf den  $JNG_{Bat}$  identifiziert werden. Abbildung 7.69 stellt die mittleren Leistungen dar, mit der die Batterien be- und entladen wurden sowie das gewichtete Mittel aus Be- und Entladeleistungen. Hierbei werden nur Leistungen betrachtet, in denen die Batterien aktiv be- oder entladen werden. Tendenziell zeigt sich, dass Batterien, die mit höheren Leistungen be- und entladen wurden, einen höheren  $JNG_{Bat}$  aufweisen. Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die auftretende Beladeleistung. Hierbei ist die Leistung der KWK-Anlage sowie der auftretende Objektverbrauch ausschlaggebend. Liegen Hausverbrauch und KWK-Erzeugung auf ähnlicher Höhe, führt dies zu einem geringen KWK-Überschuss und dementsprechend zu einer geringeren Beladeleistung. Dies führt zu einem ineffizienten Arbeitspunkt des Batteriewechselrichters. Eine Batterie mit einer Nutzkapazität von 13,5 kWh, welche im Mittel mit ca. 600 W be- und entladen wird, weist einen  $JNG_{Bat}$  von 81 % auf. Eine Batterie mit 2 kWh Nutzkapazität, die im Mittel mit ca. 480 W beladen wird und mit ca. 190 W entladen, weist einen  $JNG_{Bat}$  von 64 % auf. Neben der Kombination mit hoher Netzladung weist die Systemkombination mit 3 kWh Nutzkapazität Batterie und einer 0,75 kW Brennstoffzelle den geringsten  $JNG_{Bat}$  von 61 % auf. Die Batterie wird im Mittel mit ca. 130 W beladen und 170 W entladen. Es ist ersichtlich, dass die mittleren Be- und Entladeleistungen stark variieren. Die auftretenden Be- und Entladeleistungen sind bei Weiterentwicklung der Technologiekombination zu berücksichtigen. Hierbei wäre ein Batteriewechselrichter, damit er zu den Überschussleistungen von KWK-Anlagen passt, mit einer Nennleistung von ca. 350 W auszulegen. Dies könnte die Systemeffizienz deutlich steigern. Unter Ausschluss des KWK-Systems mit einer Leistung von 4,7 kW beträgt die mittlere Ladeleistung 261 W, die mittlere Entladeleistung beträgt 385 W.

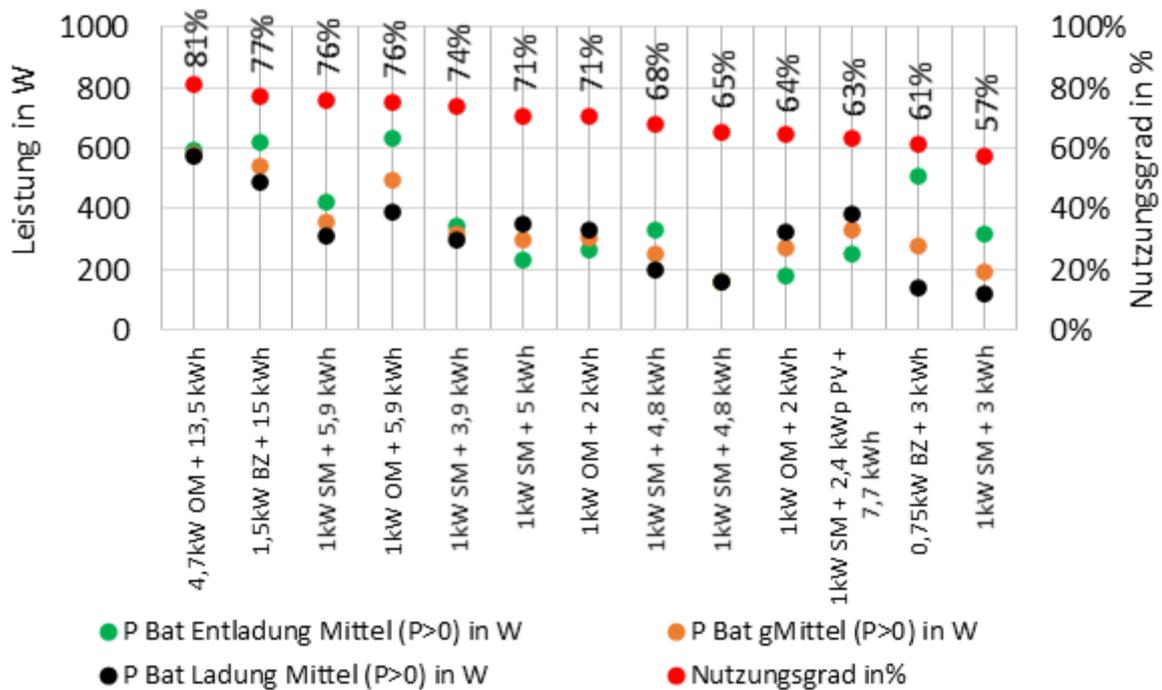


Abbildung 7.69: 13 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Mittlere Leistungen mit welchen die Batterien im Messzeitraum be- und entladen wurden.

Wie hoch der Einfluss der Batterien auf die EVQ der KWK ist, hängt vom Erzeugungsverhalten der KWK sowie dem Verbraucherverhalten des Objektes ab, dargestellt in Abbildung 7.70. Hierbei wurden im Feldversuch stark abweichende Erhöhungen der Eigenverbrauchsquote erreicht. Neben der KWK-Erzeugung ist das Vorhandensein eines KWK-Überschusses nötig, damit die Batterie beladen werden kann. Bei geringerer KWK-Erzeugung führt die gleiche Beladung der Batterie zu einer höheren Steigerung der EVQ, da die Bezugsgröße kleiner ist. Eine geringere KWK-Erzeugung führt grundsätzlich dazu, dass die Batterie seltener vollgeladen ist und somit mehr KWK-Überschuss genutzt werden kann, um die Batterie zu laden. Daher führt die Batterie bei KWK-Anlagen mit geringer Erzeugung tendenziell zu einer höheren Steigerung der EVQ. Bei ähnlichen Wärmebedarfen der Objekte laufen die stirlingmotorischen KWK-Anlagen deutlich weniger und weisen daher höhere Steigerungen der EVQ auf. Es liegt ein geringerer KWK-Überschuss vor, der zu größeren Teilen in der Batterie gespeichert werden kann. Bei den ottomotorischen KWK-Anlagen liegt ein höherer KWK-Überschuss vor, welcher zu verhältnismäßig geringeren Anteilen in der Batterie gespeichert werden kann. Die höchste Steigerung der EVQ erfolgt bei einem stirlingmotorischen KWK-System in Kombination mit einer Batterie mit 3 kWh Nutzkapazität. Die geringste Steigerung der EVQ erfolgt bei einer Brennstoffzelle der Leistungsklasse 1,5 kW, die den vollständigen KWK Überschuss aufnehmen kann. Die Batterie in Kombination mit der Brennstoffzelle der Leistungsklasse 0,75 kW kann relativ wenig KWK-Überschuss aufnehmen.

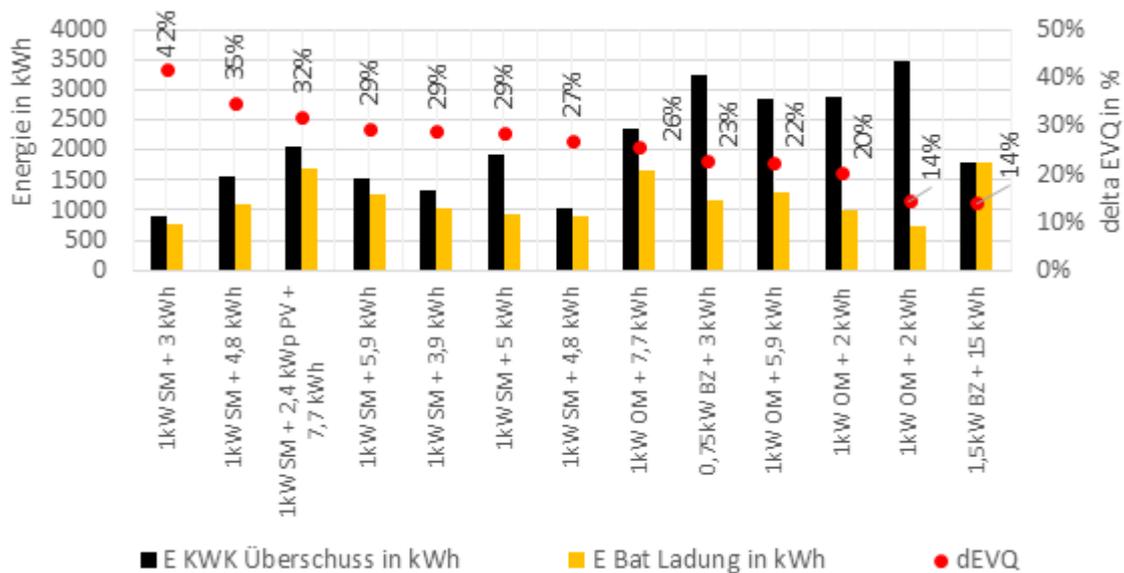


Abbildung 7.70: 13 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Vorhandener KWK-Überschuss sowie die erreichte Batterieladung in kWh.<sup>12</sup>

Im Mittel liegt die elektrisch erzeugte Energie der sechs stirlingmotorischen KWK bei 3.270 kWh/a, der KWK-Überschuss bei 1.383 kWh/a. Hiervon können im Mittel 1.064 kWh/a genutzt werden, um die Batterie zu beladen. Das Objekt mit PV-Anlagen wurde für die Betrachtung ausgeschlossen. In dem Objekt, in dem neben stirlingmotorischer KWK-Anlage und Batterie eine PV-Anlage von 2,4 kWp installiert ist, wurden 1.707 kWh überschüssige Erzeugung von KWK- und PV-Anlage genutzt, um die Batterie zu beladen. Durchschnittlich wird mit den stirlingmotorischen KWK-Anlagen in Kombination mit einer Batterie so eine Steigerung der EVQ von 32 % erreicht. Dies entspricht einer durchschnittlichen Batterie Beladung von 0,067 kWh pro erzeugter kWh KWK-Strom und kWh Batterie Nutzkapazität.

Bei den vier ottomotorischen KWK-Anlagen in Kombination mit Batterie kann eine mittlere Steigerung der EVQ von 19 % erreicht werden. Hierbei liegt eine mittlere KWK-Erzeugung der Anlagen von 5.586 kWh/Jahr vor. Der verfügbare Überschuss liegt bei 2.893 kWh/a und damit deutlich über dem der stirlingmotorischen KWK-Anlagen in der betrachteten Stichprobe. Bei den vier ottomotorischen KWK-Anlagen werden im Mittel 1.196 kWh genutzt, um die Batterie zu beladen. Im Durchschnitt werden 0,051 kWh pro erzeugter kWh KWK-Strom und kWh Batterie Nutzkapazität genutzt, um die Batterie zu beladen. Dieser Wert ist ca. 24 % geringer als der der stirlingmotorischen KWK-Anlagen.

Es zeigt sich, dass ein höherer Überschuss nicht automatisch zu höherer Beladung der Batterie führt. Dieser Sachverhalt ist damit zu begründen, dass ein hoher KWK-Überschuss dazu führt, dass die Batterien oft vollgeladen sind und keine überschüssige Energie mehr aufnehmen können.

<sup>12</sup> Im Objekt mit installierter PV-Anlage gibt der E KWK Überschuss auch den erzeugten Überschuss der PV-Anlagen an.

nen. Um dies zu prüfen wurden die Ladezustände der Batterie in der Heizperiode separat ausgewertet. Hierbei wurde das oben beschriebene Vorgehen zur Zustandsbestimmung der Batterie verwendet. Die Ergebnisse für den Batteriezustand SoC = 0 und SoC = 1 sind in Abbildung 7.71 dargestellt. Bei Objekten mit hohem KWK-Überschuss wird der Zustand SoC = 1 in 40 % der Zeitpunkte in der Heizperiode erreicht. Bei den stirlingmotorischen KWK-Anlagen wird der Batteriezustand in vielen Fällen nur in unter 10 % der Zeitpunkte erreicht. Sowohl bei der Brennstoffzelle der Leistungsklasse 1,5 kW sowie bei den ottomotorischen KWK-Anlagen treten extreme Systemverhalten auf. Bei der Brennstoffzelle weist die Batterie nie den Zustand Soc = 1 auf, ist also nie vollgeladen, hat dafür aber in ca. 28 % der Zeitpunkte einen Zustand von SoC = 0.

Bei den ottomotorischen KWK-Systemen der Leistungsklasse 4,7 kW ist die Batterie zu über 60 % der Zeit im Zustand SoC = 1, also sehr oft voll beladen. In dieser Systemkombination ist die Batterie zu unter 5 % voll entladen (SoC = 0). Beide beschriebenen Extrema sind bei der Auslegung von KWK-Anlagen in Kombination mit Batterie zu berücksichtigen und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu vermeiden.

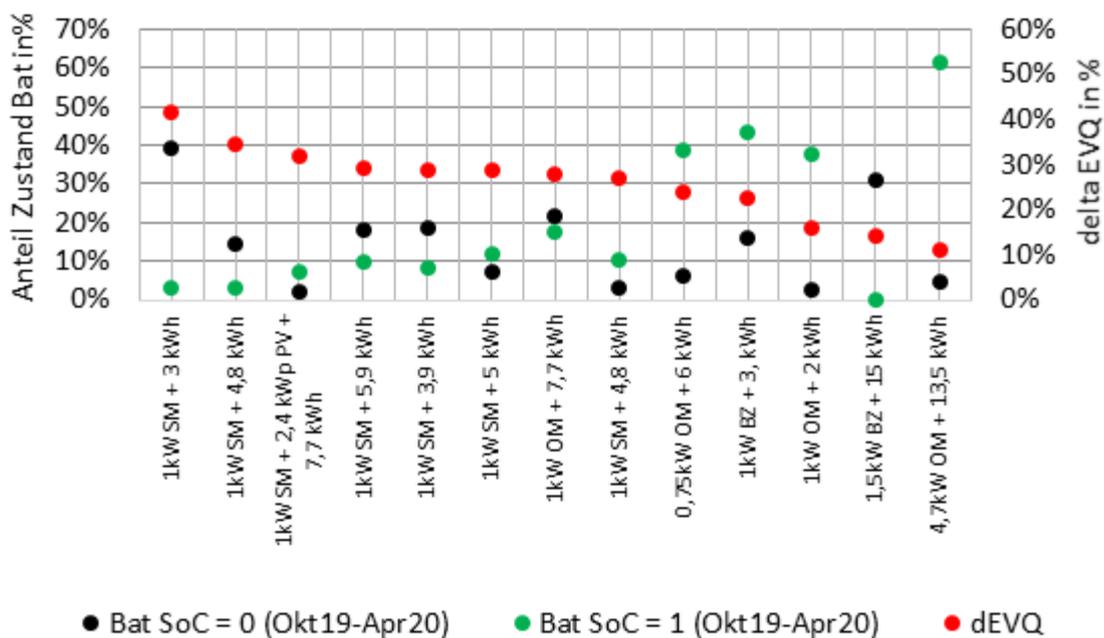


Abbildung 7.71: 14 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Erreichte Steigerung der Eigenverbrauchsquote durch den Einsatz der Batterien sowie der zeitliche Anteil der Batteriezustände SoC = 1 und SoC = 0.

Unter dem Aspekt der Steigerung des Autarkiegrades wird das Verhältnis aus reduziertem Netzbezug und elektrischem Objektverbrauch betrachtet, dargestellt in Abbildung 7.72. Die größte Steigerung des AGs sowie der höchste absolute AG kann mit dem System mit PV-Anlage und KWK-Anlage erreicht werden. Durch die Batterie konnte eine Steigerung des AGs um 33 % erreicht werden, was in einem absoluten AG von 93 % resultiert.

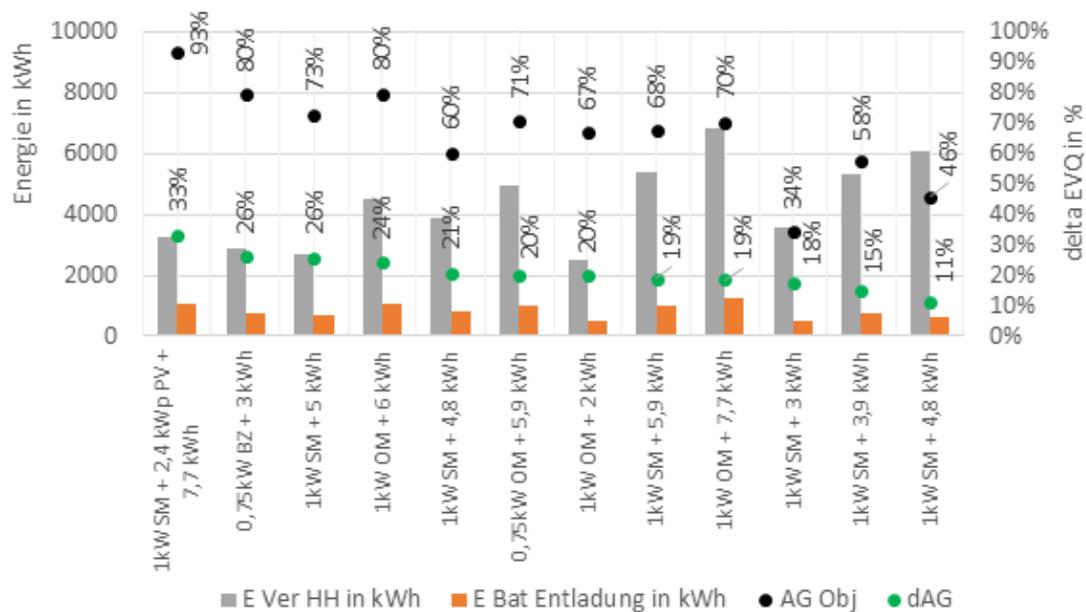


Abbildung 7.72: 12 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Erreichte Steigerung des Autarkiegrades (AG in %), Autarkiegrad des Objektes mit Batterie (AG<sub>Obj</sub> in %) durch den Einsatz der Batterien sowie zugehöriger elektrischer Hausverbrauch und Entladung der Batterie in %.<sup>13</sup>

Im Folgenden wird das Objekt, welches aus stirlingmotorischer KWK-Anlage, Batteriespeicher und PV-Anlage versorgt wird, im Detail betrachtet. So kann dargestellt werden, wie sich das Erzeugungsverhalten von PV und KWK ergänzt. Die monatliche Erzeugung in kWh ist in Abbildung 7.73 dargestellt. In der Heizperiode wird ein AG<sub>Obj</sub> von 89 % bis 96 % erreicht. In der Übergangszeit von März bis Juni kann durch die PV-Anlage der hohe AG gehalten werden. In der Sommerperiode geht die KWK-Erzeugung deutlich zurück auf ca. 100 kWh/Monat. In dieser Zeit steigt die PV-Erzeugung deutlich. Die höheren EVQ<sub>Obj</sub> im Sommer zeigen, dass das Erzeugungsprofil der PV-Anlage sowie die Batteriekapazität besser zum Verbrauchsprofil der Nutzer passt. Die EVQ in der Heizperiode liegt im Mittel bei ca. 60 %. Es zeigt sich allerdings auch, dass die Technologie-Kombination PV-Anlage und Batterie im Winter eine ähnliche Schwäche wie motorische KWK-Anlagen in Kombination mit Batterien im Sommer haben. Die geringe Erzeugung allein reicht nicht, um den minimalen SoC der Batterie zu halten. Grundsätzlich ergänzen sich die Technologien sehr gut. Die EVQ<sub>Obj</sub> von 66 % zeigt, dass die Erzeugungskapazität als durchaus hoch für das dargestellte Objekt bewertet werden kann.

<sup>13</sup> System mit elektrischer Leistung > 1 kW nicht dargestellt, da Objektverbrauch deutlich größer.

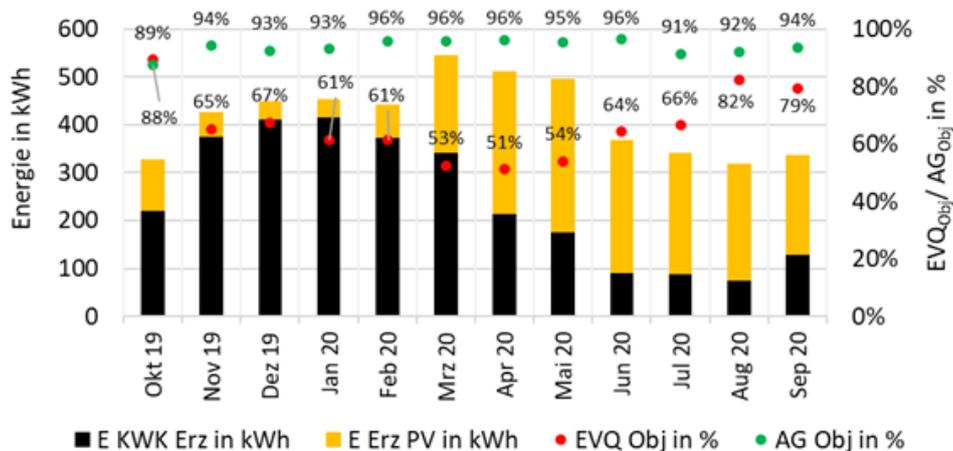


Abbildung 7.73: KWK und PV-Erzeugung in kWh welche im Objekt mit einer 1 kW stirlingmotorischen KWK-Anlage, einer 2,4 kWp PV-Anlage sowie einem Batteriespeicher mit einer Nutzkapazität von 7,68 kWh.

Neben der Betrachtung der auf den elektrischen Bedarf und KWK-Erzeugung bezogenen Kennwerte  $EVQ_{Obj}$  und  $AG_{Obj}$  werden im Folgenden die thermischen Deckungsanteile der KWK-Anlage  $\rho_{KWK}$  von Objekten bestimmt, bei denen für den Bilanzierungszeitraum vollständige thermische Erzeugungsprofile gemessen wurden. Der thermische Deckungsanteil wird durch das Verhältnis von thermischer Erzeugung der KWK-Anlage  $Q_{KWK}^{Erz}$  und gesamter thermischer Erzeugung entsprechend F. 7.20 bestimmt.

$$\rho_{KWK} = \frac{Q_{KWK}^{Erz}}{Q_{KWK}^{Erz} + Q_{ZHG}^{Erz}} \tag{F. 7.20}$$

Hierbei konnte für elf stirlingmotorische KWK-Systeme der thermische Deckungsanteil der KWK berechnet werden. Die erreichten thermischen Deckungsanteile sowie die resultierende Trendgerade der stirlingmotorischen KWK-Anlagen sind in Abbildung 7.74 dargestellt.

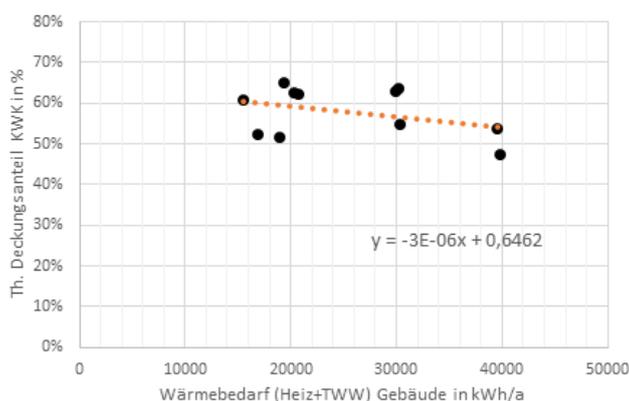


Abbildung 7.74. Thermischer Deckungsanteil für 13 stirlingmotorische KWK-Systeme abhängig vom Wärmebedarf des vermessenen Gebäudes.

Das höchste in der Stichprobe dargestellte Objekt weist einen thermischen Bedarf von ca. 40.000 kWh/a auf. Das kleinste Objekt einen thermischen Bedarf von 15.000 kWh/a. Die Bereiche zwischen den Intervallgrenzen können über die Trendlinie abgebildet werden. Der thermische Deckungsanteil der KWK von Objekten mit einem thermischen Bedarf von über 40.000 kWh/a kann über die Trendgerade nicht bestimmt werden. Die äquivalente Methodik

konnte für 14 ottomotorische KWK-Anlagen durchgeführt werden. Die bestimmten thermischen Deckungsgrade sind in Abbildung 7.75 dargestellt. Die Stichprobe enthält die thermischen Deckungsgrade von drei Objekten mit einem thermischen Bedarf von über 55.000 kWh/a, was es ermöglicht die Trendgerade bis 68.000 kWh/a zu plausibilisieren.

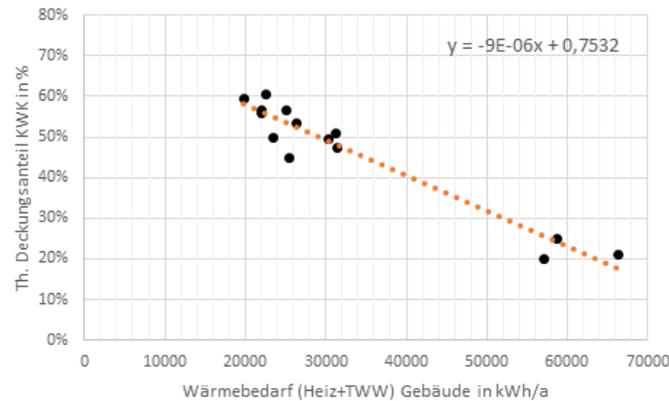


Abbildung 7.75. Thermischer Deckungsanteil KWK für 14 ottomotorische KWK-Systeme abhängig vom Wärmebedarf der vermessenen Gebäude

## 7.5 GIS-basierte Bewertung von Innovation-City KWK-Ausbaupotenzialen

In den folgenden zwei Abschnitten werden die Projektergebnisse auf unterschiedliche Gebiete übertragen. Es erfolgt die Übertragung auf das Projektgebiet der Innovation-City sowie auf die gesamte Stadt Bottrop. In einem letzten Schritt erfolgt die Übertragung auf das Bundesgebiet. Unterschiedliche Parameter werden in diesem Zusammenhang betrachtet. Neben der Einsparung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und Primärenergie durch KWK-Systeme in Kombination mit Batteriespeichern, werden die durch die KWK-Systeme und die Batterien vermiedenen Netzbezüge bestimmt. Diese werden separat betrachtet und eine brutto Einsparung bestimmt, welche die Einsparung des vermiedenen Netzbezuges angibt. Somit kann quantifiziert werden, wie stark die Systemkombination vorgelagerte Netzstrukturen entlastet. Aufgrund des noch nicht gegebenen wirtschaftlichen Betriebs der Systemkombination wird eine Übertragung der wirtschaftlichen Kennwerte nicht durchgeführt. Weiterhin wird von einem rein wärmegeführten Betrieb der Anlagen ausgegangen.

Zur Bestimmung des Heiz- und TWW-Bedarfs wird auf Daten des Raumwärmebedarfsmodells vom LANUV zurückgegriffen. In diesem werden die Wärmebedarfe auf Grundlage der Gebäudegrundfläche berechnet. Die angewendete Berechnungsmethodik des Raumwärmebedarfsmodells wird kurz zusammengefasst. Die Gebäudegrundfläche wird dem amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem entnommen und die Gebäude über ein 3D-Gebäudemodell bestimmt. In mehreren Schritten wird jedem Gebäude ein Wärmebedarf zugeordnet. Zunächst wird jede Gebäudehülle einer Gebäudeklasse zugeordnet, wobei zwischen den fünf Klassen „Wohngebäude“, „Nichtwohngebäude (Standard)“, „Nichtwohngebäude mit

geringem Wärmebedarf“, „Nichtwohngebäude mit erhöhtem Raumwärmebedarf“ sowie „Gebäude denen kein Wärmebedarf zugewiesen werden kann“ unterschieden wird. Für die folgende Betrachtung werden ausschließlich Wohngebäude als möglicher Anwendungsfall betrachtet. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich auch bzw. besonders Nichtwohngebäude mit hohem Wärmebedarf, wie Schwimmbäder oder Krankenhäuser, als Einsatzort für KWK-Anlagen eignen. Der Schwerpunkt des Berichtes und folglich auch dieses Abschnittes liegt auf Wohngebäuden, weshalb sich der Anwendungsfall für Mikro-KWK-Anlagen ausschließlich drauf bezieht. Die im Datensatz enthaltene Anzahl an Gebäuden für die Stadt Bottrop sind in Tabelle 7.22 aufgeführt. Für die Kategorie Wohngebäude werden 25.682 Gebäude gelistet.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Berechnung der Energiebezugsfläche anhand des Gebäudevolumens, welche auf Grundlage der EnEV 2009 erfolgt. In einem dritten Schritt erfolgt die Auswertung des Wärmebedarfs von Wohngebäuden, welche den Gebäudetyp und das Baualter berücksichtigt. Die Gebäudealter werden aus dem Zensus 2011 abgeleitet, in dem alle Gebäude in einem 100m x 100m Raster charakterisiert werden. [111] Hierbei wird zwischen neun Baujahresklassen sowie fünf Gebäudetypen unterschieden.

Tabelle 7.22: Anzahl der Gebäudeklassen nach Nutzungsart des Gebäudes und Kategorien des amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems für das Gebiet der Stadt Bottrop [112]

Gebäudeklasse	Beschreibung	Anzahl Gebäude
1	Kein Wärmebedarf zugewiesen	39.405
2	Wohngebäude	25.682
3	Nichtwohngebäude (Standard)	2.744
4	Nichtwohngebäude mit geringem Wärmebedarf	1.399
5	Nichtwohngebäude mit erhöhtem Wärmebedarf	264

Die Gebäudetypen umfassen Einfamilienhaus/ Doppelhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus, großes Mehrfamilienhaus sowie Hochhaus. Die genutzten spezifischen Wärmebedarfe für die jeweiligen Gebäudetypen sind in Tabelle 7.23 zusammengestellt und entstammen [113]. In den flächenspezifischen Verbrauchswerten ist ein pauschaler TWW Bedarf von 13,5 kWh/m<sup>2</sup>a enthalten.

Tabelle 7.23: Spezifischer Wärmebedarf von unterschiedlichen Gebäudetypen und Baujahren. Die Wärmebedarfe enthalten einen pauschalierten spezifischen TWW Bedarf von 13,5 kWh/m<sup>2</sup>a [112]

Baujahr	< 1918	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978	1979-1983	1984-1994	1995-2001	> 2002
EFH/ Doppelhaushälfte	202	160	184	142	155	116	115	104	78
Reihenhaus	172	144	143	119	138	105	93	94	77
MFH	151	160	176	140	124	109	106	102	72
Großes MFH	134	138	145	141	121	103	83	79	59
Hochhaus	81	84	88	107	95	79	65	62	47

Da keine gebäudescharfen Informationen über das Baualter zur Verfügung stehen, wird jeder Rasterzelle und den darin liegenden Gebäuden ein gemittelter spezifischer Verbrauchswert abhängig von den in der Rasterzelle liegenden Gebäuden zugeordnet. Unter Berücksichtigung einer Sanierungsquote von 1 %/a bezogen auf das Jahr 1990 sowie dem Abgleich und der Anpassung der Berechnungsergebnisse mit realen Heizwärmebedarfen, werden netto Wärmebedarfe für alle Gebäude errechnet. Diese werden in einem letzten Schritt witterungsbereinigt. Für ganz NRW wird so ein Raumwärmebedarf (Heizwärme + TWW) für alle Gebäudeklasse von 218,5 TWh/a ermittelt. Hiervon entfallen 136 TWh/a auf Wohngebäude und 82,5 TWh/a auf Nichtwohngebäude. [112]

Bezüglich der Verteilung und dem Alter der aktuellen Heizungstechnologien werden unterschiedliche Bestände betrachtet. Dabei unterscheidet sich der Heizungsbestand zwischen unterschiedlichen Bilanzierungsebenen. Es unterscheiden sich regional sowohl die Heizungstechnologie als auch der bezogene Energieträger. Grundsätzlich gilt, je urbaner eine Region ist, desto höher ist der Anteil leitungsgebundener Energieversorgung. Hohe Anteile von Fernwärme liegen historisch bedingt in den Stadtstaaten Hamburg und Berlin sowie in den neuen Bundesländern. Mit Erdgas betriebene Heizungen sind besonders stark in den Bundesländern Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Nordrhein-Westfalen sowie Rheinland-Pfalz vorzufinden. [114]

Ein Anschluss an das Fernwärmenetz wird als Ausschlusskriterium für die Einbindung einer KWK-Anlage gewertet. Da nicht alle Daten zu Heizungen regional aufgeschlüsselt verfügbar sind werden in einem ersten Schritt die Werte für den deutschlandweiten Heizungsbestand betrachtet. Hierbei beziehen sich die folgenden Werte auf Wohngebäude und Wohnungen. Nach wie vor ist Erdgas der am stärksten genutzte Energieträger mit 48,2 %. Es werden 25,6 % der benötigten Primärenergie in Form von Öl bezogen, 13,9 % über Fernwärme. Zum Heizen werden 4,6 % der Energie von Wohngebäuden und Wohnungen elektrisch für Wärmepumpen und Nachtspeicher bezogen. Für diesen Bericht wird für alle Bilanzgrenzen der in Deutschland vorliegende Heizungs mix angenommen. Das GEG bringt unterschiedliche Verbote mit sich, welche den Modernisierungsdruck für alte Heizungen erhöhen. Hierzu zählt, dass Heizkessel, die vor dem 1. Januar 1991 eingebaut/aufgestellt wurden und mit flüssigem oder gasförmigem Brennstoff beschickt werden, nicht mehr betrieben werden dürfen. Des Weiteren dürfen Heizkessel (ab 1. Januar 1991), welche eine Einsatzzeit von 30 Jahre überschritten haben nicht

mehr betrieben werden (nicht anzuwenden auf Niedertemperatur-Heizkessel und Brennwertkessel sowie heizungstechnische Anlagen deren Nennleistung weniger als 4 kW oder mehr als 400 kW betragen). Ab 2026 dürfen Heizkessel, die mit Öl oder Kohle befeuert werden, nur in strengen Ausnahmefällen (vgl. GEG §72 Absatz 4) betrieben werden. [73]

Im Mittel handelt es sich bei 46,8 % der betriebenen Öl- und Gasheizungen um Brennwertkessel, bei 42,2 % um Niedertemperaturkessel. Hier liegt ein besonders hoher Modernisierungsdruck vor. Das durchschnittliche Alter der Heizungen in Deutschland beträgt 17 Jahre. [114] Die Altersstruktur der Heizungen in Wohnungen ist in Tabelle 7.24 dargestellt.

Tabelle 7.24: Altersstruktur der Heizungssysteme in Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Wohnungen in Mehrfamilienhäusern. [114]

	Ein- und Zweifamilienhäuser	Wohnungen in MFH
Anteil Altersklasse für Gebäudekategorie in %		
< 5 Jahre	19	17,7
5 bis 10 Jahre	16,1	16,3
10 bis 15 Jahre	13,3	11,77
15 bis 20 Jahre	13,3	12,7
20 bis 25 Jahre	16,8	14,6
> 25 Jahre	21,5	27,7
Summe >15	51,6	55,0

Für EFH und ZFH weisen 51,6 % der Heizungen ein Alter von mindestens 15 Jahren auf. In der Gebäudeklasse MFH sind es 55 %. Als direkt substituierbar werden Heizungssysteme betrachtet, welche eine Betriebsdauer von 15 Jahren überschritten haben. [114]

Als mögliches Substitutionspotenzial werden unterschiedliche Anteile der dargestellten Gebäude und Energieträgerklassen bewertet. Hierbei werden Objekte, welche mit Fernwärme, Nachtspeicher, Elektro-Wärmepumpe und sonstigen Heizungen versorgt werden, als für Mikro-KWK ungeeignet betrachtet. Als zur Substitution durch Mikro-KWK-Anlagen geeignete Heizungssysteme wird der mittlere Anteil von Heizungssystemen mit einem Alter von über 15 Jahren angenommen, welcher 53,3 % entspricht. Hierbei wird angenommen, dass 45 % der Gebäude, welche aktuell mit Öl versorgt werden, eine Möglichkeit zum Anschluss an das Gasnetz haben. [115] Dieser Wert wird auch für mit Kohle beheizte Gebäude angenommen. Die Anschluss- sowie Ausbaukosten der Altheizungen, wären bei einem Wechsel des Heizungssystems zu berücksichtigen. Die Anteile des Energieträgerbezugs im aktuellen Heizungsbestand sowie der hiervon substituierbare Anteil sind in Tabelle 7.25 dargestellt.

Tabelle 7.25: Genutzte Energieträger zur Wärmebereitstellung im deutschen Wohngebäude- und Wohnungsbestand 2019 sowie potentieller Substitutionsanteil der aktuell bezogenen Energieträger. [114] [115] [116]

	Erdgas	Öl	Fernwärme	Nachtspeicher	Elektro-WP	Kohle	Sonstige*
Anteil Energieträger in %	48,2 %	25,6 %	13,9 %	2,6 %	2,2 %	1,50 %	6,0 %
Anteil Substitution durch KWK in %	53,3 %	45 %	0 %	0 %	0 %	45 %	0 %

\*sonstige Zentral-/Einzelheizungen, Flüssiggas/ Holz/Pellets/Kohle

Als mögliches Einsatzgebiet für Mikro-KWK-Anlagen der Leistungsklasse 1 kW elektrisch werden unterschiedliche Gebäudeklassen betrachtet. Hierzu werden im Projektgebiet alle Gebäude betrachtet, welche einen Wärmebedarf zwischen 15.000 und 55.000 kWh/a aufweisen. Die darunter liegende Wärmebedarfsklasse ist grundsätzlich ein Anwendungsfall für Brennstoffzellen, wenn im Objekt ein ausreichend hoher elektrischer Bedarf vorliegt. Aus diesem Grund wird die Gebäudeklasse mit einem Wärmebedarf zwischen 10.000-15.000 kWh miterfasst, in diesem Bericht aber nicht weiter ausgewertet. Weiterhin wird auch die Gebäudeklasse mit einem Wärmebedarf zwischen 45.000-55.000 kWh/a erfasst, da sie als möglicher Einsatzfall für Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW betrachtet werden kann. Allerdings ist die  $EVQ_{KWK}$  im Normalfall bereits ohne Batterie so hoch, dass der Einsatz einer Batterie unter dem Aspekt der Steigerung der EVQ nicht sinnvoll ist. Daher wird die Gebäudeklasse erfasst, auch als möglicher Anwendungsfall für KWK-Anlagen höherer Leistungsklassen, hier allerdings nicht weiter ausgewertet.

Da im Projektgebiet der ICM relativ große Teile mit Fernwärme versorgt werden, kommt es für verhältnismäßig wenige Gebäude im Projektgebiet in Frage eine Mikro-KWK-Anlage zu installieren. Die für die Anwendung von Mikro-KWK-Anlagen potenziell geeigneten Gebäude sind in Abbildung 7.76 dargestellt. Hierbei beruhen die Daten über die Anschlussmöglichkeit für Fernwärme aus dem Zensus 2011. Teilweise ist es möglich, dass die Fernwärmeleitungen ausgebaut wurden und mittlerweile weitere Gebäude im Anschlussgebiet liegen. Die Möglichkeit den Anschluss an ein Fernwärmenetz zu erhalten, ist im Einzelfall zu prüfen. Betrachtet man die im Projektgebiet vorliegende Gebäudebestandskarte liegen die Anwendungsmöglichkeiten für Mikro-KWK-Anlagen im äußeren Ring des Projektgebietes. Hierbei liegt das größte Potenzial im Norden/Nord-Osten sowie im Südwesten des Projektgebietes. In großen Teilen des Zentrums liegt eine Fernwärmeversorgung vor. Im Bereich des Hauptbahnhofs, der Em-scher bzw. des Rhein-Herne-Kanals liegt ein geringer Wohngebäudebestand vor, weshalb hier keine Einsatzmöglichkeit für Mikro-KWK-Anlagen besteht.

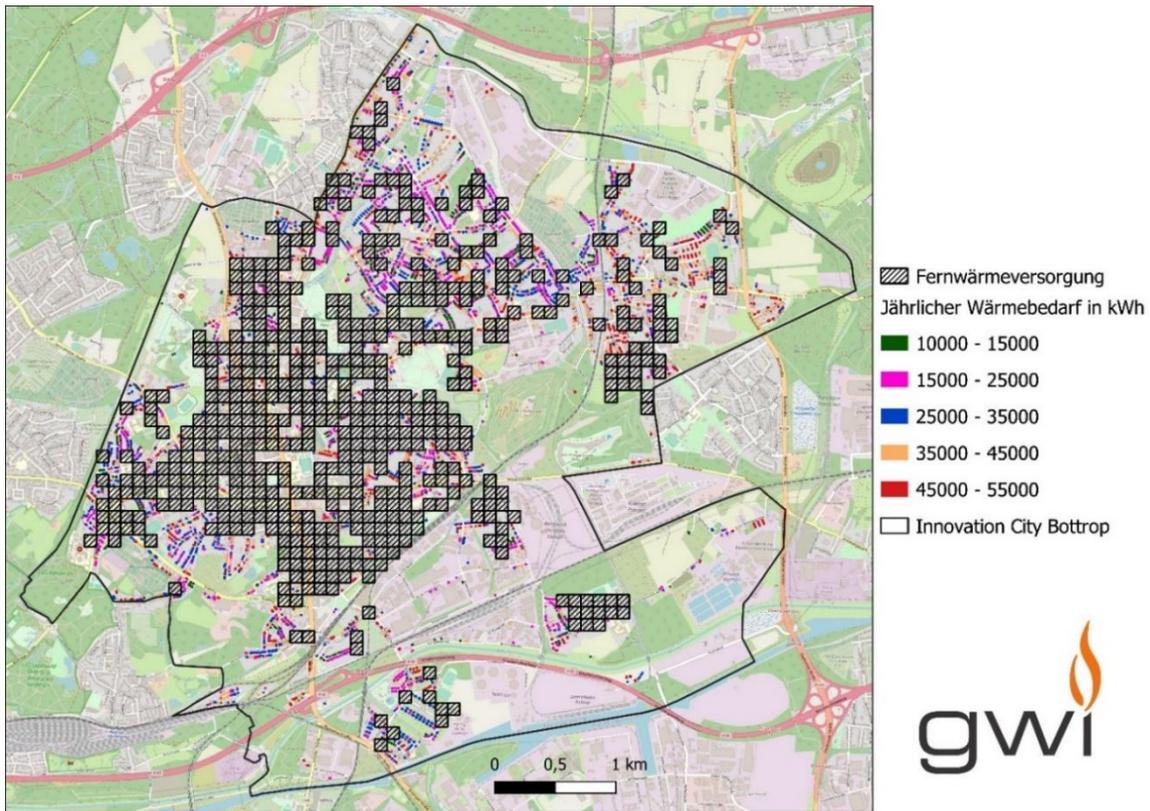


Abbildung 7.76: Gebäude im Projektgebiet der Innovation City Bottrop, welche für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen geeignet sind. [112]

Die GIS-basierte Auswertung ergibt, dass insgesamt 4.633 Gebäude grundsätzlich für Mikro-KWK-Anlagen geeignet erscheinen. Hiervon liegen 1.522 Objekte im Wärmebedarfsintervall 15.000 kWh/a -25.000 kWh/a. Die Anzahl von allen Gebäudeklassen ist in Tabelle 7.26 zusammengestellt.

Tabelle 7.26: Anzahl der Gebäude welche im aufgeführten Wärmebedarfsintervall liegen. [112]

Untere Grenzwert Wärmebedarf in kWh	Obere Grenzwert Wärmebedarf in kWh	Anzahl Gebäude im IC Gebiet
10.000	15.000	671
15.000	25.000	1.522
25.000	35.000	1.047
35.000	45.000	857
45.000	55.000	536
Summe		4.633
Summe 15.000 < Q < 45.000		3.426

Gleicht man die Gebäudedaten mit den Zensusdaten der Stadt Bottrop aus dem Jahr 2011 ab, können die bestimmten Gebäudeanzahlen als plausibel bewertet werden. Im gesamten Stadtgebiet wurden 23.126 Wohngebäude gelistet. [117] Somit ergibt sich für 14,81 % der Wohngebäude im ICM Projektgebiet ein Potenzial zur Versorgung durch Mikro-KWK-Systeme. Zur weiteren Potenzialanalyse werden den jeweiligen Gebäudeklassen eine KWK-Technologie zugeordnet. Hierbei wird der Gebäudeklasse 15.000-25.000 kWh/a eine ottomotorische KWK-Anlage der Leistungsklasse 1 kW zugeordnet. Den anderen beiden Leistungsklassen wird eine

stirlingmotorische KWK zugeordnet. Die Anzahl der jeweiligen Gebäudeklassen sowie der kumulierte Wärmebedarf der jeweiligen Gebäude, die nicht im Bereich einer Fernwärmeleitung liegen sind in Tabelle 7.27 zusammengefasst.

Tabelle 7.27: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme für das Innovation City Projektgebiet.

Gebäudeklasse th. Bedarf in MWh/a	15-25	25-35	35-45
Stromverbrauch in kWh/a	3.770	5.655	7.540
Anzahl Gebäude ohne FW	1.522	1.047	857
Heizungssysteme mit Substitutionspotenzial	628	431	353
Anzahl Altheizung Erdgas	391	268	220
Anzahl Altheizung Öl	226	155	127
Anzahl Altheizung Kohle	11	8	6
Kum. Wärmebedarf in MWh/a	12.560	12.930	14.120
KWK- Technologie	1 kW_el Otto	1 kW_el Stirling	
Batteriekapazität in kWh	1.256	862	706
Kum. E Erz KWK in MWh/a	2.909	1.466	1.526
Kum. E KWK EV in MWh/a	1.342	765	900
Kum. E Einspeisung in MWh/a	892	87	26
Kum. Batterie CH in MWh/a	675	614	601
Kum. Batterie DC in MWh/a	472	430	421
EVQ Obj in %	69%	94%	98%

Die Zuordnung ist so ausgelegt, dass die Verbrauchskennwerte zu der Stromkennzahl der jeweiligen KWK-Technologie passen. Für beiden Technologien wird ein 2 kWh Batteriespeicher angenommen. Aus den Felddaten werden für den jeweiligen Gebäudetyp, auf Grundlage der in Abschnitt 7.4 dargestellten Parameter, eine charakteristische Versorgung über Mikro-KWK sowie den energetischen Kenngrößen bestimmt.

Die oben beschriebenen Anteile zur Verteilung der bezogenen Energieträger wurden für das Heizungssystem aus Tabelle 7.25 genutzt, um die Anzahl an Heizungssystemen zu bestimmen, welche aufgrund ihres Alters oder dem Energieträger mit dem sie betrieben werden, bald ersetzt werden müssen. Da die Anteile aus dem mittleren deutschen Heizungsbestand stammen, liegt in der Übertragung auf andere Gebiete ein nicht zu quantifizierender Fehler vor. Grundsätzlich liegt der Anteil von Kohleheizungen in einer stark von Bergbau geprägten Region möglicherweise über dem deutschen Durchschnitt, allerdings ist das Durchschnittsalter der Heizungen in NRW auch niedriger, was auf einen höheren Anteil neuer Heizungen hindeutet. [114] Für die betrachteten Gebäude wurden jeweils für den vorliegenden Verbrauch typische Energieströme aus den Felddaten ermittelt. Hierbei wurde zur Bestimmung des Stromverbrauchs von einem Verhältnis von elektrischem zu thermischem Verbrauch von 18,85 % ausgegangen (s. Abschnitt 7.2.2). Die typischen Kennwerte der Gebäude wurden jeweils mit der Anzahl der Gebäude multipliziert, um das gesamte Potenzial zu bestimmen. Absolut zeigt sich, dass das größte Potenzial zur Substitution von Wärme in der Gebäudeklasse 35.000 – 45.000 kWh/a mit 14.120 MWh/a bzw. 353 Gebäuden mit Substitutionspotenzial liegt. In den darunter liegenden Gebäudeklassen liegt jeweils ein Wärme-Substitutionspotenzial von

12.930 MWh/a und 12.560 MWh/a vor. Hierbei wurden, wie in Abschnitt 7.4 beschrieben, Felddaten genutzt, um thermische Deckungsgrade der KWK-Anlagen sowie die erreichbaren EVQ von KWK-Anlage und Batterie zu bestimmen. Das jeweilige Verhältnis von KWK-Erzeugung und elektrischem Verbrauch wurde berücksichtigt. Insgesamt würde in den drei Gebäudeklasse eine von KWK-Systemen erzeugte Energiemenge von jeweils 2.909 MWh/a, 1.466 MWh/a sowie 1.526 MWh/a auftreten. Die resultierenden, aus den Batterien entladenen Energiemengen entsprechen 472 MWh/a, 430 MWh/a sowie 421 MWh/a. Insgesamt entspricht dies einer brutto Einsparung von 728 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten/a. Die entsprechende Primärenergie aus vermiedenem Netzbezug entspricht 2.381 MWh/a. Es ist zu berücksichtigen, dass die EVQ der Objekte auch ohne Batterie bei gleichbleibender Anlagenleistung mit dem thermischen Wärmebedarf steigt, da auch der elektrische Verbrauch der Objekte steigt. Die Intervallgrenzen wurden so gewählt, dass die EVQ bei stirlingmotorischen KWK-Anlagen der Leistungsklasse 1 kW elektrisch nahezu bei 100 % ist. Bei Gebäuden mit höheren thermischen Verbräuchen und entsprechend höherer KWK-Erzeugung würde der Einsatz von Batterietechnologien ökonomisch nicht mehr zielführend sein. Die systemischen Einsparungen an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten welche durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit einer 2 kWh Batterie im Projektgebiet der Innovation City zu erzielen sind, sind in Abbildung 7.77 dargestellt. So kann für 1.412 Gebäude im Mittel eine Einsparung von 33 % der Emissionen erzielt werden, die bei getrennter Erzeugung von Strom- und Wärme ausgestoßen würden. Absolut wäre so eine Einsparung von 5.912 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten/a möglich. Besonders hoch ist die potenzielle Einsparung durch die Substitution der mit Kohle und Öl betriebenen Heizungen. Weiterhin könnten die Einsparungen deutlich erhöht werden, wenn die Systeme um eine PV-Anlage erweitert werden würden. Die Möglichkeit hierzu ist im Einzelfall zu prüfen.

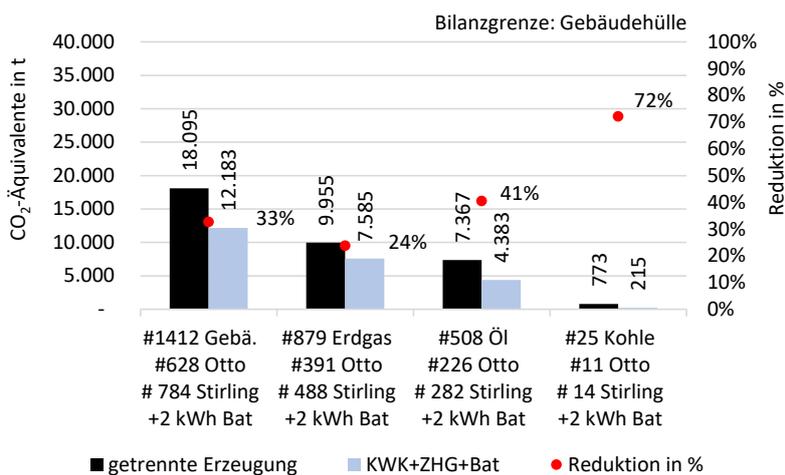


Abbildung 7.77: Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Projektgebiet der Innovation City erreichbar ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt.

Unter dem Gesichtspunkt der Primärenergieeinsparung könnte eine Einsparung von 22 % durch den Einsatz der Technologie erzielt werden. Dies entspricht einer Einsparung von

15.518 MWh/a. Die erzielbaren Einsparungen, welche durch die Substitution der angenommen ersetzbaren Altheizungen erreichbar sind, sind in Abbildung 7.78 dargestellt.

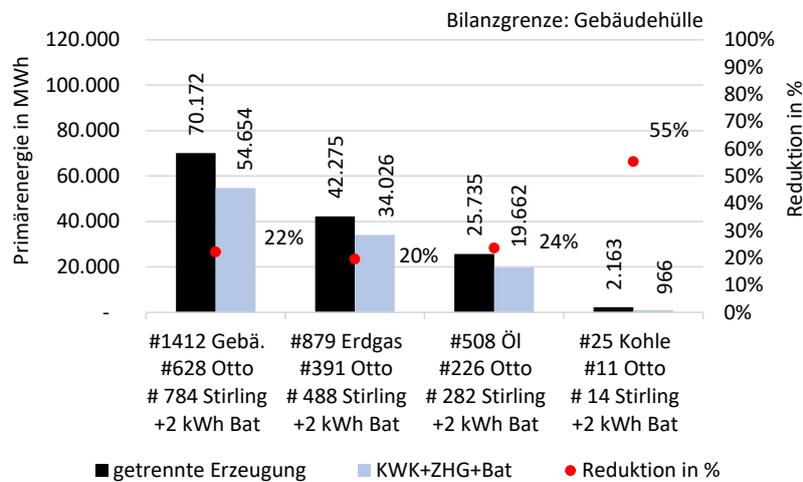


Abbildung 7.78: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro KWK-Anlagen im Projektgebiet der Innovation City erreichbar ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt

Überträgt man die dargestellte Methodik für das gesamte Stadtgebiet zeigen sich weitere Anwendungspotenziale im nördlichen Teil der Stadt Bottrop, da deutlich weniger Gebäude mit Fernwärme versorgt werden. Die gesamte Anzahl an Gebäuden der oben beschriebenen Wärmebedarfsklassen sind in Abbildung 7.79 dargestellt.

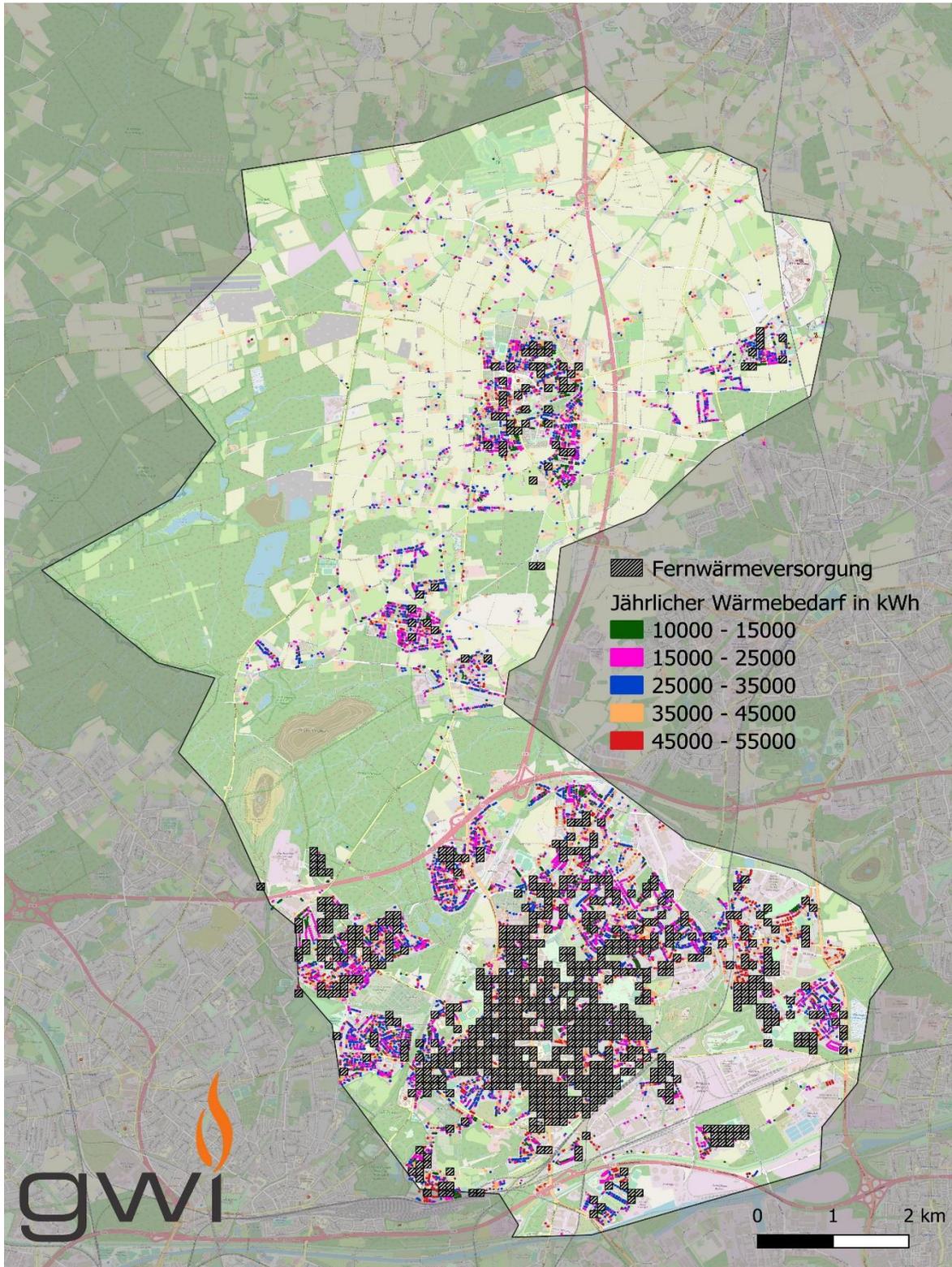


Abbildung 7.79: Gebäude im Gebiet der Stadt Bottrop, welche für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen geeignet sind [112]

Durch die Abfrage in GIS konnten insgesamt 9.234 Gebäude mit Mikro-KWK Potenzial bestimmt werden. Hier liegen 4.162 in der Wärmebedarfsklasse 15.000 – 25.000 kWh/a, 3.078 Gebäude in der Wärmebedarfsklasse 25.000 – 35.000 kWh /a sowie weitere 1.994 Gebäude in der Klasse 35.000 – 45.000 kWh/a. Die Anzahl an bestimmten Gebäudeklassen ist in Tabelle 7.28 zusammengefasst.

Tabelle 7.28: Anzahl der Gebäude, welche im Wärmebedarfsintervall im Stadtgebiet Bottrop liegen [112]

Untere Grenzwert Wärmebedarf in kWh	Obere Grenzwert Wärmebedarf in kWh	Anzahl Gebäude In der Stadt Bottrop
10.000	15.000	1.680
15.000	25.000	4.162
25.000	35.000	3.078
35.000	45.000	1.994
45.000	55.000	1.021
Summe		4.633
Summe 15.000 < Q < 45.000		3.426

Durch Übertragung des oben beschriebenen Heizungsmix werden so für gesamt Bottrop ein substituierbarer Wärmebedarf von 105.430 MWh/a in Wohngebäuden betrachtet, welcher 3.813 Gebäuden der beschriebenen Wärmebedarfsklassen entspricht. Durch die skalierte Umrüstung würden erhebliche Mengen an dezentralem KWK-Strom erzeugt, welche Auswirkungen auf das lokale Stromnetz hätten. Insgesamt würde eine jährliche Stromerzeugung durch Mikro-KWK-Anlagen von 15.844 MWh erreicht. Betrachtet man ausschließlich die Bilanzgrenze Batterie, würde ein vermiedener brutto Netzbezug von 3.542 MWh/a resultieren, welcher einer Reduktion an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten durch vermiedenen Netzbezug von 1.948 t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten/a sowie einer PEE von 6.376 MWh/a entspricht. Die Ergebnisse der Übertragung auf das gesamte Gebiet der Stadt Bottrop sind in Tabelle 7.29 zusammengestellt.

Tabelle 7.29: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme

Gebäudeklasse th. Bedarf in MWh/a	15-25	25-35	35-45
Stromverbrauch in kWh/a	3.770	5.655	7.540
Anzahl Gebäude ohne FW	4.162	3.078	1.994
Heizungssysteme mit Substitutionspotenzial	1719	1271	823
# Altheizung Erdgas	1069	790	512
# Altheizung Öl	618	457	296
# Altheizung Kohle	32	24	15
Kumulierter Wärmbedarf in MWh/a	34.380	38.130	32.920
KWK- Technologie	1 kW_el Otto	1 kW_el Stirling	
Batteriekapazität in kWh	3.438	2.542	1.646
Kum. E Erz KWK in MWh	7.963	4.323	3.558
Kum. E KWK EV in MWh	3.673	2.255	2.097
Kum. E Einspeisung in MWh	2.443	257	60
Kum. Batterie Beladung in MWh	1.847	1.811	1.401
Kum. Batterie Entladung in MWh	1.293	1.268	980
EVQ Obj in %	69	94	98

Betrachtet man die aus den dargestellten Energieströmen resultierenden CO<sub>2</sub>-Einsparungen für die gesamte Stadt Bottrop von 15.903 t/a, entfallen 6.327 t/a auf alte Erdgasheizungen, 7.955 t/a auf alte Ölheizungen sowie zu 1.561 t/a auf alte Kohleheizungen. Die absoluten Einsparungen der betrachteten Gebäude durch den Technologieverbund Mikro-KWK und Batteriespeicher sind in Abbildung 7.80 dargestellt.

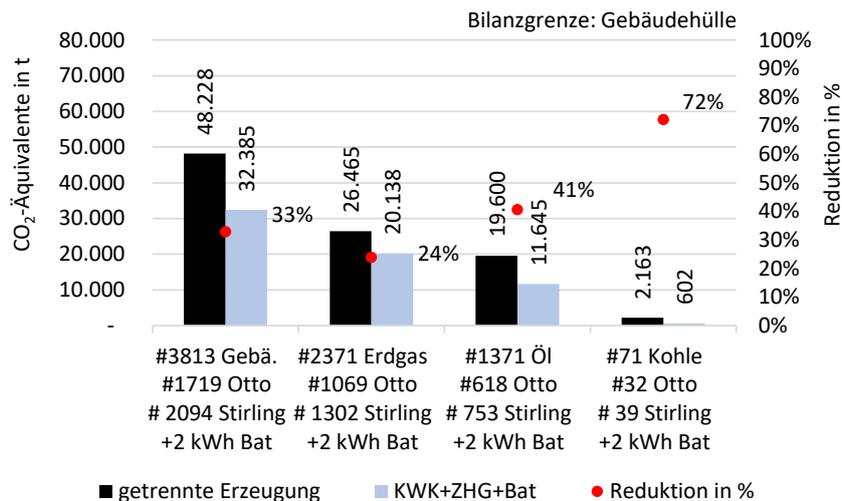


Abbildung 7.80: Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Stadtgebiet von Bottrop zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt.

Durch die Skalierung der Technologie wären entsprechend 41.504 MWh/a an PEE möglich. Hiervon würden 21.972 MWh/a auf substituierte Erdgasheizungen, 16.180 MWh/a auf alte Ölheizungen sowie 3.352 MWh/a auf alte Kohleheizungen entfallen. Die Ergebnisse der Übertragung sind Abbildung 7.81 dargestellt.

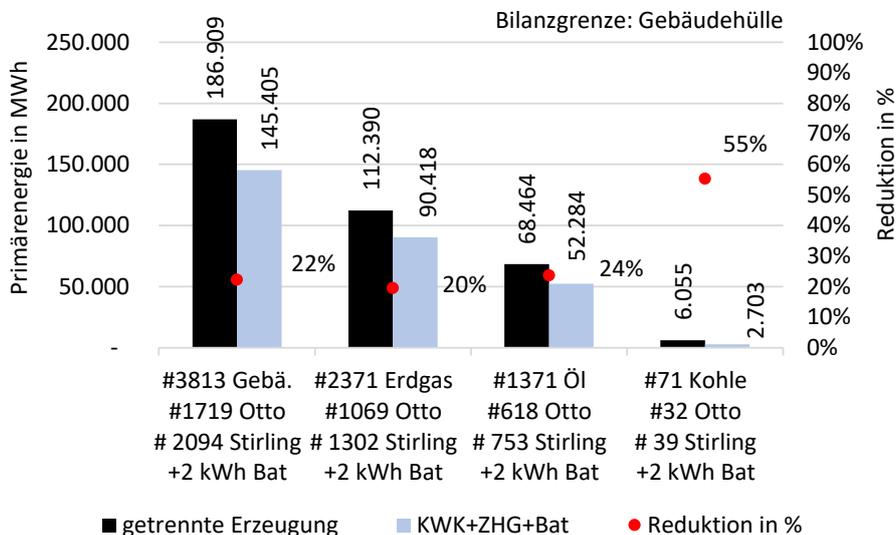


Abbildung 7.81: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Stadtgebiet von Bottrop zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt.

## 7.6 Übertragung der Ergebnisse auf weitere Strukturen/Gebiete

In diesem Abschnitt wird das Potenzial von Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeicher auf NRW und die gesamte Bundesrepublik übertragen. Die beschriebenen Potenziale und insbesondere installierte Anzahl von KWK-Anlagen und Batteriespeichern sind als Potenzialbewertung einzustufen und verdeutlichen, wo ein Einsatz der Technologiekombination

theoretisch möglich ist. Die Anzahl der theoretisch installierbaren Anlagen übersteigt die Anzahl der aktuell installierten KWK-Anlagen und Batteriespeicher bei Weitem (ca. Faktor 13 der aktuell installierten Nutzkapazität von Batteriespeichern in Deutschland). Welche Mengen dieses Potenzials gehoben werden, ist eher eine Frage des Energiesystems, welche in diesem Bericht nicht quantifiziert wird. Der breitflächige Ausbau von Batteriespeichern in Kombination mit KWK-Anlagen wird explizit nur empfohlen, wenn weitere wirtschaftliche, technologische und regulatorische Fortschritte erreicht werden, die es ermöglichen KWK-Anlagen als auch Batterien netzdienlich zu betreiben und nur in dem Maße ausgebaut werden, wie sie den Ausbau und Integration erneuerbarer Energien dienlich sind. Dies schließt die Kombination mit PV-Anlagen ein. Ob die errechneten Batteriespeicherkapazitäten ausschließlich als dezentrale Heimspeicher installiert werden, ist als unwahrscheinlich zu betrachten. Als sehr wahrscheinlich ist jedoch die Verfügbarkeit von dezentralen Speichern durch E-Mobilität zu betrachten. Die durchschnittliche Batteriekapazität liegt hierbei deutlich über der von klassischen Heimspeichern. Der grundlegende Ansatz die deutsche Energiewende auch in hohem Maße dezentral zu vollziehen, wird weiterhin diskutiert. Der lastnahe Zubau von dezentralen Erzeugungstechnologien ist den Netzausbaukosten gegenüber zu stellen und kann nicht grundsätzlich mit der Lösungsfindung in ausschließlichen Errichtung von zentralen Kraftwerken/Fernwärme beantwortet werden. [118] Weiterhin ist die Bereitschaft der Gebäudebesitzer zu Investitionen in dezentrale Versorgungssysteme entscheidend. Der Fokus sollte unter dem Aspekt der CO<sub>2</sub>-Reduktion auf dem Ausbau dezentraler erneuerbarer Erzeugungsanlagen liegen. Welche Rolle Mikro-KWK-Anlagen in dem Energiesystem der Zukunft spielen, kann hier nicht abschließend geklärt werden. Jedoch kann dargestellt werden, welche Werte im gegebenen Gebäudebestand theoretisch möglich sind. Unter diesen Einschränkungen sind die folgenden Ergebnisse zu sehen. Weiterhin ist die Dekarbonisierung des eingesetzten Brennstoffs zu fokussieren. Dies kann über den Einsatz von Biomethan gelingen. Die Biomethanpotenziale für gasbetriebene Technologien werden jedoch nicht ausreichen, um alle Sektoren mit ausreichend Methan zu versorgen bzw. unterschiedliche Sektoren konkurrieren bereits jetzt um das knappe Gut. Weitere Möglichkeiten zur Dekarbonisierung des eingesetzten Brennstoffes, wie der Einsatz von CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff oder Methan werden zum Abschluss dieses Abschnittes diskutiert.

Für die Potenzialbestimmung des Landes, können weiterhin die Gebäudedaten des Raumwärmemodell des LANUV genutzt werden. Hierzu wird die Methodik für die Auswertung der Stadt Bottrop, dargestellt in Abschnitt 7.5, genutzt. Die kumulierten Wärmemenge aller Objekte in 1km<sup>2</sup> Rastern für Gebäude der Wärmebedarfsklasse 15.000 kWh/a – 45.000 kWh/a sind in Abbildung 7.82 dargestellt. Insgesamt konnten so 2.172.416 Gebäude identifiziert werden. Hiervon 1.102.740 Gebäude der Wärmebedarfsklasse 15.000 kWh/a – 25.000 kWh/a, 677.635 Gebäude der Wärmebedarfsklasse 25.000 kWh/a – 35.000 kWh/a und 392.041 Gebäude der Klasse 35.000 kWh/a – 45.000 kWh/a,

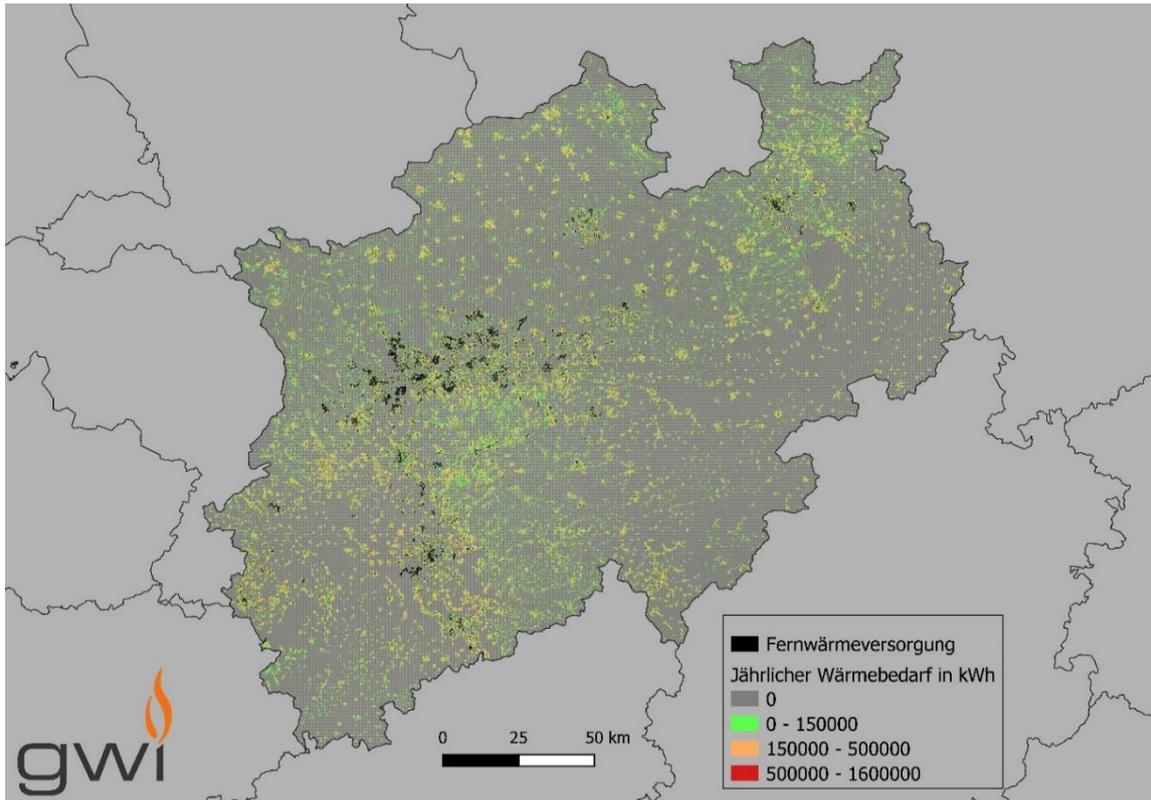


Abbildung 7.82: Kumulierter Wärmebedarf in 1 km<sup>2</sup>-Raster für Wohngebäude der Wärmebedarfsklasse 15.000 – 45.000 kWh/a sowie mit Fernwärme versorgte Gebiet im Bundesland NRW.

Die in Tabelle 7.25 dargestellte approximierte Verteilung der Heizungssysteme erlaubt aus der Anzahl der Gebäudeklassen die resultierenden Energieströme beim Einsatz von KWK-Systemen in Kombination mit Batteriespeichern zu ermitteln. Die berechneten Substitutionspotenziale sind in Tabelle 7.30 zusammengestellt.

Tabelle 7.30: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme für die Bilanzgrenze NRW.

Gebäudeklasse th. Bedarf in MWh/a	15-25	25-35	35-45
Stromverbrauch in kWh/a	3.770	5.655	7.540
Anzahl Gebäude ohne FW	1.102.740	677.635	392.041
Heizungssysteme mit Substitutionspotenzial	455.883	280.140	162.072
# Altheizung Erdgas	283.300	174.088	100.717
# Altheizung Öl	163.938	100.740	58.282
# Altheizung Kohle	8.645	5.312	3.073
Kumulierter Wärmebedarf in GWh/a	9.118	8.404	6.483
KWK- Technologie	1 kW_el Otto	1 kW_el Stirling	
Batteriekapazität in MWh	912	560	324
Kum. E Erz KWK in GWh/a	2.112	953	5.393
Kum. E KWK EV in GWh/a	974	497	3.178
Kum. E Einspeisung in GWh/a	648	57	91
Kum. Batterie Beladung in GWh/a	490	399	2.123
Kum. Batterie Entladung in GWh/a	343	279	1.486
EVQ Obj in %	69	94	98

Insgesamt konnten, basierend auf aktuellen Heizungsverteilung, 898.095 Gebäude als Einsatzpotenzial für die Technologiekombination identifiziert werden. Der kumulierte Wärmebedarf der identifizierten Gebäude beträgt 24.005 GWh/a. Bei der Umstellung der Heizungssysteme würde insgesamt eine Stromerzeugung von 3.765 GWh/a auftreten. Hiervon würden jährlich 1.884 GWh/a direkt in den Gebäuden genutzt, 715 GWh/a ins Netz eingespeist und 1.165 GWh/a in den verbauten Batterien zwischengespeichert werden. Bezieht man dies auf die in allen Gebäuden des Raumwärmemodells erfassten Wärmebedarfe, liegt der Anteil des betrachteten Wärmebedarfs bei ca. 11 %. Durch die Umstellung der eingegrenzten Heizungssysteme könnte eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Äquivalente um 3.655 kt/a erreicht werden, wovon 1.465 kt/a auf die Umstellung von alten Gasheizungen zurückzuführen ist. 1.826 kt/a auf die Umstellung von Ölheizungen sowie 363 kt/a auf die Umstellung von Kohleheizungen. Die CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial sind in Abbildung 7.83 dargestellt.

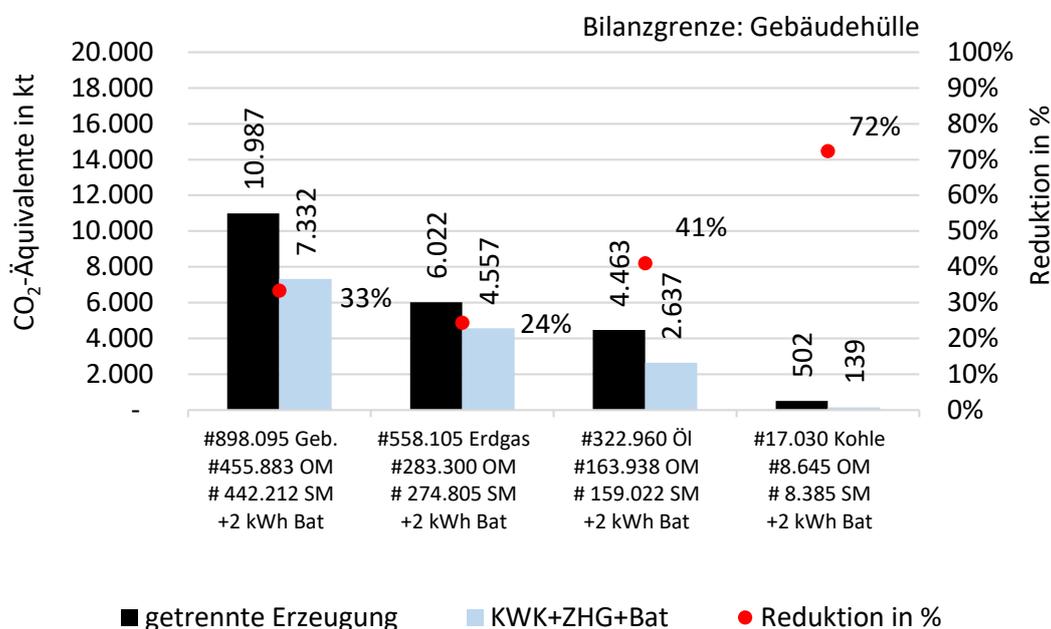


Abbildung 7.83: Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern in NRW zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt.

Weiterhin sind die erzielbaren Einsparungen an Primärenergie in Abbildung 7.84 dargestellt.

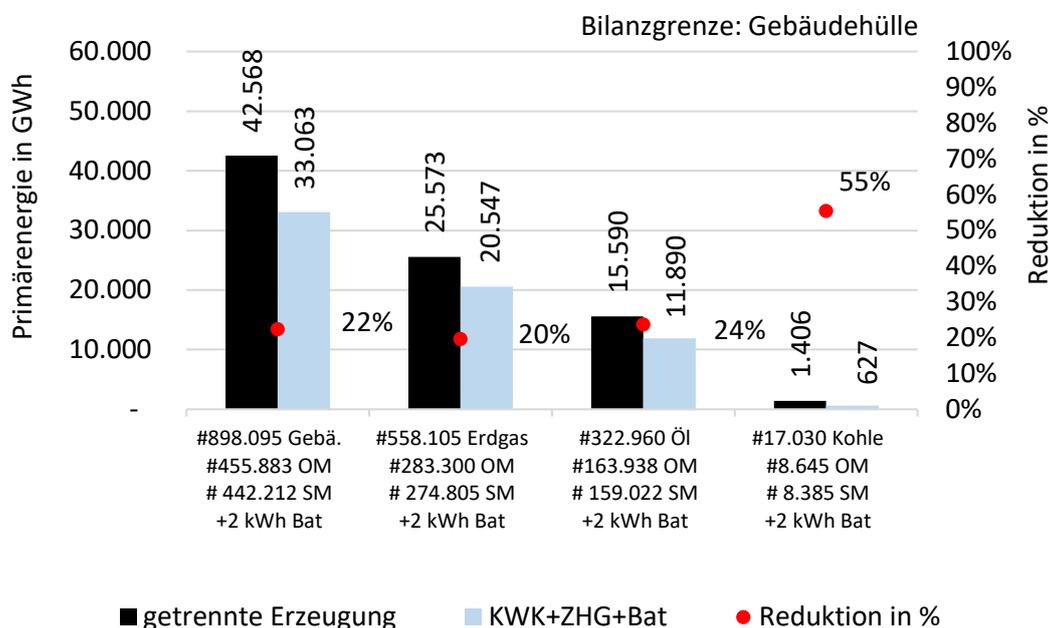


Abbildung 7.84: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern in NRW zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt.

Da das für NRW vorhanden gebäudescharfe Raumwärmemodell vom LANUV nicht für das Bundesgebiet genutzt werden kann, werden die für Mikro-KWK geeigneten Gebäude bilanziell ermittelt. Hierzu wird in einem ersten Schritt der Gebäudebestand im Bundesgebiet charakterisiert. Aus der gesamten Anzahl an Gebäuden und betrachteten Wohnflächen werden, wie in Abschnitt 7.5, die für Mikro-KWK nutzbaren Gebäude extrahiert und in die Wärmeverbrauchs-kategorie eingeteilt. Es werden Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH/ZFH) sowie kleine und mittlere Mehrfamilienhäuser (K/M MFH) in Betracht gezogen. Betrachtet man die Anzahl an Gebäuden in der BRD, sind EFH und ZFH mit 15,1 Millionen, die am häufigsten vertretene Gebäudeklasse. Diese Zahl schließt Wohngebäude mit Mischnutzung ein. Kleine und mittlere Mehrfamilienhäuser zählen 6,8 Millionen im Gebäudebestand. Sowie 0,2 Millionen große Mehrfamilienhäuser und 3 Millionen für Büro und Gewerbe genutzte Gebäude. [119] Um aus der Anzahl der Gebäuden die benötigte thermische Energie zu bestimmen, werden weiterhin die zugehörige Nutzflächennutzung der beschriebenen Gebäudeklassen betrachtet. Hierbei nehmen EFH/ZFH 2280 m<sup>2</sup> ein, K/M MFH 2.682 m<sup>2</sup>, G MFH 381 m<sup>2</sup> sowie Büro und Gewerbe 1582 m<sup>2</sup>. Die beschriebenen Verhältnisse sind in Abbildung 7.85 dargestellt.

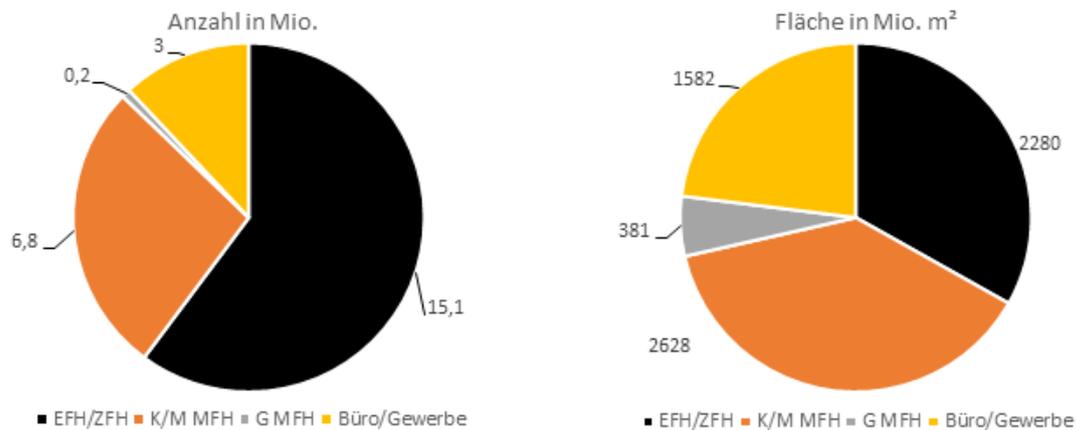


Abbildung 7.85: Gebäudebestand in Deutschland: Anzahl an Gebäuden nach Gebäudetyp sowie zugehörige Fläche. [119]

Für die folgenden Auswertungen werden die beiden Gebäudeklassen EFZ/ZFH sowie K/M MFH als Anwendungspotenzial betrachtet und schärfer aufgelöst. Grundsätzlich eignen sich auch G MFH und für Büro/Gewerbe genutzt Gebäude für den Einsatz von KWK-Anlagen, werden im Rahmen dieses Berichts allerdings nicht betrachtet. Für eine tiefere Analyse der ausgeschlossenen Gebäudeklassen über Nahwärme sei auf [120] verwiesen. Um die Gebäude einzugrenzen, welche für Mikro-KWK-Anlagen in Frage kommen, werden die Gebäudeklassen differenziert nach dem Baujahr betrachtet, dargestellt in Tabelle 7.31. Für Mikro-KWK-Anlagen eignen sich besonders ältere unsanierte Gebäude mit niedrigem Dämmstandard und hohe Wärmebedarf. Ob die Investition in eine Dämmung und ein an anderes Heizungssystem günstiger/ökologischer ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

Zur Ableitung des Wärmebedarfs der betrachteten Gebäude wird für jede Gebäudeklasse eine mittlere beheizte Fläche nach [119] angenommen. Die angenommenen mittleren Flächen sowie die resultierenden gesamten Wärmeverbräuche je Gebäude sind in Tabelle 7.31 dargestellt.

Tabelle 7.31: Wärmebedarf unterschiedlicher Gebäudeklassen, welcher aus den spezifischen Wärmebedarf (inkl. TWW) und der mittleren Gebäudefläche berechnet wurden. [112] [119]

Baujahr	Gebäudeklasse				
	EFH	RH	K MFH	M MFH	G MFH
Mit. beheizte Fläche in m <sup>2</sup>	150,7	150,7	273	576	1801,6
< 1918	30.441	25.920	41.223	86.976	241.414
1919-1948	24.112	21.701	43.680	92.160	248.621
1949-1957	27.729	21.550	48.048	101.376	261.232
1958-1968	21.399	17.933	38.220	80.640	254.026
1969-1978	23.359	20.797	33.852	71.424	223.398
1979-1983	17.481	15.824	29.757	62.784	185.565
1984-1994	17.331	14.015	28.938	61.056	149.533
1995-2001	15.673	14.166	27.846	58.752	142.326
> 2002	11.755	11.604	19.656	41.472	106.294

Für die Potenzialanalyse des Bundesgebietes werden konsistent zur Methodik in Abschnitt 7.5 Gebäude mit einem Wärmebedarf zwischen 15.000 kWh/a und 45.000 kWh/a betrachtet. Ob Gebäude im Einzelfall trotzdem ungeeignet sind, z.B. aufgrund von deutlich geringerem Wärmebedarf als angenommen, kann für den auf die Bundesrepublik bezogenen Datensatz nicht

bewertet werden. Besonders bei K MFH und liegt ein hohes Potenzial aufgrund des hohen Anteils von Gebäude mit einem Baujahr vor 1979 vor. Weiterhin werden Gebäude ausgeschlossen, die saniert wurden und deren Wärmebedarf nach der Sanierung soweit reduziert wurde, dass der Einsatz von motorischer KWK nicht mehr sinnvoll ist. Die Sanierungsrate für Gebäude die vor 1994 errichtet wurden wird mit 1 %/a angenommen. [104] Die entsprechende Anzahl an Gebäudeklasse ist in Tabelle 7.32 zusammengestellt.

Tabelle 7.32: Gebäudeanzahl nach Gebäudetyp und Baujahr abzüglich einer Sanierungsrate von 1%/a. [119]

Baujahr	Gebäudeklasse				
	EFH	RH	KMH	MMH	GMH
< 1918	1.212.435	439.136	334.171	89.107	24.996
1919-1948	1.006.806	566.630	261.945	70.132	6.373
1949-1957	823.873	382.021	245.004	139.480	16.688
1958-1968	1.444.044	542.814	378.367	158.000	33.488
1969-1978	1.358.432	533.437	230.117	82.768	42.629
1979-1983	618.758	286.596	85.670	49.225	14.525
1984-1994	1.214.963	621.307	205.746	106.538	28.424
1995-2001	1.020.470	568.233	153.628	69.329	18.995
2002-2009	783.451	371.266	62.296	24.237	7.483
< 2010	101.974	38.231	8.129	3.588	1.321
Sum Gesamt	9.585.205	4.349.670	1.965.073	792.404	194.922
Sum 15 < Q < 45 MWh/a	8.699.780	2.750.634	1.965.073	27.825	-
Anteil in %	91	63	100	4	0

Bezogen auf die Gebäudeklasse gibt es für die jeweiligen Klassen folgende kumulierte Energieverbräuche, die durch substituierte KWK-Systeme bereitgestellt werden könnten. Der Wärmebedarf in der Gebäudeklasse EFH liegt bei 203.737 GWh/a, hiervon könnte umgelegt auf die bezogenen auf die Wärmemenge 194.528 GWh/a durch Mikro-KWK-Systeme bereitgestellt werden. Das Substitutionspotenzial der Gebäudeklasse RH ist mit 52.272 GWh/a zu beziffern. K MFH weisen ein Wärme Substitutionspotenzial von 73.246 GWh/a auf. Das Substitutionspotenzial aller Gebäudeklasse ist in Tabelle 7.33 zusammengestellt.

Tabelle 7.33: Kumulierte Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Deutschland, welche im Wärmebedarfsintervall 15.000 kWh – 45.000 kWh liegen und deren aktuelles Heizungssystem zur Substitution durch ein Mikro-KWK-System in Kombination mit einer Batterie geeignet sind.

	Kum. Wärmebedarf in GWh/a inkl. TWW für Gebäudeklasse			
	EFH	RH	K MFH	M MFH
Mit. beheizte Fläche in m <sup>2</sup>	150,7	150,7	273	576
< 1918	36.908	11.383	13.776	7.750
1919-1948	24.276	12.296	11.442	6.463
1949-1957	22.845	8.233	11.772	14.140
1958-1968	30.902	9.734	14.461	12.741
1969-1978	31.731	11.094	7.790	5.912
1979-1983	10.817	4.535	2.549	3.091
1984-1994	21.056	8.708	5.954	6.505
1995-2001	15.994	8.049	4.278	4.073
> 2002	9.209	4.308	1.224	1.005
Sum Wärmebedarf in GWh/a	203.737	78.340	73.246	61.680
Sum (15 < Q < 45 MWh/a) in GWh/a	194.528	57.275	73.246	1.005

Durch die Übertragung des Technologiekombination würde eine jährliche dezentrale KWK-Stromerzeugung von 27.130 GWh/a resultieren. Die für die betrachtete Wärmesubstitution durch die KWK-Systeme (KWK und ZHG) würde jährlich 134 TWh/a betragen. Hierbei handelt es sich um ca. 17,4 % des gesamten Deutschen Raumwärmebedarfs im Gebäudebestand. [121] Weiterhin würde in dem Szenario für ganz Deutschland 27,13 GWh dezentrale Strom aus Mikro-KWK-Anlagen erzeugt werden. Die absoluten Energieflüsse des Substitutions Szenarios sind in Tabelle 7.34 dargestellt.

Tabelle 7.34: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme, welche potentiell bei großflächigem Einsatz möglich sind.

Gebäudeklasse th. Bedarf in MWh/a	15-25	25-35	35-45
Stromverbrauch in kWh/a	3.770	5.655	7.540
Anzahl Gebäude ohne FW	9.037.266	3.150.604	1.243.724
Heizungssysteme mit Substitutionspotenzial	3.736.095	1.302.490	1.247.312
# Altheizung Erdgas	2.321.727	809.409	319.520
# Altheizung Öl	1.343.519	468.382	184.897
# Altheizung Kohle	70.849	24.699	9.750
Kumulierter Wärmebedarf in MWh/a	74.722	39.075	20.567
KWK- Technologie	1 kW_el Otto	1 kW_el Stirling	
Batteriekapazität in MWh	7.472	2.605	2.495
Kum. E Erz KWK in GWh	17.308	4.430	5.393
Kum. E KWK EV in GWh	7.983	2.311	3.178
Kum. E Einspeisung in GWh	5.310	263	91
Kum. Batterie Beladung in GWh	4.015	1.856	2.123
Kum. Batterie Entladung in GWh	2.811	1.299	1.486
EVQ Obj in %	69	94	98

Die durch den großflächigen Einsatz von Mikro KWK-Anlagen würden zu einer Einsparung an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten von 21.208 kt/a führen. Bei den betrachteten Altheizungen handelt es sich um besonders CO<sub>2</sub>-intensive Altheizungen bzw. Gebäude mit niedrigem Dämmstandard. Das gesamte Einsparpotenzial sowie die der nach Energieträger aufgegliederten Altheizungen sind in Abbildung 7.86 dargestellt.

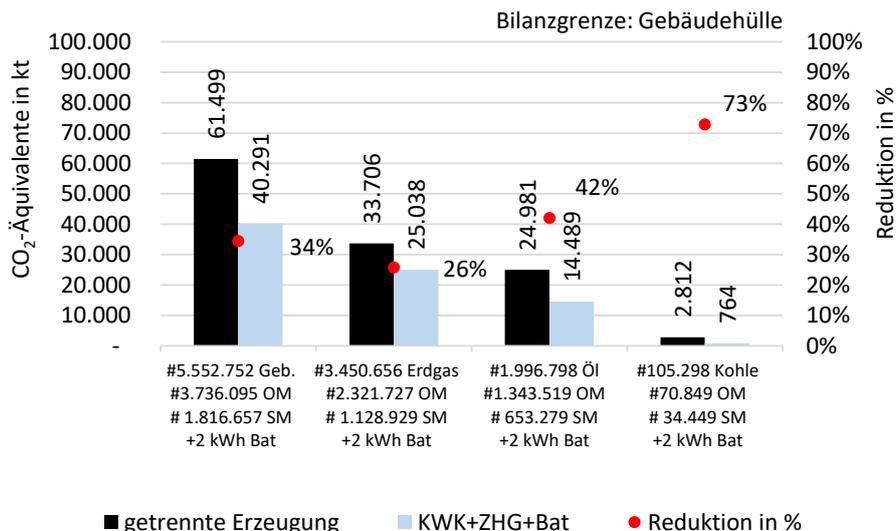


Abbildung 7.86: Einsparpotenzial an CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Bundesgebiet zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt.

Die entsprechenden Einsparpotenziale an Primärenergie der beschriebenen großflächigen Umstellung an Heizungssystemen sind Abbildung 7.87.

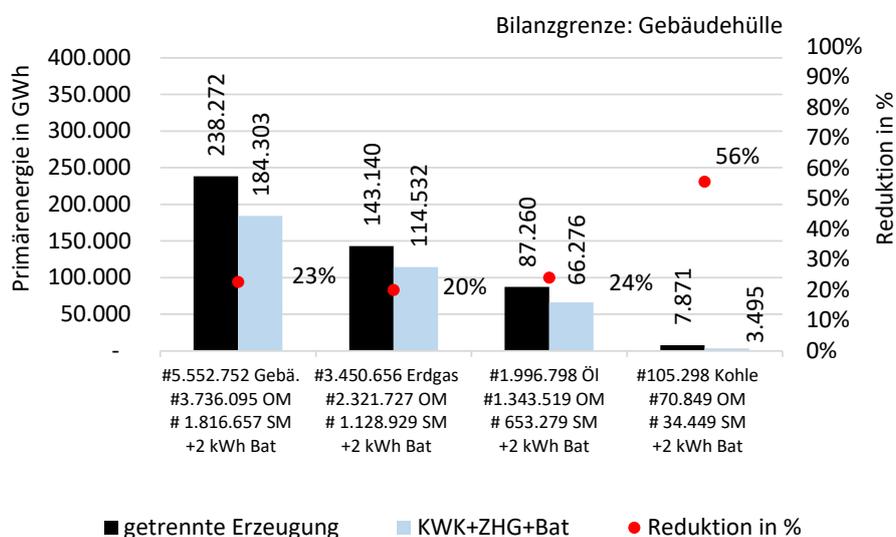


Abbildung 7.87: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Bundesgebiet zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt.

## 8. Kommunikation in der Innovation-City Ruhr | Modellstadt Bottrop

Neben den theoretischen Betrachtungen der Potenziale der KWK-Technologie in Deutschland fließen die Erkenntnisse aus dem Projekt direkt in die Beratungspraxis der ICM ein. Die ICM unterhält mit dem Zentrum für Information und Beratung (ZIB) ein Beratungsbüro, das in Bottrop die zentrale Anlaufstelle für alle BürgerInnen und GebäudeeigentümerInnen darstellt, die energetische Modernisierungsmaßnahmen durchführen möchten. Seit Ende des Jahres 2011 waren mehr als 18.916 BürgerInnen bei 654 Veranstaltungen der ICM und 170 Gruppen besuchten das ZIB, in welchem seitdem mehr als 4.030 Energie-Erst-Beratungen durchgeführt wurden (Stand: Januar 2021). Im Zuge jeder Energieberatung wurde auf das Thema KWK hingewiesen, um die Technologie bekannt zu machen und ggfs. das Interesse bei den Ratsuchenden zu wecken.

### Themenabende

Besonders erfolgreich sind die Themenabende im ZIB, bei denen von wechselnden ReferentInnen unterschiedliche Themen neutral und herstellerübergreifend dargestellt werden. In der zweiten Hälfte dieses Veranstaltungsformats sind i.d.R. Partner der ICM eingeladen und Unternehmensvertreter aus den Bereichen TGA, Handwerk, Architektur und Energieberatung willkommen, um konkrete Angebote und Beratungsleistungen anzubieten, um sinnvolle Maßnahmen, wie den Heizungstausch und weitere Modernisierungsmaßnahmen, umzusetzen. Diese Themenabende wurden durch Treffen von ProjektteilnehmerInnen ergänzt, die die Möglichkeit zum Austausch nutzen können und die Erfahrungen aus Anwendersicht einbringen konnten. Seit Januar 2019 wurde der Themenabend um ein äquivalentes Onlineformat ergänzt. Zusätzlich wurde in den Städten, in denen die ICM das Sanierungsmanagement seit 2018 verantwortet, im Rahmen mehrere Bürgerveranstaltungen (Präsenzveranstaltung und Online) das Thema KWK plus Speicher vorgestellt. Dies hat sich insbesondere seit Beginn der Corona-Pandemie im März 2020 als sehr zielführend herausgestellt.

### Netzwerkarbeit

Darüber hinaus erfolgte ein Ergebnistransfer in die Partnernetzwerke der InnovationCity Ruhr | Modellstadt Bottrop. Hier sind insbesondere der sogenannte Projektstisch sowie die Beiräte zu nennen, welche die Projekte der InnovationCity Ruhr | Modellstadt Bottrop aus unterschiedlicher Perspektive begleiten. Im Wissenschaftsbeirat sind rund 20 Institute und Universitäten sowie Fachhochschulen aus der Region. Im Industriebeirat tagen die Vertreter der Unternehmenspartner der ICM. Den Kern bilden die Mitglieder des Initiativkreises Ruhr, welche durch die direkten Partner der ICM ergänzt werden. Im Rahmen der regelmäßigen Sitzungen diskutieren die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gemeinsam mit der ICM, dem Projektkoordinator GWI und Vertretern des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen den Projektfortschritt. Über Vorträge bei Industrie-

und Handwerkskammern wurde der Erkenntnis- und Erfahrungsgewinn weitergegeben werden. Im Zuge von weiteren Präsentationen bei Kommunen, der Wohnungswirtschaft, den Energieversorgern und bei Fachkongressen wurde deutschlandweit auf das Projekt hingewiesen, um die Bekanntheit zu steigern. Flankiert wurde das Projekt insbesondere durch entsprechende Presseinformationen und die Aufbereitung von Umsetzungsbeispielen als „Best-Practice“ mit dem Ziel einer erhöhten Wahrnehmung und der Steigerung des Interesses am Thema Energieeffizienz/KWK/Speicher. Die Ergebnisse aus dem Projekt „KWK plus Speicher“ werden somit in die relevanten Wertschöpfungsketten rund um die Modernisierung von Gebäuden und den Einsatz von innovativen und CO<sub>2</sub>-sparenden Technologien transferiert und damit bestmöglich genutzt. Diese Netzwerke und Strukturen werden auch im aktuellen Projekt regelmäßig zur Kommunikation genutzt.

### **ICM Newsletter**

Seit März 2018 wurden regelmäßig Beiträge über das Projekt „KWK plus Speicher“ im Newsletter der ICM veröffentlicht. Dieser Newsletter erscheint quartalsweise und erreicht zahlreiche Industrie- und Wirtschaftspartner der ICM.

### **Presse-/ Öffentlichkeitsarbeit**

Im Mai 2018 wurde eine Mitmacher-Familie in Bottrop im Rahmen einer Nutzungsvereinbarungsunterzeichnung besucht. Gemeinsam mit dem GWI führte die ICM ein kurzes Interview mit Fotobegleitung über die Motive und Anreize zur Projektteilnahme. Eine entsprechende Pressemitteilung ging im Juni 2018 an die lokalen und regionalen Medien und wurde bis Oktober 2018 u. a. in der WAZ Bottrop, dem Stadtspiegel, der Recklinghäuser Zeitung, in der Zeitschrift Energie und Management und dem Topmagazin Ruhr veröffentlicht.

Am 13.12.2018 wurde der erste Batteriespeicher im Rahmen eines Pressetermins, begleitet durch den Oberbürgermeister der Stadt Bottrop, dem Vorstand des GWI, der ICM Geschäftsführung und Vertretern der Energieagentur NRW, eingeweiht. Dazu lud die ICM lokale Presse ein, wovon auch zwei Vertreter kamen. Im Vorfeld wurde in Zusammenarbeit des GWI, der ICM sowie der Energieagentur, eine Pressemitteilung mit den Eckdaten des Projekts erstellt. Im Nachgang wurden einige Pressemitteilungen veröffentlicht. Bis März 2019 fand das Presseevent noch Berücksichtigung in zahlreichen lokalen und überregionalen Publikationen. So berichtete auch die Energieagentur NRW in der Januarausgabe ihres Magazins über die Kombination von KWK und Speicher genauso wie die Märzausgabe des IVV-Magazins.

### **Erfahrungs-/ Anwenderberichten „Homestories“**

Bei insgesamt drei Bottroper-Familien begleitete die ICM die Installation von zusätzlichen Speichern als Ergänzung der bestehenden KWK-Anlage. Ziel war die Erstellung von „Homestories“ mit verschiedenen Schwerpunkten, wie die effizientere Nutzung der durch die KWK-Anlage bereit gestellte Energie, die altersgerechte Sanierung und die Kombination von Solarenergie und KWK-Anlage. Neben den entsprechenden Anwenderberichten wurden in diesem

Zusammenhang auch Fotoreportagen erstellt. Mit den Homestories sollten speziell Fachmagazine angesprochen werden. Außerdem standen die Berichte für die Nutzung auf der KWK-Homepage zur Verfügung. Im Oktober 2019 erschien in der Fachzeitschrift Bauidee eine „Homestory“. Der Artikel erklärte verständlich die Potenziale der Kraft-Wärme-Kopplung in Verbindung mit Speichertechnologien. „Die Bauidee richtet sich an Käufer und Besitzer älterer Häuser sowie an Bauherren von Einfamilienhäusern“ ([www.bauidee.de](http://www.bauidee.de)).

### **Designetz**

Im Dezember 2019 wurde am Eingang zum Zentrum für Information und Beratung (ZIB) gegenüber vom Hauptbahnhof Bottrop die DESIGNETZ-Stelle im Rahmen eines Pressetermins im Beisein von Bottrops Oberbürgermeister, der ICM Geschäftsführung sowie den Projektleitern in Betrieb genommen. Sie ist eine von insgesamt 16 geplanten oder bereits aufgestellten Haltestellen, im SINTEG Projekt DESIGNETZ, entlang der „Route der Energie“, die durch Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und das Saarland führt. Die drei Bundesländer bilden in ihrer Kombination aus urbanen und ländlichen Strukturen eine ideale Modellregion zur Entwicklung eines zukunftsfähigen Energiesystems. Mit Hilfe der interaktiven Stelen will innogy SE gemeinsam mit den 46 Projektpartnern die Bausteine für eine Energiewende erlebbar machen und die Nutzer der Stelen-App über die Ziele von DESIGNETZ informieren. Bottrop trug mit der Energiewabe InnovationCity zum Energiesystem von morgen bei: Einige Strom produzierende Heizungen (Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) aus dem Forschungsprojekt „100 Mikro-KWK-Anlagen“ sollten dabei helfen, das Stromverteilnetz auf unterster Ebene zu stabilisieren.

### **Internetseite**

Der Betrieb und die Pflege der Projekt-Website [www.100kwk.de](http://www.100kwk.de) wurde Ende Juni 2020 vom GWI an die ICM übertragen. Damit verbunden war auch eine Überprüfung des Content-Management-Systems, des Designs und der Inhalte sowie Planungen von Inhalten und ggf. Aufbereitung von Ergebnissen für die zukünftige Nutzung der Internetpräsenz.

### **Abschlussveranstaltung – Wir sagen Danke**

Für die zweite Jahreshälfte 2020 sollte eine Abschlussveranstaltung für die ProjektteilnehmerInnen stattfinden. Unter dem Motto „Wir sagen danke“ plante die ICM, die ProjektteilnehmerInnen im Zuge einer Exkursion an die Arbeitsstätten der ProjektpartnerInnen einzuladen, um vor Ort die Forschungsergebnisse vorzustellen. Im Zuge dessen sollte auch ein Hausbesuch bei einem Projektteilnehmer auf dem Programm stehen. Durch die Corona-Pandemie und die damit verbundenen Kontaktbeschränkungen seit Mitte Februar 2020, konnten diese Vorhaben nicht umgesetzt werden.

Ausschnitte zu Pressemitteilungen befinden sich in Anhang 14 bis Anhang 17.

## 9. Projektmanagement und Wissenstransfer

Das Projektmanagement stellt die Einhaltung des Zeitplans sowie das Erreichen der definierten Ziele sicher. Im Rahmen der Projektkoordinierung werden Schnittstellen abgestimmt, so dass möglichst viele Synergien zwischen den Projektpartnern genutzt werden können. Durch die unterschiedlichen Kompetenzen der Partner kann das Projektvorhaben von verschiedenen Seiten bewertet werden, sodass sowohl eine technische-ökonomische als auch soziologische Beurteilung stattfindet. Durch die Zusammenarbeit der Partner wurden im Projektverlauf unterschiedlichste Datensätze sowie Erfahrungen ausgetauscht. Hierzu zählt, dass die vom GWI extrahierten typischen Lastprofile von Objekten, welche mit KWK-Anlagen versorgt werden, ans MEET übermittelt wurden. Hieraus konnte eine für die Systemkombination KWK-Anlage und Batterie abgestimmte Zellchemie der Batterien entwickelt werden. Weiterhin wurden wiederholt in Abstimmung zwischen ICM und GWI Änderungen in der Regulatorik bzw. mögliche Erweiterungen der verbauten Systeme an die Anlagen BetreiberInnen übermittelt. Zwischen GWI und allen Beteiligten Installationsunternehmen fand ein enger Austausch über auftretende Herausforderungen bei der Installation von Batteriespeichern statt, welcher bilateral kommuniziert wurde. Aufgrund der Corona-Pandemie traten erhebliche zeitliche Verzögerungen der Installationsarbeiten im Feld und an den Prüfboxen am GWI auf. Es bestand im gesamten Projektzeitraum intensiver Kontakt zu den AnlagenbetreiberInnen, besonders zu jenen, wo Herausforderungen mit der Technologiekombination auftraten. Konnten Problemstellungen in Kooperation mit den Installateuren nicht gelöst werden, wurden Hersteller informiert und Hilfe angefordert. Die Ergebnisse in Form der Management Summary und des Abschlussberichts wurde an alle Projektbeteiligten übermittelt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse in unterschiedlichen Fachzeitschriften, Konferenz und VDI-Gremien präsentiert und diskutiert. Ferner wurden die Zwischen- sowie die Endberichtserstellung der Verbundpartner koordiniert sowie Zwischen- und Abschlussworkshops terminiert und geleitet. Der Abschlussworkshop musste coronabedingt abgesagt werden. Im Rahmen des Projektes wurden diverse studentische Abschlussarbeiten betreut, von denen zwei in einer Fachzeitschrift in Form eines Berichts veröffentlicht wurden. Des Weiteren wurden Fachbeiträge in wissenschaftlichen Magazinen publiziert, Poster für Konferenzen erstellt und Präsentationen zu Teilen der Projektinhalte abgehalten. Somit wurde ein Wissenstransfer über Projektgrenzen hinaus erfolgreich sichergestellt.

## 10. Handlungsempfehlungen und Ausblick

Um die Ziele der nordrhein-westfälischen Landesregierung hinsichtlich des Ausbaues der KWK voranzutreiben, konnten Kriterien erarbeitet werden, welche bezüglich der rechtlichen Rahmenbedingungen sowie der Technologie selbst im Sinne einer weiteren Marktdiffusion anpassungsbedürftig sind. Dabei ist aktuell fraglich, inwieweit motorische KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse bis 1 kW weiterhin am Markt verfügbar sein werden. Die Identifizierung von Hürden, die für einen flächendeckenden Einsatz dieser Anlagen überwunden werden müssen, können helfen die aktuell positive Entwicklung des Marktes für Brennstoffzellen bzw. für noch kommende Entwicklungen in selbiger Leistungsklasse weiter zu stärken.

Dabei ist anzuführen, dass im Vergleich zu herkömmlichen Heizungssystemen die Anzahl an involvierten Akteuren und Institutionen im Planungs- und Installationsprozess sowie beim Betrieb der Anlagen hoch ist. Dies kann auf potenzielle Betreiber abschreckend wirken. Die Erweiterung von KWK-Anlagen um eine Batterie erhöht die Komplexität zusätzlich. Obwohl für unterschiedliche Bereiche bereits „Kleinanlagenregelungen“ greifen, wodurch einzelne Prozesse vereinfacht werden, bleibt in der Gesamtheit eine schwer zu überblickende Anzahl an zu berücksichtigenden Regelungen. Diese organisatorischen und bürokratischen Hürden sollten mit Blick auf Anlagen, die in Ein- oder kleinen Mehrfamilienhäuser zum Zweck der Selbstversorgung betrieben werden, vereinfacht werden. Als zentrale Handlungsempfehlung ist daher die Vereinfachung der administrativen Prozesse beim Anmeldevorgang und Betrieb der Anlagen zu sehen, welche sich auf die Pflichten der Erzeugungszähler, Steuerentlastung der Energiesteuer, einkommens- und umsatzsteuerliche Behandlung, die Vergütung des erzeugten KWK-Stroms sowie die Erstattung der vermiedenen Netznutzungsentgelte beziehen. Die Umsetzung dieser Empfehlungen würde dazu führen, dass die grundsätzliche Bereitschaft von Gebäudeeigentümer in dezentrale Erzeugungstechnologien zu investieren steigt und die Effizienz der Gebäudeversorgung verbessert wird.

Mit Blick auf die Anlagen selbst sind weiterhin technische Innovationen nötig, damit die Systeme im aktuellen Gebäudebestand breitflächig und wirtschaftlich eingesetzt werden können. Eine weitere Steigerung der Eigenverbrauchsquote ist, neben dem Einsatz einer Batterie, durch eine stromgeführte Betriebsweise unter Einhaltung der thermischen Komfortansprüche der Objektbewohner möglich. Ein grundlegendes Konzept dieser Betriebsweise wurde in diesem Bericht erarbeitet und kann genutzt werden, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Weiterhin sollten motorische Mikro-KWK-Anlagen unter dem Aspekt der Anlagenzuverlässigkeit sowie der Aufwendungen für Wartung/Inspektion und Instandsetzungen den Standard von zuvor installierten Heizungssystemen halten. KWK-AnlagenbetreiberInnen sind auf schnelle Wartung/Instandsetzung ihrer Anlagen angewiesen, da sich im Fall einer Anlagenstörung der wirtschaftliche Schade erhöht. Dies gilt insbesondere, wenn die Anlage um einen Batteriespeicher erweitert wurde. Teilweise wird ein Defekt oder eine Störung des KWK-Moduls gar nicht bemerkt, da der Heizwärmebedarf durch das Zusatzheizgerät gedeckt wird. Daher müssen

schnelle, kostengünstige Wartungs- und Instandsetzungsmöglichkeiten verfügbar sein. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass viele BetreiberInnen sich eine transparente und einfache Möglichkeit wünschen, den Zustand Ihrer Anlage abzurufen. Die Bilanzierung der Felddaten hat gezeigt, dass die Reduktion von bedarfsgebundenen Kosten durch gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme hoch ist, die zusätzlich anfallenden Kosten durch die zuvor beschriebene Kostenpunkte jedoch teilweise negativ ins Gewicht fallen. Damit auch in Gebäuden mit einem nicht optimalen Verhältnis von Strom- und Wärmebedarf ein wirtschaftlicher Einsatz von motorischen KWK-Anlagen möglich ist, ist eine Reduktion der Investitionskosten anzustreben. Die Felddaten zeigen, dass für die Brennstoffzellentechnologie ein nahezu störungsfreies Betriebsverhalten vorliegt.

Mit Blick auf die Batteriespeicher sowie die Technologiekombination KWK-Anlagen und Batteriespeicher konnten unterschiedliche Aspekte zur weiteren Stärkung der Systemkombination erarbeitet werden. Um besonders Beladeverluste zu reduzieren, müssten am Markt Wechselrichter mit niedrigerem Nennarbeitspunkt zur Verfügung stehen. Erfolgt eine Erweiterung um eine PV-Anlage, sind die eingesetzten Wechselrichter anhand der PV-Anlage zu dimensionieren. Grundsätzlich bedarf es bei der Kombination von KWK-Anlagen und Batteriespeichern einer sehr genauen Analyse von Erzeugungs- und Verbrauchsprofilen, um alle Komponenten optimal zu dimensionieren. Für einen breiten Einsatz der Technologie sind hier Installationsleitfäden bereitzustellen. Da das Erzeugungsverhalten von motorischen KWK-Anlagen durch den Wärmebedarf des Objektes geführt ist, kann dieses relativ genau vorhergesagt werden. Ein prädiktives Batteriemangement könnte genutzt werden, um die Eigenverbrauchsquote weiter zu steigern. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Kombination von motorischen KWK-Anlagen, PV-Anlagen und einem Batteriespeicher aufgrund der zeitlichen Verteilung der erzeugten Energiemengen Synergien birgt. Weiterhin muss daran gearbeitet werden, dass auch kleine Batteriespeicher systemdienlich eingesetzt werden können und hieraus eine zusätzliche Einnahmequelle resultiert. Dies gilt sowohl im Betrieb mit KWK-Anlagen als auch mit PV-Anlagen, da die Auslastung der Batterie kombiniert mit nur einer Erzeugungsanlage relativ gering ist. Ein ähnlicher Sachverhalt liegt bei den Batteriespeichern von Elektrofahrzeugen vor, welche von einer solchen Vermarktungsmöglichkeit profitieren würden. Insbesondere wenn überschüssiger Strom aus EEG-Anlagen zwischengespeichert werden kann, wirkt sich dies positiv auf die Wirtschaftlichkeit, CO<sub>2</sub>-Einsparungen und Primärenergieeinsparungen der Batterie aus. Technische und regulatorische Umsetzung solcher Konzepte sind als komplex zu bewerten und müssen immer wieder auf ein angemessenes Verhältnis von Aufwand und Nutzen geprüft werden. Die bereits jetzt installierte Anzahl an dezentralen PV-Anlagen deutet allerdings an, dass zukünftig Potenziale von überschüssigem PV-Strom vorliegen, welche mit Batterien genutzt werden und in Phasen von geringer Sonneneinstrahlung von dezentralen KWK-Anlagen ausgeglichen werden können.

Deswegen ist mit Blick auf die zukünftige Rolle von KWK-Anlagen im EEG/KWKG die Vergütung und der wirtschaftliche Anreiz zur antizyklischen Einspeisung des erzeugten Stroms zu EEG-Anlagen weiter zu stärken. Auch wenn KWK-Anlagen mit einer Leistung von  $\leq 50 \text{ kW}_{el}$  von

einer Meldung der nicht förderfähigen Strommengen zu Zeiten von negativen Strompreisen befreit sind, ist ein Betrieb der Anlagen zu diesen Zeitpunkten aus Systemsicht zu vermeiden. Auf der anderen Seite ist der Betrieb der Anlagen zu Zeiten von hohen Strompreisen stärker anzureizen. Im aktuellen Förderregime wird dies noch nicht getan. Bei den aktuell geltenden Vergütungskonditionen ist die Maximierung der Eigenverbrauchsquote nach wie vor die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimale Betriebsstrategie.

Neben der Systemgrenze KWK-Anlage, müssen bei dem Betrieb der Anlagen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des eingesetzten Brennstoffes betrachtet werden. Durch den Betrieb von KWK-Anlagen kann insgesamt eine signifikante CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung erreicht werden, obwohl die absolute Menge des verwendeten Brennstoffes, im Vergleich zu einer Versorgung durch eine Gasbrennwertheizung, steigt. Die umliegenden makroökonomischen Einflussfaktoren sollten genauer betrachtet und die unterschiedlichen Entwicklungen in diesem Zusammenhang berücksichtigen werden. Die im Brennstoffemissionshandelsgesetz verankerte CO<sub>2</sub>-Bepreisung benachteiligt diese grundlegende Eigenschaft unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. In Anbetracht der sich zuspitzenden Klimakrise und der knapper werdenden CO<sub>2</sub>-Budgets ist damit zu rechnen, dass sich dieser Effekt zukünftig verstärkt. Bedingt dadurch, dass eine Dekarbonisierung der Gasversorgung mit zeitlicher Verzögerung zur Dekarbonisierung der Stromversorgung eintritt, sinken die erreichbaren CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch einen vermiedenen Stromnetzbezug bei vorerst gleichbleibender CO<sub>2</sub>-Intensität des eingesetzten Brennstoffes. Um diese Verzögerung möglichst gering zu halten ist es für den Betrieb von KWK-Anlagen essenziell den Ausbau der erneuerbaren Energien zu beschleunigen oder auf andere Art und Weise eine Dekarbonisierung des eingesetzten Brennstoffes zu erreichen. Hierzu zählt auch der Einsatz von Biomethan. KWK-Anlagen sind grundsätzlich auf ein Energiesystem mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien auszurichten. Dies bedeutet, dass ihr Betriebsverhalten weiter zu flexibilisieren ist sowie sie auf den Einsatz von CO<sub>2</sub>-armen oder CO<sub>2</sub>-freien Brennstoffen, wie z.B. Wasserstoff vorzubereiten.

## Literaturverzeichnis

- [1] Wolf GmbH, „Wolf Heinztechnik,“ April 2013. [Online]. Available: [https://www.wolf-heiztechnik.de/fileadmin/content/Downloads/Planungsunterlagen/4800724\\_201304\\_BHKW\\_technische\\_Daten\\_und\\_Massblaetter.pdf](https://www.wolf-heiztechnik.de/fileadmin/content/Downloads/Planungsunterlagen/4800724_201304_BHKW_technische_Daten_und_Massblaetter.pdf). [Zugriff am 10 Januar 2018].
- [2] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), „BHKW-Kenndaten 2014/2015,“ 2015. [Online]. Available: [http://www.asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2014/broschueren/05\\_10\\_14\\_bhkw\\_kenndaten\\_leseprobe.pdf](http://www.asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2014/broschueren/05_10_14_bhkw_kenndaten_leseprobe.pdf). [Zugriff am 10 Januar 2018].
- [3] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), „BHKW-Kenndaten 2011,“ Juli 2011. [Online]. Available: [http://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2011/broschueren/05\\_07\\_11\\_asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf](http://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2011/broschueren/05_07_11_asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf). [Zugriff am 10 Januar 2018].
- [4] G. Schaumann und K. Schmitz, Kraft-Wärme-Kopplung, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [5] Stirling Institut Potsdam GmbH, „Geräteübersicht 2014 - Mikro KWK auf Basis von Stirlingmotoren,“ 2014. [Online]. Available: [https://www.bhkw-infozentrum.de/download/mikro-kwk\\_stirlingmotoren\\_geraeteuebersicht\\_121206.pdf](https://www.bhkw-infozentrum.de/download/mikro-kwk_stirlingmotoren_geraeteuebersicht_121206.pdf).
- [6] Umweltbundesamt Österreich, „Emissionen von Wasserstofffahrzeugen,“ 2006. [Online]. Available: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0012.pdf>.
- [7] Weiterbildungszentrum für innovative Energietechnologien der Handwerkskammer Ulm (WBZU), „Basisseminar Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie,“ 24 Januar 2008. [Online]. Available: [http://www.bba-bw.de/files/vortrag\\_bz-grundlagen-wbzu.pdf](http://www.bba-bw.de/files/vortrag_bz-grundlagen-wbzu.pdf). [Zugriff am 16 Januar 2018].
- [8] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), „Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung,“ März 2016. [Online]. Available: [http://www.asue.de/sites/default/files/asue/themen/brennstoffzellen/2016/broschueren/05\\_03\\_16\\_asue\\_brennstoffzellen\\_hausenergieversorgung.pdf](http://www.asue.de/sites/default/files/asue/themen/brennstoffzellen/2016/broschueren/05_03_16_asue_brennstoffzellen_hausenergieversorgung.pdf). [Zugriff am 15 Dezember 2017].
- [9] BHKW-Forum e.V., „BHKW-Infothek,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.bhkw-infothek.de/bhkw-anbieter-und-hersteller/bhkw-modellubersicht/#toc-erdgas-bhkw-modelle>. [Zugriff am 11 Dezember 2017].

- [10] Zukunft ERDGAS GmbH, „Initiative Brennstoffzelle,“ [Online]. Available: <https://zukunft.erdgas.info/zukunft-erdgas/unsere-initiativen/initiative-brennstoffzelle>. [Zugriff am 12 Dezember 2017].
- [11] M. Tausch und M. von Wachtendonk, Chemie Stoff - Formel - Umwelt, Bamberg: Buchner, C.C, 1993.
- [12] A. Oebbeke, „Dämmstoff Magazin: Wärmeleitahlen /  $\lambda$ -Werte,“ [Online]. Available: <https://www.baulinks.de/baumaterial/lambda-werte-waermeleitahl-waermeleitfaehigkeit-waermedaemmung.php>. [Zugriff am 13 Dezember 2017].
- [13] H. Drück, S. Bachmann und H. Müller-Steinhagen, „Wärmespeicher für Solaranlagen - Historie und zukünftige Entwicklung,“ 2 November 2006. [Online]. Available: [http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Publikationen/publikationen\\_STO\\_PTJ\\_HD1.pdf](http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Publikationen/publikationen_STO_PTJ_HD1.pdf). [Zugriff am 13 Dezember 2017].
- [14] Deutsche Energie-Agentur (dena), „Steigerung der Flexibilität und Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen durch die Kombination mit Wärmespeichern,“ Berlin, 2012.
- [15] Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), „Wärmespeichertechnologien für Energieeffizienz in Industrieanwendungen,“ 07 März 2012. [Online]. Available: [http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess\\_2012/Laing\\_W\\_rme\\_speichertechnologien\\_Energieeffizienz.pdf](http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess_2012/Laing_W_rme_speichertechnologien_Energieeffizienz.pdf). [Zugriff am 13 Dezember 2017].
- [16] BINE Informationsdienst, „Thermochemische Speicher,“ 2001. [Online]. Available: [http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2001/Projekt-Info\\_02-2001/projekt\\_0201internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2001/Projekt-Info_02-2001/projekt_0201internetx.pdf). [Zugriff am 12 Dezember 2017].
- [17] LUMITOS GmbH, „Eigenschaften des Wassers,“ 2017. [Online]. Available: [http://www.chemie.de/lexikon/Eigenschaften\\_des\\_Wassers.html](http://www.chemie.de/lexikon/Eigenschaften_des_Wassers.html). [Zugriff am 12 Dezember 2017].
- [18] Süßmeier Heizungstechnik, „Latentwärmespeicher – Speicherstoffe im Vergleich,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.suessmeier-heizung-solar.de/partner-suessmeier/solarenergie/waermespeicher/latentwaermespeicher/>. [Zugriff am 12 Dezember 2017].
- [19] A. Hauer, „Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen,“ Juli 2002. [Online]. Available: [https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/766/1/Dokument\\_26.pdf](https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/766/1/Dokument_26.pdf). [Zugriff am 12 Dezember 2017].

- [20] D. Laing, „Wärmespeichertechnologien für Energieeffizienz in Industrieanwendungen,“ 07 März 2012. [Online]. Available: [http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess\\_2012/Laing\\_W\\_rmespeichertechnologien\\_Energieeffizienz.pdf](http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/ess_2012/Laing_W_rmespeichertechnologien_Energieeffizienz.pdf). [Zugriff am 12 Dezember 2017].
- [21] IKZ, „Langfristige Wärmespeicherung,“ *IKZ Fachplaner*, pp. 17-19, Heft 1/2007.
- [22] A. Oebbeke, „Dämmstoff Magazin: Wärmeleitahlen /  $\lambda$ -Werte,“ ARCHmatic, 2018. [Online]. Available: <https://www.baulinks.de/baumaterial/lambda-werte-waermeleitahl-waermeleitfaehigkeit-waermedaemmung.php>. [Zugriff am 12 Dezember 2017].
- [23] L. Nierobis, „Wärmedämmstoffe,“ 2003. [Online]. Available: <http://www.waermedaemmstoffe.com/>. [Zugriff am 12 Dezember 2017].
- [24] T. Bergholz, „Lithiumbatterien für stationäre und mobile Anwendungen: Benchmarking und experimentelle Umsetzung,“ 2015. [Online]. Available: [https://juser.fz-juelich.de/record/203364/files/Energie\\_Umwelt\\_275.pdf](https://juser.fz-juelich.de/record/203364/files/Energie_Umwelt_275.pdf). [Zugriff am 10 Januar 2018].
- [25] Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), „Speichermonitoring - Batterietechnologien,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.speichermonitoring.de/ueber-pv-speicher/batterietechnologien.html>. [Zugriff am 10 Januar 2018].
- [26] G. Fuchs, B. Lunz, M. Leuthold und D. Sauer, „Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität,“ September 2012. [Online]. Available: [http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/Ueberblick\\_Speichertechnologien\\_SEFEP\\_deutsch.pdf](http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/Ueberblick_Speichertechnologien_SEFEP_deutsch.pdf). [Zugriff am 10 Januar 2018].
- [27] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, „Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030,“ Dezember 2015. [Online]. Available: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/TRM-SES.pdf>. [Zugriff am 10 Januar 2018].
- [28] M. Zapf, Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem: Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [29] Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), TZ HS Ulm, „Optimierung der Systemintegration fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Beispiel der Photovoltaik auf Niederspannungsebene,“ 18 Dezember 2014. [Online]. Available:

[http://www.bine.info/fileadmin/content/News/2015/Dateien/Schlussbericht\\_0325385\\_SYSPV-NS.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/News/2015/Dateien/Schlussbericht_0325385_SYSPV-NS.pdf). [Zugriff am 10 Januar 2018].

- [30] M. Schimpe, M. von Kuepach, M. Naumann, H. H.C., K. Smith und A. Jossen, „Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries,“ *J. Electrochem. Soc.*, pp. 181-193, 2018.
- [31] A. Hollemann, E. Wiberg und N. Wiberg, *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*, Berlin: Walter de Gruyter, 1995.
- [32] H. Bockholt und e. al., „*Journal of Energy Storage*,“ Nr. 11, pp. 76-85, 2017.
- [33] H. Hesse, R. Martins, P. Musilek, M. Naumann, C. Truong und A. Joassen, „Economic Optimization of Component Sizing for Residential Battery Storage Systems,“ *Energies*, Nr. 10 (7), p. 835, 2017.
- [34] B. Weißhar und W. Bessler, „Model-based lifetime prediction of an LFP/graphite lithium-ion battery in a stationary photovoltaic battery system,“ *Journal of Energy Storage*, Nr. 14, pp. 179-191, 2017.
- [35] W. Bauer und D. Nötzel, „Rheological properties and stability of NMP based cathode slurries for lithium ion batteries.,“ *Ceramics International*, Bd. 40 (3), 2014.
- [36] Bundesverband Solarwirtschaft (BSW) et al., „Sicherheitsleitfaden Li-Ionen-Hausspeicher,“ 2014.
- [37] HTW Berlin, „Stromspeicher Inspektion 2018,“ 2018.
- [38] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk, „Marktübersicht Batteriespeicher 2019,“ 2019.
- [39] HTW Berlin, „Stromspeicher Inspektion 2020,“ 2020.
- [40] HTW Berlin, „Stromspeicher Inspektion 2019,“ 2019.
- [41] Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES), „Effizienzleitfaden für PV-Speichersysteme,“ 2019.
- [42] Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) RWTH Aachen, „Speichermonitoring BW Jahresbericht 2019,“ 2019.
- [43] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), „Leitfaden zur Anmeldung und steuerlichen Behandlung von kleinen Blockheizkraftwerken,“ 2020.
- [44] M. Schmidt, M. Wenzel, M. Lange, J. Benthin, M. Flayyih, N. Lefort, T. Hanisch, F. S. K. Frankenhoff, F. Burmeister, R. Albus, K. Görner, S. Kühnel, M. Schönknecht, V. Grinewitschus, J. Heuner, K. Folta, H. Stapelmann und U. Kaak, „100 KWK Anlagen in

- Bottrop Abschlussbericht,“ Gas und Wärme Institut Essen e.V., Februar 2016. [Online]. Available: [https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/abschlussberichte/100\\_kwk-anlagen\\_in\\_bottrop-abschlussbericht-hq.pdf](https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/abschlussberichte/100_kwk-anlagen_in_bottrop-abschlussbericht-hq.pdf). [Zugriff am 13 April 2019].
- [45] BHKW-Infothek, „BHKW-Infothek,“ 18 05 2016. [Online]. Available: <https://www.bhkW-infothek.de/nachrichten/23672/2016-05-18-KWKg-2016-aenderungen-fuer-den-messstellenbetrieb/>.
- [46] F. Neyer, J. Felber und C. Gebhardt, „Kurzskala Technikbereitschaft (TB, technology commitment),“ 2016.
- [47] ene.field, „Learning points from demonstration of 1000 fuel cell based micro-CHP units - Summary of analyses from the ene.field project,“ Technical University of Denmark, Lyngby, 2017.
- [48] Noura et al., „A Review of Battery State of Health Estimation Methods: Hybrid Electric Vehicle Challenges,“ 2020.
- [49] FDZ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, *Zeitverwendungserhebung 2012/2013, Scientific Use File (SUF), eigene Berechnungen*.
- [50] M. Metz, „Flexible Energieversorgung - Modellierung der Last- und Erzeugungssituation dezentraler Versorgungsgebiete zur Bestimmung der Systemflexibilität,“ Dortmund, 2013.
- [51] A. Reinhardt, P. Baumann, D. Burgstahler, M. Hollick, H. Chonov, M. Werner und R. Steinmetz, „On the Accuracy of Appliance Identification Based on Distributed Load Metering Data,“ *Proceedings of the 2nd IFIP Conference on Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT)*, 2012.
- [52] EnergieAgentur.NRW, „Erhebung "Wo im Haushalt bleibt der Strom?" Stromverbrauchsanteile verschiedener Anwendungsbereiche in Ein- bis Fünf-Personen-Haushalten - 2015 und 2011 im Vergleich,“ 2015. [Online]. Available: [https://energie-tools.ea-nrw.de/\\_database/\\_data/datainfopool/erhebung\\_wo\\_bleibt\\_der\\_strom.pdf](https://energie-tools.ea-nrw.de/_database/_data/datainfopool/erhebung_wo_bleibt_der_strom.pdf). [Zugriff am Juni 2020].
- [53] VDEW, „Repräsentative VDEW-Lastprofile,“ Frankfurt (Main), 1999.
- [54] Stadt Bottrop - Amt für Informationsverarbeitung, „Stadtprofil Bottrop 2016,“ 2016.
- [55] N. Pflugradt, „Modellierung von Wasser- und Energieverbräuchen in Haushalten,“ 2016.

- [56] Modelica Association, „Dymola (Dynamic Modeling Laboratory) - User manual,“ Schweden, 2018.
- [57] M. e. a. Flayyih, „Sensitivity Analysis in Building Simulation with Modelica - Dynamic Simulation,“ Essen, 2019.
- [58] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), „Merkblatt zu den CO<sub>2</sub>-Faktoren - Energieeffizienz in der Wirtschaft - Zuschuss und Kredit,“ Eschborn, 2019.
- [59] M. Glöckler, „Simulation mechatronischer Systeme: Grundlagen und technische Anwendung,“ Wiesbaden, 2014.
- [60] ED Netze GmbH, „Lastprofile, Temperaturtabellen,“ [Online]. Available: <https://www.ednetze.de/kunde/lieferanten/lastprofile-temperaturtabellen/>. [Zugriff am 24 09 2018].
- [61] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), „Wissen in kompakter Form,“ in *BHKW-Fibel*, Berlin, 2015.
- [62] DIN EN ISO 7730, „Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730: 2005),“ 2006-05.
- [63] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „Standardlastprofile Strom,“ 2017.
- [64] M. Frondel, N. Ritter und S. Sommer, „Stromverbrauch privater Haushalte in Deutschland - Eine ökonomische Analyse,“ 2015. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12398-015-0157-0>. [Zugriff am 16 12 2020].
- [65] C.A.R.M.E.N. e.V., „Marktübersicht Wärmespeicher: Marktübersicht Wärmespeicher (vor 2017),“ [Online]. Available: <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktuebersicht-waermespeicher/>. [Zugriff am 16 12 2020].
- [66] M. Schmidt, F. Burmeister und R. Albus, „100 KWK-Anlagen in Bottrop - Vom Labor in die Demonstration - KWK-Modellversuch zur CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Innovation City,“ Essen, 2015.
- [67] M. Wenzel, F. Burmeister und R. Albus, „demoKWK3.0 - Wissenschaftliche Begleitung zur ganzheitlichen Valuation des Anlagenpools aus "100 KWK-Anlage in Bottrop",“ 2016.
- [68] Europäische Kommission, „Delegierte Verordnung (EU) 2015/2402 der Kommission zur Überarbeitung der harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte für die

- getrennte Erzeugung von Strom und Wärme gemäß der Richtlinie 2012/27 EU des Europäischen Parlaments und des Rates,“ 19 Dezember 2015. [Online]. [Zugriff am 16 Oktober 2020].
- [69] Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2017,“ 2017.
- [70] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), „Ratgeber Wärmeversorgung mit Kostenvergleich Heizung 2011,“ Verlag für sparsame und umweltfreundliche Energieverbrauch, 2011.
- [71] Wolff et al., „Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln,“ 2004.
- [72] DIN V 18599-1, „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger,“ 2018.
- [73] Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2020, „Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze,“ 2020 August 2020. [Online]. Available: [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBl&bk=Bundesanzeiger\\_BGBl&start=//\\*\[@attr\\_id=%27bgbl107s1519.pdf%27\]#\\_\\_bgbl\\_\\_%2F%2F\\*%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D\\_\\_1617097607269](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&bk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*[@attr_id=%27bgbl107s1519.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D__1617097607269). [Zugriff am 15 Oktober 2020].
- [74] Länderarbeitskreis Energiebilanzen (LAK), „Spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen der Strom- und Fernwärmeerzeugung,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.lak-energiebilanzen.de/eingabe-statisch/?a=i400>. [Zugriff am 25 Oktober 2020].
- [75] EVNG, „Abrechnungsbrennwerte nach § 40 GasNZV,“ [Online]. Available: [https://www.evng.de/files/redaktion/dokumente/netzzugang%20gas/netzkennzahlen/Abr\\_Brennwerte.pdf](https://www.evng.de/files/redaktion/dokumente/netzzugang%20gas/netzkennzahlen/Abr_Brennwerte.pdf). [Zugriff am 05 August 2020].
- [76] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), „VDI-Richtlinie: VDI 2067 Blatt 1 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung,“ VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, 2012.
- [77] Emscher Lippe Energy GmbH, „Privatkunden,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.ele.de/Privatkunden.html>. [Zugriff am 14 Januar 2021].
- [78] Thommessen, C. et al., „Untersuchungen der Auswirkungen des nationalen Emissionshandelssystems auf KWK-ANlagen mit einer Feuerungswärmeleistung kleiner 20 MW,“ 2020.

- [79] DIN V 18599-9, „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen,“ 2016. [Online].
- [80] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „Gaspreisanalyse Januar 2020 Haushalte,“ 2020.
- [81] Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „BDEW-Strompreisanalyse Januar 2020 - Haushalt und Industrie,“ 2020.
- [82] Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), „Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG),“ 2019. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/BJNR272800019.html>. [Zugriff am 15 Januar 2021].
- [83] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), „Mini-KWK-Anlagen - Liste der förderfähigen KWK-Anlagen bis einschließlich 20 kWel,“ [Online]. Available: [https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft\\_Waerme\\_Kopplung/Mini\\_KWK/mini\\_kwk\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Mini_KWK/mini_kwk_node.html). [Zugriff am 10 Dezember 2020].
- [84] KWK-für-NRW, „progres.nrw - KWK,“ 2018. [Online]. Available: <http://www.kwk-fuer-nrw.de/nrweukwk-investitionszuschuss--23534.asp>. [Zugriff am 13 Dezember 2020].
- [85] KfW, „Energieeffizient Bauen und Sanieren - Zuschuss Brennstoffzelle 433,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-\(433\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/Energieeffizient-Bauen-und-Sanieren-Zuschuss-Brennstoffzelle-(433)/). [Zugriff am 10 Dezember 2020].
- [86] BHKW Infozentrum, „Mini-KWK-Anlagen werden ab 2021 nicht mehr gefördert,“ 2019. [Online]. Available: [https://www.bhkw-infozentrum.de/bhkw-news/43251\\_Mini-KWK-Anlagen-werden-ab-2021-nicht-mehr-gefoerdert.html](https://www.bhkw-infozentrum.de/bhkw-news/43251_Mini-KWK-Anlagen-werden-ab-2021-nicht-mehr-gefoerdert.html).
- [87] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), „Stromvergütung KWK-Anlage bis 50 kWel,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft\\_Waerme\\_Kopplung/Stromverguetung/Stromverguetung\\_bis\\_50\\_KW/stromverguetung\\_bis\\_50\\_kw\\_node.html](https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopplung/Stromverguetung/Stromverguetung_bis_50_KW/stromverguetung_bis_50_kw_node.html). [Zugriff am 14 Januar 2021].
- [88] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), „Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Status und Perspektiven,“ 2020.

- [89] BHKW Infozentrum, „Üblicher Preis – Höhe der Stromvergütung für eingespeisten KWK-Strom,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.bhkw-infozentrum.de/wirtschaftlichkeit-bhkw-kwk/ueblicher\\_preis\\_bhkw.html](https://www.bhkw-infozentrum.de/wirtschaftlichkeit-bhkw-kwk/ueblicher_preis_bhkw.html). [Zugriff am 15 Januar 2021].
- [90] Energiesteuergesetz, „Energiesteuergesetz (EnergieStG) § 53a Steuerentlastung für die gekoppelte Erzeugung von Kraft und Wärme,“ [Online]. Available: [https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/\\_53a.html](https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/_53a.html).
- [91] EVNG, „Referenzpreisblatt zur Ermittlung vermiedener Netzentgelte nach nach § 18 Abs. 2 StromNEV,“ 2017. [Online]. Available: [https://www.evng.de/files/redaktion/dokumente/netzzugang%20strom/netzentgelt\\_e/preisblaetter/Referenzpreisblatt-EVNG-Ermittlung-vermiedener-Netzentgelte-nach-18-Abs-2-StromNEV.pdf](https://www.evng.de/files/redaktion/dokumente/netzzugang%20strom/netzentgelt_e/preisblaetter/Referenzpreisblatt-EVNG-Ermittlung-vermiedener-Netzentgelte-nach-18-Abs-2-StromNEV.pdf). [Zugriff am 14 Januar 2021].
- [92] Stromsteuer-Durchführungsverordnung - StromStV, „Verordnung zur Durchführung des Stromsteuergesetzes § 12d Steuerentlastung für Strom aus hocheffizienten KWK-Anlagen,“ [Online]. Available: [https://www.gesetze-im-internet.de/stromstv/\\_12d.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stromstv/_12d.html). [Zugriff am 14 Januar 2021].
- [93] Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2011, „§ 61a Entfallen der EEG-Umlage,“ [Online]. Available: [https://www.gesetze-im-internet.de/eeg\\_2011/\\_61a.html](https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2011/_61a.html). [Zugriff am 16 Januar 2021].
- [94] Bundesnetzagentur, „Leitfaden zur Eigenversorgung,“ 2016.
- [95] Umsatzsteuergesetz (UStG), „§ 19 Besteuerung der Kleinunternehmer,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.gesetze-im-internet.de/ustg\\_1980/\\_19.html](https://www.gesetze-im-internet.de/ustg_1980/_19.html). [Zugriff am 16 Januar 2021].
- [96] Emscher Lippe Energie GmbH (ELE), „Vermiedene Netznutzungsentgelte für das Projektgebiet InnovationCity Ruhr,“ 09 Sep 2015.
- [97] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), „Kurzinformation EEG-Umlage auf eigenerzeugte Strommengen in KWK-Anlagen 2018,“ 2018.
- [98] EnergieAgentur.NRW, *Mieterstrom kurz erklärt - Neue Perspektiven für Vermieter und Mieter*, Düsseldorf, 2016.
- [99] Energieagentur.NRW, n.d.. [Online]. Available: <https://www.energieagentur.nrw/kwk/was-mit-dem-steuerberater-zu-besprechen-ist>. [Zugriff am 15 Dezember 2020].
- [100] BHKW Infotheke, „Stromerzeugende Heizung beschäftigt die Finanzämter,“ 2013. [Online]. Available: <https://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/19004/2013-05-27->

- stromerzeugende-heizungen-beschäftigen-die-finanzamter/. [Zugriff am 14 Dezember 2020].
- [101] Bayrisches Landesamt für Steuern, „Photovoltaikanlagen Einkommenssteuer und Umsatzsteuer,“ 2021.
- [102] E.ON et al., „Designetz Themen. Projekte. Ergebnisse Von Einzelanlagen zum integrierten Energiesystem der Zukunft,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.designetz.de/>.
- [103] Deutsche Energie-Agentur (dena), „Leitfaden Energieausweis. Teil3-Energieverbrauchsausweis für Wohn- und Nichtwohngebäude,“ 2015.
- [104] Schild et al., „Energie-Effizientbewertung von Gebäuden,“ 2010.
- [105] Institut Wohnen und Umwelt (IWU), „Energiebilanzen für Gebäude - Gradtagzahlen-Deutschland,“ 2021.
- [106] Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2020,“ 2018.
- [107] Deutsche Energie-Agentur (dena), „Gebäudestudie Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcneschutzpolitik 2050 im Gebäudesktor,“ 2017.
- [108] K.-W.-K. (. 2016, „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft- Wärme- Kopplung,“ in *(Kraft- Wärme- Kopplungsgesetz)*, 2016.
- [109] Kraft-Wärme-Kopplungs Gesetz (KWKG) 2020, „"Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 17 des,“ 2020.
- [110] Umweltbundesamt (UBA), „Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland Sachstandsbericht,“ 2020.
- [111] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland, 2011.
- [112] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV), Raumwärmebedarfsmodell NRW, 2020.
- [113] Institut Wohnen und Umwelt (IWU), „Geäbudetypologie und Daten zum Gebäudebestand,“ 2015. [Online]. Available: <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/gebaeudetypologie/>.
- [114] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „Wie heizt Deutschland 2019? Studie zum Heizungsmarkt,“ 2019.

- [115] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), „Heizungsmodernisierung: Fast jedes zweite Gebäude mit Ölheizung lässt sich sofort auf Gas umstellen,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/heizungsmodernisierung-fast-jedes-zweite-gebaeude-mit-oelheizung-laesst-sich-sofort-auf-gas-umstellen/>. [Zugriff am 5 Dezember 2020].
- [116] Deutsche Energie-Agentur (dena), „Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand,“ 2016.
- [117] IT.NRW, „Gebäude und Wohnungen sowie Wohnverhältnisse der Haushalte, Stadt Bottrop,“ 2011.
- [118] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW), „100% erneuerbare Energien für Deutschland unter besonderer Berücksichtigung von Dezentralität und räumlicher Verbrauchsnähe - Potenzielle, Szenarien und Auswirkungen auf Netzinfrastruktur,“ 2021.
- [119] Umweltbundesamt (UBA), „Klimaneutraler Gebäudebestand 2050,“ 2016.
- [120] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, „Wohn-KWK-Switch,“ 2020.
- [121] Umweltbundesamt (UBA), „13 Thesen für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand Drängende Herausforderungen der Wärmewende,“ 2020.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Übersicht Brennstoffzellentechnologien [7].....	15
Abbildung 1.2: Übersicht der thermischen Speichertechnologien .....	18
Abbildung 1.3: Speicherdauer der verschiedenen thermischen Speicher .....	18
Abbildung 1.4: Übersicht der elektrischen Speichertechnologien.....	23
Abbildung 1.5: Speicherdauer der verschiedenen elektrischen Speicher.....	24
Abbildung 2.1: Partikelgrößenanalyse (PSA) der ausgewählten Aktivmaterialien LFP, NMC622 und LMO (links) mit jeweils D90 und D50-Werten, kumulierte Werte der PSA sind in der rechten Abbildung dargestellt .	30
Abbildung 2.2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Partikel von NMC622, LMO und LFP-basierten Elektroden, oben: die einzelnen Partikel, unten: die Verteilung des Aktivmaterials in hergestellten Kompositelektroden. ....	31
Abbildung 2.3: C-Ratenperformance der LFP-Kathoden mit dem LFP: Leitruß: Binder-Mischverhältnis von 90,5 : 3 : 6,5. Die Ergebnisse der Elektroden mit der unterschiedlichen Porosität (30, 40, 50 %) sind dargestellt. Die Vollzellen wurden im 2-Elektroden-Setup in Knopfzellen gegen Graphit zyklisiert. ....	32
Abbildung 2.4: Einfluss des Leitrußanteils auf die Entladefähigkeit der a) NMC622- und b) LFP-basierten Kathoden. Der Leitrußanteil (CA-Anteil, CA= <i>Conductive Agent</i> ) wurde im Verhältnis von 1 Gew.%, 2 Gew.% und 3 Gew.% variiert. ....	33
Abbildung 2.5: Ergebnisse der Leitfähigkeitsuntersuchungen in Bezug auf die unterschiedliche Flächenbelastungen für LFP, NMC622- und LMO-Kathoden.....	34
Abbildung 2.6: Einfluss des Leitrußanteils in der Elektrodenrezeptur auf die Langzeitzyklisierung bei 1C. Kathodenaktivmaterial NMC622 (rot) und LFP (grün) mit 1 – 3 Gew.% Leitruß zyklisiert gegen Graphit als Anode in Knopfzellen im 2-Elektroden-Setup. Flächenbelastung der Kathode: 2 - 2,3 mAh/cm <sup>2</sup> , Kapazitätsverhältnis Kathode:Anode (1:1,25) .....	35
Abbildung 2.7: Schematische Darstellung zur Verarbeitung der Bedarfsprofile von den KWK-Anlagen, um den realen Strom während der Lade- und Entladeprozesse zu berechnen. ....	37
Abbildung 2.8: Schematische Darstellung zur Verarbeitung der Bedarfsprofile von den KWK-Anlagen, um den realen Strom während der Lade- und Entladeprozesse zu berechnen. ....	37
Abbildung 2.9: Eigennutzenanteil in Abhängigkeit der Speichergröße der zur Verfügung gestellten Bedarfsprofile .....	38
Abbildung 2.10: Vergleich der KWK-Anlage auf die Strom Zu- und Abnahme während eines Tages im Winter, im Sommer und in der Übergangszeit. ....	39
Abbildung 2.11: Zyklisierte Graphit-basierte Anoden aus einer NMC111-Graphitzelle nach der jeweiligen Zyklisierungsmethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C. ....	41
Abbildung 2.12: <i>Post-mortem</i> REM-Untersuchungen der gealterten NMC111 Kathoden nach der jeweiligen Zyklisierungsmethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C. ....	42
Abbildung 2.13: Zyklisierte Graphit-basierte Anoden aus einer LFP    Graphitzelle nach der jeweiligen Zyklisierungsmethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C. ....	42
Abbildung 2.14: Zyklisierte LFP-basierte Kathoden nach der jeweiligen Zyklisierungsmethode a) Otto - 20 °C, b) Fuel - 20 °C, c) Otto - 40 °C und d) Fuel - 40 °C. ....	43

Abbildung 3.1: Messstellen auf der Wechsel- (AC) und Gleichstromseite (DC).....	51
Abbildung 3.2: Wirkungsgrade beim Beladen mit geringen Leistungen .....	52
Abbildung 3.3: Wechselrichterwirkungsgrade beim Entladen.....	53
Abbildung 3.4: Minimale Beladeleistung mit Wirkungsgraden .....	53
Abbildung 3.5: Speichersystem 4 be- und entlädt mit voller Leistung .....	55
Abbildung 3.6: Versuchsaufbau der Systembetrachtung.....	56
Abbildung 3.7: Leistungszyklus der Stromproduktion der Brennstoffzelle.....	58
Abbildung 3.8: Leistungsverläufe eines Wochenversuchs .....	59
Abbildung 3.9: Elektrischer Bedarf des untersuchten Gebäudes .....	62
Abbildung 3.10: Verteilung der Stromerzeugung und des Bedarfs.....	62
Abbildung 3.11: Fehlerhafte Verhalten der Batterie .....	64
Abbildung 4.1: Simulationsergebnisse für 31 Objekte, welche zur Zuordnung und Dimensionierung der Batteriespeicher genutzt werden. Hierzu wird jeweils die EVQ ohne Batterie, mit einer 2 kWh Batterie sowie einer 15 kWh Batterien in % dargestellt. Hierbei wurden Haushalte von 1-31 nummeriert sowie die KWK-Technologie und der thermische Energieverbrauch des Objektes im Titel aufgeführt. ....	68
Abbildung 4.2: GWI Datenbank Infrastruktur, welche genutzt wird, um die auflaufendenden Messdaten zu plausibilisieren und auszuwerten. ....	72
Abbildung 4.3 Zeitliche Verteilung der Batterieaktivitäten je Monat von Oktober 2019 bis September 2020 für ein Objekt in dem eine 1 kW ottomotorische KWK-Anlage sowie eine 1,98 kWh Batterie verbaut sind. ...	74
Abbildung 4.4 Zeitliche Verteilung der Batterieaktivitäten nach Monat von Oktober 2019 bis September 2020 für das Vergleichsobjekt Objekt, in welchem eine 1 kW ottomotorische KWK-Anlage sowie eine 1,98 kWh Batterie verbaut sind. ....	75
Abbildung 4.5 Zeitliche Verteilung der Batterieaktivitäten pro Monat von Oktober 2019 bis September 2020 für das Vergleichsobjekt Objekt in dem eine 1 kW stirlingmotorische KWK-Anlage sowie eine 5,9 kWh Batterie verbaut sind. ....	76
Abbildung 5.1 Eingang der Fragebögen mit telefonischer Nachfassaktion. ....	86
Abbildung 5.2 Wie häufig haben Sie sich seit der Installation/seit Ende des Projektes mit der Bedienungsanleitung Ihrer KWK-Anlage befasst? .....	89
Abbildung 5.3 Wie häufig nehmen Sie Einstellungen an Ihrer KWK-Anlage vor? .....	89
Abbildung 5.4 Zufriedenheit mit den technischen Merkmalen der KWK-Anlage .....	90
Abbildung 5.5 Mittelwerte der Ausprägung der psychologischen Variablen zu allen Messzeitpunkten mit Standardabweichung.....	92
Abbildung 5.6 Beurteilung des Zeitaufwandes für Anmeldung, Ablesung und Anträge (Mittelwerte) .....	94
Abbildung 5.7 Mittelwerte der Bewertung der Anmelde- und Ableseprozesse .....	94
Abbildung 6.1: Warmwasser und Heizlast (a) und Wärmesenke der Heizlast (b) .....	103
Abbildung 6.2 Kumulierte Wärmeerzeugung der KWK-Anlage in Messung und Simulation .....	105
Abbildung 6.3 Exemplarische Darstellung für die bestimmten Eigenverbrauchsquoten für Anlagen, welche ohne und mit Batterie sowie wärmegeführt oder stromorientiert betrieben werden. ....	108

Abbildung 6.4 Exemplarische Darstellung über erreichbare Autarkiegrade für wärmegeführten und stromorientierte Betrieb von KWK-Anlagen mit und ohne Batterie. ....	109
Abbildung 6.5 Exemplarische Darstellung der SOH der simulierten Batterien nach einem Betriebsjahr mit unterschiedlichen KWK-Technologien und Betriebsarten.....	110
Abbildung 6.6 Exemplarische Darstellung über nötige Betriebsstunden zum Erreichen einer Netzparität unterschiedlicher KWK-Technologien für wärmegeführte und stromorientierte Betriebsweise sowie den Betrieb mit und ohne Batterie.....	111
Abbildung 6.7: Schematische Darstellung einer Markov-Kette mit den Übergangswahrscheinlichkeiten P zwischen zwei Zuständen Z1 und Z2 .....	112
Abbildung 6.8: Vereinfachtes Ablaufdiagramm der Erzeugung der Hauptbeschäftigungstrajektorie für einen Zeitschritt.....	115
Abbildung 6.9: Anteile für die unterschiedlichen Hauptbeschäftigungen (oben) und Nebenbeschäftigungen (unten) aus der Simulation für einen Werktag im Sommer einer erwerbstätigen Person; Mittelung über 50.000 simulierte Trajektorien mit einer Auflösung von 10 Minuten .....	116
Abbildung 6.10: Vergleich des mit dem Modell erzeugten durchschnittlichen Stromverbrauchs für 1, 10, 100 und 10.000 Haushalte (HH) mit dem auf den mittleren Gesamtstromverbrauch (28,78 kWh) der 10.000 Haushalte skalierten Standardlastprofil bezogen auf die betrachteten drei Tage (Freitag, Samstag, Sonntag) .....	120
Abbildung 6.11: Vergleich des Stromverbrauchs von 17 gemessenen Profilen (bunt) im Vergleich zum Mittelwert aus 17 synthetischen Verbrauchsprofilen (schwarz) für jede Stunde einer Woche gemittelt über 52 Wochen (2016).....	122
Abbildung 6.12: Vergleich des Mittelwertes, sowie dem minimalen und maximalen Stromverbrauchs von 17 gemessenen Profilen (orange) mit den Werten für die synthetischen Verbrauchsprofilen (schwarz, grau) für jede Stunde einer Woche gemittelt über 52 Wochen (2016).....	123
Abbildung 6.13: Beispielhaftes synthetisches Stromlastprofil der Haushalte in Bottrop und Annahme der konstanten Stromproduktion .....	125
Abbildung 6.14: Beispielhaftes synthetisches Residuallastprofil der Stadt Bottrop, die negative Werte stellen einen Stromüberschuss und die positive Werte zeichnen einen Strombedarf im Stromnetz dar. ....	125
Abbildung 6.15 Beispielhaftes synthetisches Residuallastprofil von Bottrop im Jahr 2016 .....	126
Abbildung 6.16 Flussbild der entwickelten Regelung zur Netzdienlichkeit von KWK-Anlagen plus elektrischem Speicher. PEMFC: Polymermembran-Brennstoffzelle, SOFC: oxidkeramische Brennstoffzelle, SOC: <i>State of Charge</i> (Ladezustand).....	127
Abbildung 6.17 Vergleich der Netzabdeckungsquoten der netzdienlichen und wärmegeführten Fahrweise eines Quartiers mit 108 Objekten und 18 Batterien.....	129
Abbildung 6.18 Vergleich der durchschnittlichen Volllaststundenzahl der einzelnen netzdienlichen und wärmegeführten KWK-Technologien der sechs Simulationen.....	131
Abbildung 7.1: Aufbau des erweiterten Systems.....	134
Abbildung 7.2: Schematischer Aufbau des Systems .....	136
Abbildung 7.3: Schematischer Aufbau der Kommunikation des BHKWs und der Messgeräte.....	136
Abbildung 7.4: Gemessene elektrische Leistung über das Drehzahlband. ....	137
Abbildung 7.5: Gemessene thermische Leistung über das Drehzahlband.....	138

Abbildung 7.6: Gasverbrauch über der Drehzahl.....	139
Abbildung 7.7: Exemplarische Sprungantworten des BHKW bei veränderter Solldrehzahl .....	140
Abbildung 7.8: Exemplarische An- bzw. Abfahrvorgänge .....	141
Abbildung 7.9: Abfahren eines Lastgangs (Datensatz 1: 07.11.2017 06:00 bis 12:00) zum Vergleich zwischen Simulation und Praxis .....	142
Abbildung 7.10: Abfahren eines Lastgangs (Datensatz 2: 07.11.2017 17:00 bis 23:00) zum Vergleich zwischen Simulation und Praxis .....	143
Abbildung 7.11: PPD Darstellung bei Veränderung der Raumtemperatur [Berechnung nach DIN EN ISO 7730] .....	146
Abbildung 7.12: Darstellung des H0 Lastprofils im Winter für einen Jahresstromverbrauch von 27.500 kWh..	147
Abbildung 7.13: Darstellung des G0 Lastprofils im Winter bei einem Jahresstromverbrauch von 27.500 kWh	148
Abbildung 7.14: Primär- und Sekundärregelung für Regelungsvariante A .....	150
Abbildung 7.15: Primär- und Sekundärregelung für Regelungsvariante B .....	152
Abbildung 7.16: Primär- und Sekundärregelung für Regelungsvariante C .....	152
Abbildung 7.17: Implementierung der Schutzmechanismen und Randbedingungen des BHKW.....	153
Abbildung 7.18: Regelung des maximalen Drehzahlgradienten des BHKW.....	153
Abbildung 7.19: Darstellung der Funktionsweise und der Grenzen der Emulation .....	154
Abbildung 7.20: Speichertemperatur der Regelungsvariante A beim verstärkten G0-Profil.....	157
Abbildung 7.21: Raumtemperatur beim verstärkten G0-Profil für Regelungsvariante B .....	160
Abbildung 7.22: Darstellung der Raum- und Speichertemperatur mit Regelungsvariante C für das verstärkte G0 Profil über 5 Tage .....	163
Abbildung 7.23: Darstellung der Speichertemperaturen bei der Emulation mit Regelungsvariante A .....	164
Abbildung 7.24 Schematische Darstellung der Bilanzgrenzen, welche zur Bestimmung von PE- und CO <sub>2</sub> -Einsparung zwischen getrennter Erzeugung von Strom und Wärme sowie gekoppelter Erzeugung von Strom und Wärme betrachtet wird .....	167
Abbildung 7.25: Vergleichende Darstellung von Emissionen an CO <sub>2</sub> -Äquivalenten bei Versorgung mit ottomotorischer KWK-Anlage und 2 kWh Batterie sowie getrennter Versorgung mit Erdgas Altheizung und Stromnetzbezug. ....	170
Abbildung 7.26: CO <sub>2</sub> -Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen, für 14 Objekte, bei denen das KWK-System um einen Batteriespeicher erweitert wurden. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 18,2 kW, die kumulierte nutzbare Batteriekapazität beträgt 84,08 kWh.....	171
Abbildung 7.27: PE-Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen, für 14 Objekte, bei denen das KWK-System um einen Batteriespeicher erweitert wurde. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 18,2 kW, die kumulierte nutzbare Batteriekapazität beträgt 84,08 kWh.....	172
Abbildung 7.28: Jährliche Entladung und Netzladung der 14 bilanzierten Batterien mit zugehöriger KWK-Technologie und Nutzkapazität, wobei das Kürzel SM für stirlingmotorisch und OM für ottomotorische KWK-Anlagen steht.....	173

Abbildung 7.29: Jährlicher Wärmebedarf, Heizwärmebedarf, sowie spezifischer Heizwärmebedarf von 15 Objekten, welche um einen Batteriespeicher erweitert wurden, sortiert nach jährlichem Wärmebedarf. *: Wohngebäude mit Gewerbe. ....	174
Abbildung 7.30: Jährlicher elektrischer und thermischer Verbrauch von 15 Objekten, welche um einen Batteriespeicher erweitert wurden, sortiert nach jährlichem Gesamtwärmebedarf. *: Wohngebäude mit Gewerbe. ....	175
Abbildung 7.31: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 4.544 kWh und einer Grundfläche von 120 m <sup>2</sup> , mit einem Verbrauchspeak um 12 Uhr und einem erhöhten Grundverbrauch zwischen 18 und 22 Uhr. ....	176
Abbildung 7.32: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 5.589 kWh und einer Grundfläche von 190 m <sup>2</sup> , mit einem Verbrauchspeak zwischen 11 und 15 Uhr und einem erhöhten Grundverbrauch zwischen 18 und 22 Uhr. ....	176
Abbildung 7.33: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 2.538 kWh und einer Grundfläche von 190 m <sup>2</sup> , mit Verbrauchspeaks um 9 Uhr, 12 Uhr sowie abends zwischen 18 Uhr und 20 Uhr. ....	177
Abbildung 7.34: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 4.664 kWh und einer Grundfläche von 273 m <sup>2</sup> , mit Verbrauchspeaks um 8 Uhr, 12 Uhr sowie abends zwischen 17 Uhr und 22 Uhr. ....	177
Abbildung 7.35: Elektrisches Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 2.275 kWh und einer Grundfläche von 160 m <sup>2</sup> , mit Verbrauchspeaks um 8 Uhr und 16 Uhr. ....	178
Abbildung 7.36: Jahresdauerkennlinie des elektrischen Verbrauchsprofils in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 2.275 kWh und einer Grundlast von 72 W. 1 % der Verbrauchswerte liegen über 2.100 W, 10 % der Verbrauchswerte liegen über 636 W. ....	178
Abbildung 7.37: Jahresdauerkennlinie des elektrischen Verbrauchsprofil in W eines Wohnobjektes mit einem jährlichen Verbrauch von 6.836 kWh und einer Grundlast von 300 W. 1 % der Verbrauchswerte liegen über 3.576 W, 10 % der Verbrauchswerte liegen über 2.200 W. ....	179
Abbildung 7.38: Vergleich der Jahresdauerkennlinien des elektrischen Verbrauchsprofil in W von 12 Objekten. ....	179
Abbildung 7.39: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (Projektkosten) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung). ....	185
Abbildung 7.40: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (Projektkosten) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung) mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % von 10 motorischen Blockheizkraftwerken der Leistungsklasse 1 kW. Der schwarze Balken gibt die Gesamtannuität $A_g$ des Gasbrennwertgerätes an, welche auf 100 % normiert sind. Der orange und graue Balken gibt die durch das KWK-System/Batterie erzielten Einsparungen an. ....	186
Abbildung 7.41: Spezifische Investitionskosten der im Feld installierten Batteriespeicher von elf unterschiedlichen Herstellern sortiert nach spezifischen Batteriekosten in €/kWh_Nutz brutto inklusive und exklusive Installationskosten. ....	188
Abbildung 7.42: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (BAFA+Progres.NRW-Förderung) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung). Der schwarze Balken gibt die Gesamtannuität $A_g$ an, welche sich aus der Summe der Annuität der Kosten $A_k$ abzüglich der Annuität der Erlöse $A_e$ zusammensetzt. In der Annuitätenmethoden wird von einem Bilanzierungszeitraum von 15 Jahren und einem Zinssatz von 3 % angenommen. ....	188

Abbildung 7.43: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems ohne und mit Batterie (BAFA+Progres.NRW) sowie einem Gasbrennwertgerät (ohne Förderung) mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % von zehn motorischen Blockheizkraftwerken der Leistungsklasse 1 kW. Der schwarze Balken gibt die Gesamtannuität $A_g$ des Gasbrennwertgerätes an, welche auf 100 % normiert sind. Der orange und der graue Balken geben die Annuitäten der KWK- sowie KWK+Batterie-Systeme an. ....	189
Abbildung 7.44: Ökonomische Gegenüberstellung von Kosten für Netzbezug bei vollständigem Netzbezug, reduziertem Netzbezug durch eine KWK-Anlage sowie KWK-Anlage und Batterie für motorische KWK-Anlagen und Brennstoffzelle. In einem Haushalt ist weiterhin eine PV-Anlage verbaut. ....	190
Abbildung 7.45: Im Projektzeitraum sowie in Vergleichszeiträumen aufgetretene Gradtagzahlen und die daraus abgeleiteten Faktoren zur Witterungsbereinigung. [110].....	192
Abbildung 7.46: Im Projektzeitraum sowie in Vergleichszeiträumen aufgetretene mittlere Außentemperaturen sowie Heiztage. [110] .....	192
Abbildung 7.47: Heizwärmebedarf von 33 Objekten über fünf Bilanzjahre. ID-Zuweisung der Gebäude wurden randomisiert und sind nicht rückverfolgbar. ....	193
Abbildung 7.48: Verteilung der Wachstumsraten von der Entwicklung des Heizwärmebedarfs von 42 Objekten über fünf Bilanzjahre bezogen auf das Jahr 2016.....	194
Abbildung 7.49: Gasbezug in kWh <sub>Hi</sub> /a von 13 stirlingmotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten. ....	195
Abbildung 7.50: Heizwertbezogener Jahresnutzungsgrad von 13 stirlingmotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten. ....	195
Abbildung 7.51: Gasbezug in kWh <sub>Hi</sub> /a von 15 ottomotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten. ....	196
Abbildung 7.52: Thermisch 16 ottomotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten. ....	196
Abbildung 7.53: Heizwertbezogener Jahresnutzungsgrad von 15 ottomotorischen KWK-Systemen (KWK+ZHG) für vier Bilanzierungsjahre. Bei den aufgetragenen Daten handelt es sich um nicht witterungsbereinigte Messdaten. ....	197
Abbildung 7.54: CO <sub>2</sub> -Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen, für 39 Haushalte, bei denen ein KWK-System verbaut ist. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 47,9 kW. Der angenommene spez. Emissionsfaktor für Erdgas beträgt 0,24 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh Erdgas, 0,56 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh Bezug aus dem Stromnetz sowie 0,86 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh eingespeistem KWK-Strom. [73] .....	198
Abbildung 7.55: CO <sub>2</sub> -Einsparung von 13 stirlingmotorischen KWK-Anlagen sowie 14 ottomotorischen KWK-Anlagen gegen über den verbauten Altheizungen. Die angenommenen spez. Emissionsfaktoren für Erdgas beträgt 0,24 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh Erdgas sowie 0,56 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh für Strombezug aus dem Netz der allgemeinen Versorgung. ....	199
Abbildung 7.56: CO <sub>2</sub> -Einsparung vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf neues Gasbrennwertgerät mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % bezogen auf den Heizwert [67], für 39 Haushalte bei denen ein KWK-System verbaut ist. Der angenommene spez. Emissionsfaktor für Erdgas beträgt 0,24 kg CO <sub>2</sub> -	

Äquivalente/kWh Erdgas, 0,56 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh Bezug aus dem Stromnetz sowie 0,86 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/ kWh eingespeistem KWK-Strom [73].....	200
Abbildung 7.57: CO <sub>2</sub> -Einsparung vom KWK-Anlagen Pool, bezogen auf neues Gasbrennwertgerät mit einem Jahresnutzungsgrad von 92 % bezogen auf den Heizwert [67], für 39 Haushalte bei denen ein KWK-System verbaut ist. Der angenommene spez. Emissionsfaktor für Erdgas beträgt 0,24 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh Erdgas, 0,56 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh Bezug aus dem Stromnetz sowie 0,86 kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh eingespeistem KWK-Strom [73]. .....	200
Abbildung 7.58: Vergleich ausgestoßener CO <sub>2</sub> -Äquivalente unterschiedlicher Versorgungssysteme für die Jahresbilanz eines beispielhaften Objektes mit einem elektrischen Bedarf von 5.000 kWh sowie einem thermischen Bedarf (Heiz und TWW) von 22.400 kWh für einen spez. Emissionsfaktor für netzbezogenen Strom zwischen 50 und 800 g CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh. ....	202
Abbildung 7.59: Vergleich ausgestoßener CO <sub>2</sub> -Äquivalente unterschiedlicher Versorgungssysteme für die Jahresbilanz eines beispielhaften Objektes mit einem elektrischen Bedarf von 5.000 kWh sowie einem thermischen Bedarf (Heiz und TWW) von 22.400 kWh für einen spez. Emissionsfaktor für netzbezogenen Strom zwischen 500 und 800 g CO <sub>2</sub> -Äquivalente/kWh sowie für den Einsatz von Biomethan und gebäudenah erzeugtem Biomethan. ....	203
Abbildung 7.60: Einsparung an Primärenergie vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf Altheizungen für 39 Haushalte, bei denen ein KWK-System verbaut ist. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 47,9 kW. Die Primärenergiefaktoren wurden entsprechend [73] angenommen. ....	203
Abbildung 7.61: Einsparung an Primärenergie vom KWK-Anlagen Pool bezogen auf neue Gasbrennwertgeräte für 39 Haushalte, bei denen ein KWK-System verbaut ist. Die betrachtete kumulierte elektrische Nennleistung der KWK-Anlagen beträgt 47,9 kW. Die Primärenergiefaktoren wurden entsprechend [73] angenommen. ....	204
Abbildung 7.62: Links: Jährliche Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer ottomotorischen KWK-Anlage, welche im Bilanzzeitraum 5.420 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse. ....	207
Abbildung 7.63: Links: Jährlich Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer stirlingmotorischen KWK-Anlage, welche im Bilanzzeitraum 4.296 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse. ....	208
Abbildung 7.64: Links: Jährlich Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer PEM-Brennstoffzelle, welche im Bilanzzeitraum 4.838 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse. ....	209
Abbildung 7.65: Links: Jährliche Erlöse aus KWK-Stromerzeugung bei Variation des Eigenverbrauches einer Festoxidbrennstoffzelle, welche im Bilanzzeitraum 12.751 kWh erzeugt hat. Rechts: Im Objekt erreichte Eigenverbrauchsquote sowie mittlere jährliche Erlöse. ....	209
Abbildung 7.66: Bilanzgrenzen zur Bestimmung der Steigerung in Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad in den vermessenen Objekten mit Batterie. ....	211
Abbildung 7.67: 14 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Energie mit welcher die Batterien im Zeitraum 01.10.2019 – 30.09.2020 be- und entladen wurden sowie der daraus resultierende Jahresnutzungsgrad, welcher um den Unterschied im SoC zu Beginn und Ende der Messperiode bereinigt wurde. ....	212

Abbildung 7.68: 14 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Jahresnutzungsgrad sowie der Anteil der Batteriebeladung, welcher in der Bilanzierungsperiode aus dem Netz erfolgte. ....	213
Abbildung 7.69: 13 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Mittlere Leistungen mit welchen die Batterien im Messzeitraum be- und entladen wurden. ....	214
Abbildung 7.70: 13 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Vorhandener KWK-Überschuss sowie die erreichte Batterieladung in kWh. ....	215
Abbildung 7.71: 14 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Erreichte Steigerung der Eigenverbrauchsquote durch den Einsatz der Batterien sowie der zeitliche Anteil der Batteriezustände SoC = 1 und SoC = 0. ....	216
Abbildung 7.72: 12 KWK-Systeme mit zugehöriger Batterie unter Angabe der jeweiligen elektrischen Nennleistung und Nutzkapazität. Erreichte Steigerung des Autarkiegrades (AG in %), Autarkiegrad des Objektes mit Batterie (AG <sub>Obj</sub> in %) durch den Einsatz der Batterien sowie zugehöriger elektrischer Hausverbrauch und Entladung der Batterie in %. ....	217
Abbildung 7.73: KWK und PV-Erzeugung in kWh welche im Objekt mit einer 1 kW stirlingmotorischen KWK-Anlage, einer 2,4 kWp PV-Anlage sowie einem Batteriespeicher mit einer Nutzkapazität von 7,68 kWh. ....	218
Abbildung 7.74. Thermischer Deckungsanteil für 13 stirlingmotorische KWK-Systeme abhängig vom Wärmbedarf des vermessenen Gebäudes. ....	218
Abbildung 7.75. Thermischer Deckungsanteil KWK für 14 ottomotorische KWK-Systeme abhängig vom Wärmebedarf der vermessenen Gebäude ....	219
Abbildung 7.76: Gebäude im Projektgebiet der Innovation City Bottrop, welche für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen geeignet sind [112] .....	224
Abbildung 7.77: Einsparpotenzial an CO <sub>2</sub> -Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Projektgebiet der Innovation City erreichbar ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	226
Abbildung 7.78: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro KWK-Anlagen im Projektgebiet der Innovation City erreichbar ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	227
Abbildung 7.79: Gebäude im Gebiet der Stadt Bottrop, welche für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen geeignet sind [112] .....	228
Abbildung 7.80: Einsparpotenzial an CO <sub>2</sub> -Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Stadtgebiet von Bottrop zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	230
Abbildung 7.81: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Stadtgebiet von Bottrop zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	230

Abbildung 7.82: Kumulierter Wärmebedarf in 1 km <sup>2</sup> -Raster für Wohngebäude der Wärmebedarfsklasse 15.000 – 45.000 kWh/a sowie mit Fernwärme versorgte Gebiet im Bundesland NRW. ....	232
Abbildung 7.83: Einsparpotenzial an CO <sub>2</sub> -Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern in NRW zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	233
Abbildung 7.84: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern in NRW zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	234
Abbildung 7.85: Gebäudebestand in Deutschland: Anzahl an Gebäuden nach Gebäudetyp sowie zugehörige Fläche. [119] .....	235
Abbildung 7.86: Einsparpotenzial an CO <sub>2</sub> -Äquivalenten, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Bundesgebiet zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	238
Abbildung 7.87: Einsparpotenzial an Primärenergie, welches durch motorische Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit Batteriespeichern im Bundesgebiet zu erreichen ist. Hier wurden für alle Gebäude mit entsprechendem thermischen Bedarf Mikro-KWK-Anlagen der elektrischen Leistungsklasse 1 kW sowie einer Batterie der Nutzkapazität 2 kWh eingesetzt. ....	238

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Vergleich der Mikro-KWK-Technologien .....	17
Tabelle 1.2: Vergleich der thermischen Speichertechnologien .....	22
Tabelle 1.3: Vergleich der elektrischen Speichertechnologien [24] [25] [26] [27] [28] [29] .....	28
Tabelle 2.1: Auflistung der untersuchten Standardzellen NMC111 bei 20 und 40 °C mit der jeweiligen Kennzeichnung im weiteren Berichtsverlauf. ....	40
Tabelle 2.2: Auflistung der untersuchten Projektzellen bei 20 °C und 40 °C mit der jeweiligen Kennzeichnung im weiteren Berichtsverlauf. ....	40
Tabelle 2.3: Ergebnisse der GC-MS-Untersuchungen des gealterten Elektrolyten mit 1M LiPF <sub>6</sub> -Leitsalz in EC: EMC (3:7 Gew.) mit 2 Gew.% VC in NMC111-basierten Zellen. Gehalt der Elektrolytbestandteile EC, EMC und VC vor (Referenz) und nach erfolgter Zyklisierung. ....	44
Tabelle 2.4: PF <sub>6</sub> <sup>-</sup> - Gehalt der gealterten Elektrolyte laut IC-Untersuchung im Vergleich zum Referenzgehalt aus NMC111-basierten Zellen. ....	45
Tabelle 2.5: Ergebnisse der GC-MS-Untersuchungen des gealterten Elektrolyten mit 1M LiPF <sub>6</sub> -Leitsalz in EC: EMC (3:7 Gew.) mit 2 Gew.% VC in LFP-basierten Zellen. Gehalt der Elektrolytbestandteile EC, EMC und VC vor (Referenz) und nach erfolgter Zyklisierung. ....	45
Tabelle 2.6: PF <sub>6</sub> <sup>-</sup> - Gehalt der gealterten Elektrolyte laut IC-Untersuchung im Vergleich zum Referenzgehalt aus LFP-basierten Zellen. ....	46
Tabelle 3.1 Übersicht der Batteriespeichersysteme mit den wichtigsten Herstellerangaben .....	50
Tabelle 3.2: Ergebnisse aus der Speicherbetrachtung .....	54
Tabelle 3.3: Effizienz der Batteriespeichersysteme .....	59
Tabelle 4.1: Ausgewählte Haushalte, welche im Projekt um einen Batteriespeicher erweitert wurden. Hierbei sind jeweils paarweise Haushalte mit identischen Batterien ausgestattet. Kriterien sind hierbei die Zuverlässigkeit der KWK-Anlage sowie Strom- und Wärmebedarf der Objekte. ....	69
Tabelle 4.2: Batterieaktivitäten welche jedem Messpunkt der Batterieprofile zugeordnet werden. ....	73
Tabelle 5.1 Haushaltsstruktur der KWK-Haushalte, die an allen Befragungszeitpunkten teilgenommen haben zum Zeitpunkt t4 (n = 33) .....	86
Tabelle 5.2 Wohnsituation der KWK-Haushalte, die an allen Befragungszeitpunkten teilgenommen haben zum Zeitpunkt t4 (n=33).....	87
Tabelle 5.3 Fragebogenitems zur Erhebung der psychologischen Variablen.....	91
Tabelle 6.1 Betrachtete Objekte mit Nutzern und Verbrauchsdaten .....	100
Tabelle 6.2: Technische Daten der untersuchten Systeme für die gewählten Referenzobjekte – Simulationsdaten.....	101
Tabelle 6.3 Ergebnisse Wärmenachführung Messung und Simulation .....	104
Tabelle 6.4: Bilanzieller Vergleich zwischen Simulation und Messstand aller Wochen .....	106
Tabelle 6.5: Tabellarische Übersicht der Eigenverbrauchsquoten der betrachteten Referenz-KWK-Systeme.....	108
Tabelle 6.6: Tabellarische Übersicht des Autarkiegrades der betrachteten Referenz-KWK-Systeme .....	109

Tabelle 6.7: Vergleich der Jahresstromverbräuche (Soll) aus [51] mit den Ist-Werten des kalibrierten Modells für verschiedene Haushaltsgrößen .....	118
Tabelle 6.8: Übersicht der Privathaushalte in Bottrop zur Erzeugung einer synthetischen Residuallast [53] ....	124
Tabelle 7.1: MAPE der Versuchsläufe .....	143
Tabelle 7.2: Angenommene Variablen für die Simulation .....	149
Tabelle 7.3: Ergebnisse der Regelungsvariante A mit H0-Profil (oben) und verstärktem H0-Profil (unten).....	155
Tabelle 7.4: Ergebnisse der Regelungsvariante A mit G0-Profil (oben) und verstärktem G0-Profil (unten).....	156
Tabelle 7.5: Ergebnisse der Regelungsvariante B mit H0-Profil und verstärktem H0-Profil .....	158
Tabelle 7.6: Ergebnisse der Regelungsvariante B mit G0-Profil (oben) und verstärktem G0-Profil (unten).....	159
Tabelle 7.7: Ergebnisse für Regelungsvariante C mit den Profilen H0 (obere Werte) und verstärktem H0 (untere Werte). Die Variationen für die Raumtemperatur sind zusätzlich farblich unterschieden .....	161
Tabelle 7.8: Ergebnisse für Regelungsvariante C mit den Profilen G0 (obere Werte) und verstärktem G0 (untere Werte). Die Variationen für die Raumtemperatur sind zusätzlich farblich unterschieden .....	162
Tabelle 7.9: Brennstoffkosten und CO <sub>2</sub> -Emissionen der betrachteten Szenarien pro Jahr .....	165
Tabelle 7.10: Angenommene netzbezogene Hilfsenergien unterschiedlicher Heizungssysteme nach [69].....	168
Tabelle 7.11: Angenommene Faktoren zur Bestimmung der Primärenergie und CO <sub>2</sub> -Äquivalente unterschiedlicher Versorgungsvarianten von Wohnobjekten. [72] .....	169
Tabelle 7.12: Substitutionsmatrix konventioneller Heizungssysteme und KWK-Systeme, welche um einen Batteriespeicher erweitert wurden. Bilanzierte Energien beziehen sich auf den Zeitraum 01.10.2019–30.09.2020.....	171
Tabelle 7.13: Kumulierte Energie der Batterieentladung, Netzladung, Umwandlungs- und Speicherverlust sowie netto Batterieentladung (vermiedener Netzbezug) zur Bestimmung von CO <sub>2</sub> - und PE-Einsparung bezogen auf Netzbezug und DE/NRW mit Faktoren aus [73]. .....	173
Tabelle 7.14: Kennwerte zur quantitativen Bewertung von 12 Verbrauchsprofilen: Jährlicher elektrischer Verbrauch $E_{ObjVer}$ in kWh, mittlerer Verbrauch $P_{ObjVer}$ in W, Grenzleistungen in W, die den jeweiligen zeitlichen Anteil überschreiten, Energie der Grundlast $E_{ObjGrund}$ in kWh sowie der Anteil der Grundlast am gesamten Verbrauch $\rho_{Grund}$ in %.....	180
Tabelle 7.15: Übersicht über Annahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung zum Vergleich unterschiedlicher Versorgungssysteme. ....	181
Tabelle 7.16: Übersicht über Förderung, Steuern, und Mikro-KWK-Anlagen, welche für die Wirtschaftlichkeitsberechnung nach VDI 2067 genutzt werden. ....	183
Tabelle 7.17: Substitutionsmatrix konventioneller Heizungssysteme und KWK-Systeme. Bilanzierte Energien beziehen sich auf den Zeitraum 01.10.2019– 30.09.2020. ....	198
Tabelle 7.18 Zuschläge für KWK-Anlagen von bis zu 50 kW elektrischer Leistung nach KWKG 2020. [106] .....	205
Tabelle 7.19: Charakterisierung von vier unterschiedlichen KWK-Technologien anhand ihrer Betriebsdaten, der elektrischen Erzeugung der KWK-Anlage, dem ins Netz der öffentlichen Versorgung eingespeiste Strom sowie dem selbst verbrauchten Strom jeweils in kWh. ....	205
Tabelle 7.20: Angenommene Parameter zur Bestimmung der jährlichen Einnahmen.....	206
Tabelle 7.21: Differenzbetrag zwischen pauschalierter Bezuschlagung und getrennter Bezuschlagung nach Eigenverbrauch und Einspeisung.....	207

Tabelle 7.22: Anzahl der Gebäudeklassen nach Nutzungsart des Gebäudes und Kategorien des amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystems für das Gebiet der Stadt Bottrop [112] .....	220
Tabelle 7.23: Spezifischer Wärmebedarf von unterschiedlichen Gebäudetypen und Baujahren. Die Wärmebedarfe enthalten einen pauschalierten spezifischen TWW Bedarf von 13,5 kWh/m²a [112].....	221
Tabelle 7.24: Altersstruktur der Heizungssysteme in Ein- und Zweifamilienhäusern sowie Wohnungen in Mehrfamilienhäusern. [114].....	222
Tabelle 7.25: Genutzte Energieträger zur Wärmebereitstellung im deutschen Wohngebäude- und Wohnungsbestand 2019 sowie potentieller Substitutionsanteil der aktuell bezogenen Energieträger. [114] [115] [116].....	223
Tabelle 7.26: Anzahl der Gebäude welche im aufgeführten Wärmebedarfsintervall liegen. [112] .....	224
Tabelle 7.27: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme für das Innovation City Projektgebiet. ....	225
Tabelle 7.28: Anzahl der Gebäude, welche im Wärmebedarfsintervall im Stadtgebiet Bottrop liegen [112] ....	229
Tabelle 7.29: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme .....	229
Tabelle 7.30: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme für die Bilanzgrenze NRW. ....	232
Tabelle 7.31: Wärmebedarf unterschiedlicher Gebäudeklassen, welcher aus den spezifischen Wärmebedarf (inkl. TWW) und der mittleren Gebäudefläche berechnet wurden. [112] [119].....	235
Tabelle 7.32: Gebäudeanzahl nach Gebäudetyp und Baujahr abzüglich einer Sanierungsrate von 1%/a. [119]	236
Tabelle 7.33: Kumulierte Wärmebedarfe von Wohngebäuden in Deutschland, welche im Wärmebedarfsintervall 15.000 kWh – 45.000 kWh liegen und deren aktuelles Heizungssystem zur Substitution durch ein Mikro-KWK-System in Kombination mit einer Batterie geeignet sind.....	236
Tabelle 7.34: Durch Mikro-KWK-Anlagen substituierbare thermische Energiemenge sowie die daraus resultierenden elektrischen Energieströme, welche potentiell bei großflächigem Einsatz möglich sind.	237

# Anhang



**PROJEKTPARTNER**

Das Projekt „KWK plus Speicher“ richtet sich an Gebäudeeigentümer, die bereits an dem Modellvorhaben „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ teilgenommen haben.

An der Umsetzung sind folgende Institutionen und Unternehmen beteiligt:



**gwi**  
Gesamthochschule  
Westfälische Wilhelms-Universität  
Münster



**meeto**



**InnovationCity  
Management**



**HRW**  
Hochschule für  
Angewandte Wissenschaften  
Rheinland-Westfalen



**WWU  
MÜNSTER**



Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,  
Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen

Das Projekt wird gefördert durch



**InnovationCity  
Ruhr**  
Modellstadt Bottrop

**Ansprechpartner**

**KWK PLUS SPEICHER**

Zentrum für Information und  
Beratung (ZIB)  
Südring-Center-Promenade 3  
46242 Bottrop

Fragen zum Projekt  
Simone Richrath  
Telefon 02041/70-5041  
simone.richrath@icruhr.de  
www.icruhr.de

InnovationCity Ruhr | Modellstadt  
Bottrop ist ein Projekt des  
Initiativkreises  
**Ruhr®**

**Aktivierung**

**KWK PLUS SPEICHER**



Anhang 1: Verwendetes Protokoll zur Inbetriebnahme der Batteriespeicher.



InnovationCity Ruhr  
**KWK PLUS SPEICHER**

**WORUM GEHT ES IM PROJEKT?**

Hocheffiziente KWK-Systeme sind ein wesentlicher Bestandteil der Klimaschutzstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen, um die Energieeffizienz zu steigern. Daher setzt „KWK plus Speicher“ an dem bereits erfolgreich umgesetzten Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ an. Durch intelligentes Speichern und Nutzen der mit KWK-Anlagen erzeugten Energie, können die „stromerzeugenden Heizungen“ flexibler genutzt werden.

**WAS BEDEUTET DAS KONKRET?**

Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorprojekte werden nun ausgewählte KWK-Anlagen um einen Stromspeicher erweitert. So kann der durch Ihre Anlage erzeugte Strom flexibler verbraucht werden, d. h. auch zu Zeiten, in denen Ihre Heizung keinen Strom erzeugt. Zudem können die KWK-Anlagen so effizienter betrieben werden. Insgesamt wird durch das Projekt eine Datengrundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, im Rahmen des Einsatzes von elektrischen Speichern im Mikro-KWK-Anlagenbetrieb, geschaffen. Dadurch sollen möglicherweise künftig nutzbare Kombinationen von Speichern und Mikro-KWK-Anlagen erforscht werden.

**WELCHE STROMSPEICHER KOMMEN ZUM EINSATZ?**

Im Rahmen des Projektes werden Lithium- und Bleibatterieteilspeichersysteme unterschiedlicher Kapazitäten in Referenzobjekte integriert. Um einen einwandfreien Betrieb bei den Mitmachern sicherzustellen, werden erprobte und marktgängige Speicher verwendet. Schlussendlich können die „Akkus“ und die Kraft-Wärme-Kopplungssysteme optimiert und aufeinander abgestimmt werden. In einem abgesonderten Prozess werden Speicherzellen untersucht und weiterentwickelt. Damit leisten Sie auch einen Beitrag für die Zukunft der bundesweiten Energieversorgung.

Abgegrenzt hiervon werden innovative Wärmespeicher im systemanalytischen Bereich bewertet. Die optimale Dimensionierung der KWK-Systeme und der Wärme- sowie Stromspeichersysteme im Zusammenhang mit der Betriebsweise der Anlagen ist der Kernpunkt dieses Projektes und wird auf Testständen im Labor und in Referenzobjekten in der InnovationCity Ruhr | Modellstadt Bottrop analysiert.

Die abgeleiteten Erkenntnisse können somit zur Erreichung der KWK-Ausbauziele der Landesregierung NRW beitragen und stellen daher ein wichtiges Element zur Umsetzung der Energiewende dar.

**WIE KANN ICH MITMACHEN?**

Grundvoraussetzung ist, dass Sie bereits an dem Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ teilgenommen haben und eine „stromerzeugende Heizung“ in Ihrem Haus betreiben. Hinzu kommen weitere technische und bauliche Faktoren, die bei Begehungen des Gebäudes untersucht werden.

**WAS PASSIERT, WENN ICH AM PROJEKT TEILNEHME?**

Als KWK-Anlagenbetreiber in Bottrop erhalten Sie im Rahmen des Projektes KWK plus Speicher einen elektrischen Energiespeicher für Ihre KWK-Anlage. Über die nächsten Heizperioden werden die Energieverbräuche evaluiert, um etwaige Optimierungspotentiale zu identifizieren.

Anhang 2: Projektflyer KWK Plus Speicher zur Information möglicher Teilnehmer.

InnovationCity Ruhr

# KWK PLUS SPEICHER

## PROJEKTABLAUF

### 16. November 2017

- Infoveranstaltung „KWK plus Speicher“
- Vorstellung der Auswahlkriterien für eine Projektteilnahme
- Bereitschaftsbekundung im Anschluss an die Veranstaltung erforderlich

### 4. Quartal 2017

- Besichtigung Ihrer Kellerräume zur Überprüfung der baulichen Eignung
- Prüfung der Auswahlkriterien

### 1. Quartal 2018

- Mitteilung über Möglichkeit der Teilnahme am Projekt
- Unterzeichnung Teilnahmevertrag und Nutzungsvereinbarung erforderlich
- Einbau der erforderlichen Technik
- Interview/Befragung vor und nach dem Einbau der Technik

### Im Anschluss

- Datenerfassung und Auswertung



Anhang 3: Projektablaufplan KWK plus Speicher.



Innovation City Management GmbH  
Südring-Center-Promenade 3  
46242 Bottrop

Ansprechpartner:

Dirk Böttger  
Projektmanager

Telefon: +49 2041 70-5043  
Telefax: +49 2041 70-55043  
dirk.boettger@icm.de

Bottrop, 13. Juni 2019

## KWK plus Speicher: Hinweis Marktstammdatenregister - Registrierungspflicht

Sehr geehrte Damen und Herren,

den Informationen der Bundesnetzagentur ist zu entnehmen, dass alle Betreiber von Stromerzeugungsanlagen (Solar, KWK, ortsfeste Batteriespeicher, u.a.) ihre Anlagen im sog. Marktstammdatenregister (MaStR) registrieren müssen. Das bedeutet, dass auch Sie verpflichtet sind, sowohl Ihre KWK-Anlage als auch den Stromspeicher unter [www.marktstammdatenregister.de](http://www.marktstammdatenregister.de) zu registrieren!

Die wesentlichen Informationen dazu sind in einem Flyer der Bundesnetzagentur und in einer Registrierungshilfe des MaStR zusammengestellt (siehe Anhang und unter <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStRHilfe/index.html>).

Das Register ist seit Anfang des Jahres online und es gelten, je nach Inbetriebnahme der Anlagen, unterschiedliche Fristen für die Registrierung. Für Neuanlagen z.B., die nach dem Start des Webportals in Betrieb genommen werden, gilt nach Inbetriebnahme eine einmonatige Frist zur Registrierung.

Für Ihre KWK-Anlage ist ebenfalls eine Registrierung erforderlich.  
„Bestehende EEG- und KWK-Anlagen mit einem Inbetriebnahmedatum vor dem 1.7.2017 haben für die Registrierung im MaStR 24 Monate nach Start des Webportals Zeit (bis zum 31.1.2021).“

Bei dieser Gelegenheit möchten wir noch ankündigen, dass wir Ihnen in Kürze ein letztes Mal den Fragebogen für die Mitmacher-Befragung zusenden werden. Für die abschließende Auswertung ist es von großer Bedeutung, dass Sie auch in dieser letzten Runde noch einmal die Fragen beantworten. Wir bedanken uns sehr herzlich für Ihre Unterstützung!

Mit freundlichen Grüßen

Maren Wenzel  
Projektleiterin (GWI)

Dirk Böttger  
Projektmanager (ICM)

Innovation City Management GmbH  
Südring-Center-Promenade 3  
46242 Bottrop  
www.icuhr.de  
info@icuhr.de

Telefon: +49 2041 70-5000  
Telefax: +49 2041 70-5025  
Sitz der Gesellschaft: Bottrop  
Amtsgericht Gelsenkirchen:  
HRB 11233

Geschäftsführer:  
Burkhard Drescher

NATIONAL-BANK AG Essen  
IBAN: DE10 3602 0030 0001 4524 36  
BIC: NBAG DE 33 XXX  
Steuernummer: 308/5807/1611  
USt-IdNr. DE279403692

## Anhang 4 Schreiben Marktstammdatenregister



Innovation City Management GmbH  
Südring-Center-Promenade 3  
46242 Bottrop

**Ansprechpartner:**

Ulrich Kaak  
Projektleiter  
Digitalisierung

Telefon: +49 2041 70- 5036  
Telefax: +49 2041 70-55036  
ulrich.kaak@icm.de

Bottrop, 7. Januar 2020

Per Mail

**KWK plus Speicher und Photovoltaik (PV)**

Sehr geehrte Damen und Herren,

die Frage nach der Kombinationsmöglichkeit von KWK plus Speicher mit einer Photovoltaikanlage ist immer wieder Bestandteil von Gesprächen mit Ihnen. Wir halten diese Kombination generell für sinnvoll. Wenn die Möglichkeit besteht eine PV-Anlage ebenfalls an Ihren Stromspeicher anzuschließen, kann dieser insbesondere in den Sommermonaten noch intensiver genutzt werden.]

Aus Sicht des Forschungsprojektes „KWK plus Speicher“ spricht nichts dagegen, wenn Sie sich für eine PV Anlage entscheiden. Wir möchten Sie in dem Fall nur bitten das GWI (Tel.-Nr.: [0201-Durchwahl](#)) zu kontaktieren, damit ggf. die Möglichkeit besteht einen zusätzlichen Zähler durch das GWI einbauen zu lassen. Nur so ist es möglich, zwischen dem erzeugten KWK Strom und dem PV Strom zu unterscheiden.

Für die Datenerhebung und -auswertung im „KWKplus Speicher“ Projekt wäre es zudem ideal, wenn die Kombination aus KWK und Stromspeicher einen Jahreszyklus ohne PV bestanden hat. Das ist jetzt aber größtenteils schon der Fall.

Zum Thema Photovoltaik besteht auch die Möglichkeit einer kostenlosen Beratung im ZIB am Südring-Center-Promenade 3. Beratungstermine können unter Tel.-Nr.: 02041 70500 vereinbart werden.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

Maren Wenzel  
Projektleiterin (GWI)

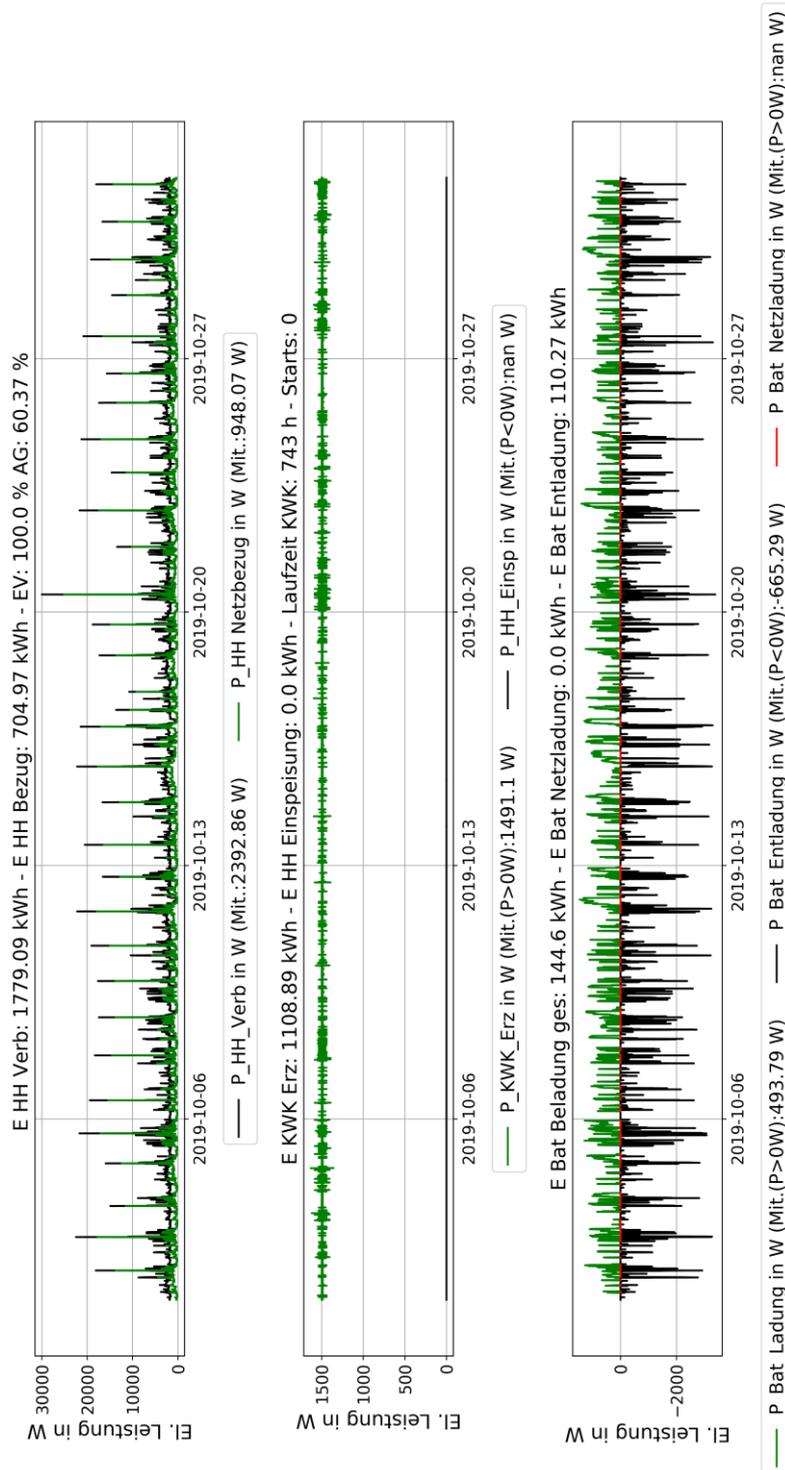
Ulrich Kaak  
Projektleiter (ICM)

Anhang 5 Schreiben zur Kombinationsmöglichkeit KWK +Speicher + PV

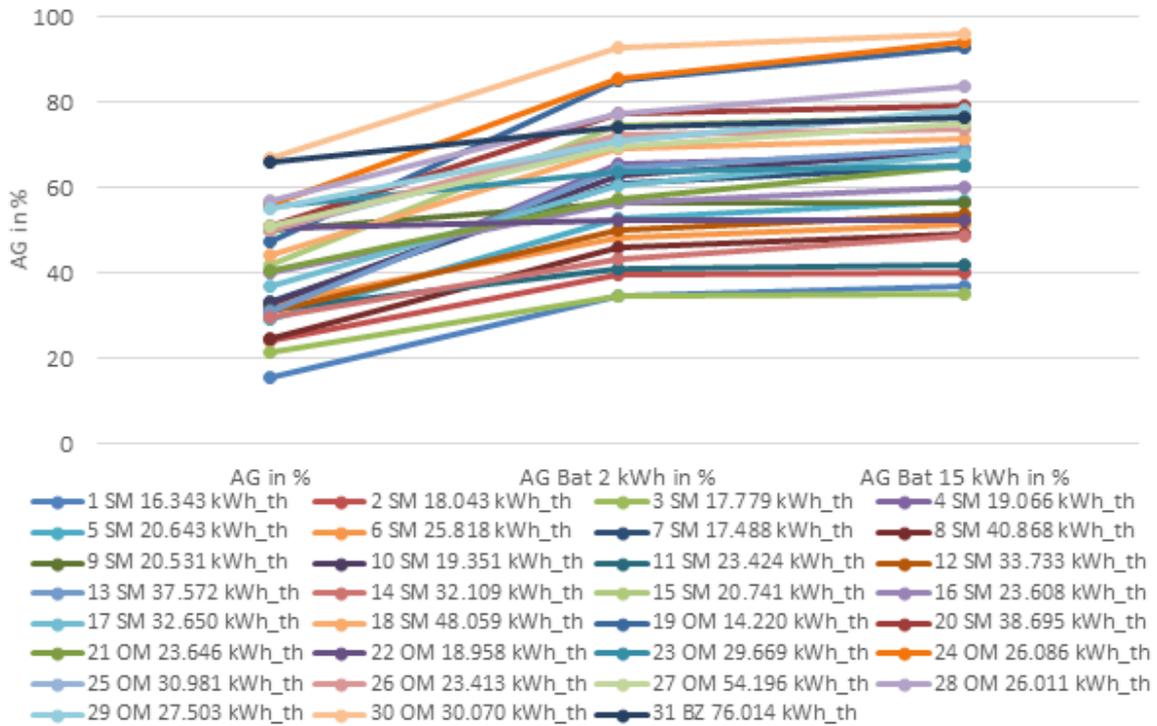
Gerät	Name	Prozess	Änderung durch Kalibrierung	Ausstattung
Waschbecken	Standard	Handwäsche	nein	1
Dusche	Standard	Ganzkörperpflege	nein	1
Badewanne	Nutzvolumen 150 l	Wannenfüllung	nein	1
Badewanne	Nutzvolumen 200 l	Wannenfüllung	nein	2
Spülbecken	Nutzvolumen 20 l	Normal	nein	1
Haartrockner	IW 1200 W	Normal	nein	1
Kochfeld	Bomann EH374G	Anbraten	nein	1
Kochfeld	Bomann EH374G	Braten	verlängert, mehr Leistung	1
Kochfeld	Bomann EH374G	Schmoren	verlängert, mehr Leistung	1
Kochfeld	Bomann EH374G	Kochen	verlängert, mehr Leistung	1
Kochfeld	Bomann EH374G	Kochen2	verlängert, mehr Leistung	1
Dunstabzugshaube	Siemens 260 W	Normal	Nein	1
Ofen	Bomann EH374G	Erhitzen	längere Takte	1
Ofen	Bomann EH374G	Backen	längere Takte	1
Mikrowelle	Samsung RE2900	Auftauen	nein	1
Mikrowelle	Samsung RE2900	Erwärmen	nein	1
Mikrowelle	Samsung RE2900	Dampfgaren	nein	1
Kaffeemaschine	Essence HT7613	500ml	nein	1
Kaffeemaschine	Senseo HD7810	2 gr. Tassen	nein	2
Wasserkocher	Grossag WK45	500ml	nein	1
Geschirrspüler	ESF4142 (A)	Normal	mehr Leistung	1
Geschirrspüler	ESF4142 (A)	Schnell	mehr Leistung	1
Geschirrspüler	ESF4142 (A)	Bio	mehr Leistung	1
Waschmaschine	Privileg 70514 (A)	30°C	nein	1
Waschmaschine	Privileg 70514 (A)	40°C	nein	1
Waschmaschine	Privileg 70514 (A)	60°C	nein	1
Waschmaschine	Privileg 70514 (A)	95°C	nein	1
Wäschetrockner	Bosch WTE861 (B)	Normal	nein	1

Gerät	Name	Prozess	Änderung durch Kalibrierung	Ausstattung
Staubsauger	AEG V160	20 Min	nein	1
Bügeleisen	Ciatronic	20 Min	nein	1
Lampe Wohnz.	Bemessung: 50lx	Normalbetrieb	nein	1
Lampe Wohnz.	Bemessung: 100lx	Normalbetrieb	nein	2
Lampe Schlafz.	Bemessung: 50lx	Normalbetrieb	nein	1
Lampe Schlafz.	Bemessung: 100lx	Normalbetrieb	nein	2
Lampe Nebenz.	Bemessung: 50lx	Normalbetrieb	nein	1
Lampe Nebenz.	Bemessung: 100lx	Normalbetrieb	nein	2
Lampe Flur	Bemessung: 50lx	Normalbetrieb	nein	1
Lampe Flur	Bemessung: 100lx	Normalbetrieb	nein	2
Lampe Küche	Bemessung: 50lx	Normalbetrieb	nein	1
Lampe Küche	Bemessung: 100lx	Normalbetrieb	nein	2
Lampe Bad	Bemessung: 50lx	Normalbetrieb	nein	1
Lampe Bad	Bemessung: 100lx	Normalbetrieb	nein	2
Fernseher	Panas. Viera	Normalbetrieb	nein	1
Fernseher	Philips 42PFL	Normalbetrieb	nein	1
Set-Top-Box	Mix	Normalbetrieb	nein	1
Set-Top-Box	Mix	Normalbetrieb	nein	1
Audio-Gerät	Pioneer X-HM71	Normalbetrieb	nein	1
PC	Celsius M470	Normalbetrieb	nein	1
Kühlschrank	AEG Santo 163	Normalbetrieb	mehr Leistung	1
Kühlschrank	Siem. KG-Kombi	Normalbetrieb	mehr Leistung	2
Gefrierschrank	Siem. GS34NA31	Normalbetrieb	mehr Leistung	1
IT Infrastruktur	Mix 1	Normalbetrieb	mehr Leistung	1
IT Infrastruktur	Mix 2	Normalbetrieb	mehr Leistung	2
IT Infrastruktur	Mix 3	Normalbetrieb	mehr Leistung	3

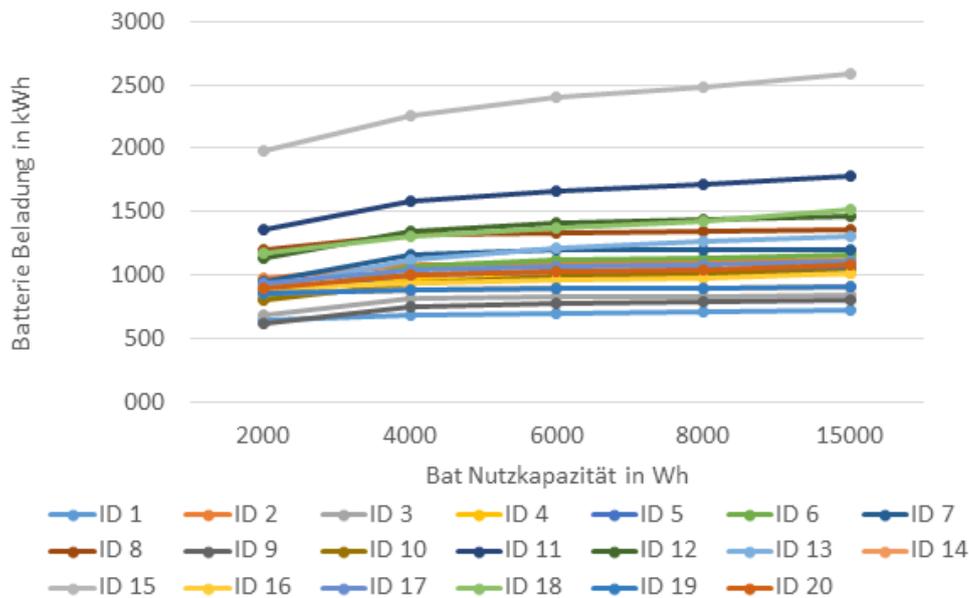
Anhang 6: Berücksichtigte Geräte zur Generierung der Stromprofile (Ausstattung 1: niedrig; 2: mittel; 3: hoch)



Anhang 7: Monatsprofil des elektrischen Verbrauchs, dem Netzbezug, der KWK-Erzeugung, der Einspeisung, der KWK-Laufzeit, Batterie Be- und Entladung in Watt eines Objektes welches mit einer 1,5 kW Brennstoffzelle sowie einer 15 kWh Batterie ausgestattet ist für den Zeitraum Oktober 2019. Beispielmonat für störungsfreien Betrieb.



Anhang 8: Simulationsergebnisse für 31 Objekte, welche zur Zuordnung und Dimensionierung der Batteriespeicher genutzt werden. Hierzu wird jeweils die AG ohne Batterie, mit einer 2 kWh Batterie sowie einer 15 kWh Batterien in % dargestellt. Hierbei wurden Haushalte von 1-31 nummeriert sowie die KWK-Technologie und der thermische Energieverbrauch des Objektes im Titel ergänzt.



Anhang 9: Simulationsergebnisse für 20 Objekte, welche zur Zuordnung und Dimensionierung der Batteriespeicher genutzt werden. Hierzu wurde die bei unterschiedlicher Dimensionierung der Batterie zwischenspeicherbare Energie berechnet.

Anhang 10: Übersicht über die während der Installation und Monitoring aufgetretenen Fehler bei unterschiedlichen Batteriemodellen in den jeweiligen Objektpaaren.<sup>14</sup>

	KWK	$P_{KWK}^{Nenn}$	$C_{Bat}^{Nutz}$	Betrifft beide Batterien	Betrifft eine Batterie
1	OM	1	1,98	Ausfall der NutzerInnen-App (wurde bis Projektende nicht wieder freigeschaltet)	Anlage hat anfänglich wiederholt automatisch in Standby geschaltet
	OM	1			Ausfall der Batterie für ca. 2,5 Wochen für – Ursache ungeklärt
2	SM	1	3,00	Wechsel des Routers hat zu kurzem Ausfall geführt	
	SM	1			keine Störung im Betrieb
3	SM	1	5,00		keine Störung im Betrieb
					Batterie ist öfter in Störung getreten und wurde nicht entladen. Teilweise hohe Netzladung trotz hohem SoC Kommunikationsstörung zwischen Zähler und Wechselrichter, verursacht durch Switch.
4	SM	1	3,87	keine Störung im Betrieb	
	SM	1			
5			4,80		Teilweise hohe Netzladung trotz hohem SoC Verpasste Softwareupdates führen zu kurzzeitiger Störung -> Konnte vom Nutzer selbst nicht behoben werden
	SM	1			Störung durch Tausch des WLAN Routers
6	SM	1	4,00	Anfänglich nur Be- und Entladung mit voller Leistung aufgrund von Fehler in Kommunikation von Switch und Wechselrichter	
	OM	1			
7	OM	1	5,90	keine Störung im Betrieb	
	SM	1			
8	OM	1	6,00	Batterie belädt teilweise unkontrolliert aus dem Netz und Hersteller konnte den Fehler nicht beheben/ ist insolvent	
	SM	1			
9	SM	1	7,68	keine Störung im Betrieb	
	OM	1			
10	BZ	1,5	15,00		
11	OM	4,7	13,50	keine Störung im Betrieb	

<sup>14</sup> Alle aufgetretenen Fehler wurden an die Hersteller übermittelt. In vielen Fällen wurden die Fehler in Kooperation mit den Herstellern behoben.

## Anhang 11: Zusammengefasster des ASUE Leitfadens welcher Schritte zur Inbetriebnahme von kleinen Blockheizkraftwerken beschreibt. [42]

Antrag für Netzanschluss (ANA)	Wenn Netzverträglichkeit bestätigt, muss der Strom-Netz-Betreiber die Freigabe zum Betrieb einer KWK-Anlage & der Einspeisung des nicht selbst verbrauchten Stroms in das vorgelagerte elektrische Verteilnetz erteilen. Dafür wird ein Antrag für neuen bzw. geänderten Netzanschluss (ANA) und den Betrieb einer Eigenerzeugungsanlage benötigt. Dazu sind dem Netzbetreiber weitere, anschlussrelevante Unterlagen, wie z.B. Schaltpläne, Datenblätter, Konformitätsnachweise) einzureichen. Die Formulare befinden sich i.d.R. auf den Internetseiten des Netzbetreibers
Abstimmung Messkonzept	Es ist ratsam mit dem Netzbetreiber die Übernahme des Messstellenbetriebs (Einbau, Betrieb und Wartung) abzuklären. I.d.R. ist es die Aufgabe des Betreibers des örtlichen Energieversorgungsnetzes. Optional kann der Messstellenbetrieb auf einen Dritten oder sich selbst übertragen werden. Nach Fertigstellung des Zählerplatzes muss die Zählermontag/ Zähleraustausch beantragt werden. Die Abläufe sind in Zusammenarbeit mit dem Elektrofachbetrieb mit allen Beteiligten zu koordinieren.
Planung Inbetriebnahme	Termin für Aufnahme des ersten Netzparallelbetriebs mit dem Netzbetreiber und ggf. Messstellenbetreiber, eventuell mit Abnahme und Inbetriebnahme eines neuen Netzanschlusses. Ca. eine Woche vor Inbetriebnahme muss dem Netzbetreiber ein Inbetriebsetzungsauftrag übergeben werden.
Meldepflichten bei Inbetriebnahme	Inbetriebnahme nimmt der Anlagenbetreiber bzw. das Installationsunternehmen vor. Diese muss den Netzbetreiber angezeigt werden (Datenblätter nach VDE-AR-4105: F1 (Inbetriebsetzungsprotokoll) und F2 (Datenblatt für Erzeugungseinheiten)) Gleichzeitig muss der Messstellenbetreiber die Messeinrichtung in Betrieb nehmen. Bei kundeneigenen Einspeisezählern muss dem Netzbetreiber ein Datenblatt der Messeinrichtung gesendet werden.
Abnahme Abgasführung	Bei Inbetriebnahme (Feuerstättenabnahme) erfolgt Abnahme der Abgasrohrführung, Prüfung der Anschlüsse und des Funktionsprinzips durch den Bezirksschornsteinfeger. Zusatzheizung müssen ebenfalls geprüft werden, dazu erfolgt eine schriftliche Bestätigung.
Meldung Inbetriebnahme	Für die Förderung nach dem KWKG ist die Betriebsaufnahme dem BAFA zu melden. Der Hersteller o. Heizungsbauer erstellt ein Inbetriebnahmeprotokoll. Für neue Kleinstanlagen mit einer Leistung bis 50 kW <sub>el</sub> gibt es ein vereinfachtes Zulassungsverfahren der BAFA auf Grundlage einer Allgemeinverfügung. Bei Erfüllung der Anforderungen für eine vereinfachte Zulassung genügt eine elektronische Anzeige beim BAFA.
Registrierung Markstammdatenregister	Nach Markstammdatenregisterverordnung (MaStRV) müssen Betreiber von KWK-Anlage sich und die von ihnen betriebenen Anlagen registrieren. Das muss spätestens 1 Monat nach Inbetriebnahme der Anlage erfolgen und ist maßgeblich für den Anspruch auf Zahlung nach EEG/KWKG.
Erzeugungszähler melden bei Eichamt	Wird der Messstellenbetrieb selbst übernommen (nicht durch grundzuständigen/wettbewerblichen Messstellenbetreiber durchgeführt), muss geeichter Erzeugungszähler innerhalb von 6 Wochen nach Inbetriebnahme dem Eichamt gemeldet werden.

Regelung Vergütungszahlung	Vergütungszahlung des erzeugten und eingespeisten Stromes muss mit entsprechend dem KWKG mit dem Netzbetreiber geregelt werden. Dazu gehört die Erklärung zur umsatzsteuerlichen Behandlung des Betreibers (Regelunternehmerschaft o. Kleinunternehmerregelung nach §19 Umsatzsteuergesetz). Dafür muss das Formular „Erklärung zur Vergütungszahlung“ beim Netzbetreiber eingereicht werden. Weitere Unterlagen für den Netzbetreiber sind: Kopie der Anmeldung beim BAFA, bzw. bei Anlagen, die nicht unter die Allgemeinverfügung fallen, die Zulassungsbescheinigung.
Nachweis Verwendung Fördermittel	Geforderte Verwendungsnachweise sind für in Anspruch genommene Investitionszuschüsse und Förderprogramme zu führen. I.d.R. bringt das installierende Unternehmen die Unterlagen bei.
Antrag stromsteuerliche Versorgererlaubnis	Bei Belieferung von Letztverbrauchern mit Strom aus der KWK-Anlage wird der Status eines stromsteuerlichen Versorgers erlangt. Das muss beim zuständigen Hauptzollamt gemeldet werden.

## Anhang 12: Ausschnitt problemzentriertes Interview.

TN: *“Also wir sind da schon sehr begeistert, weil wir das auch als eine Möglichkeit sehen jetzt in der Diskussion um die fossilen Brennstoffe, dass jedes Haus selbst für sich sorgt. Und das ist ja eine relativ einfache Sache, die nimmt nicht viel Platz weg. Früher hat man gesagt, das ist zu laut, es ist überhaupt nicht laut. Ich halte das für eine sehr gute Sache. Der einzige Haken daran ist, dass es teuer in der Anschaffung ist. Also ich weiß jetzt nicht, ob wir - mein Mann hat das mal durchgerechnet - ob wir in unserem Alter, wenn wir die Investition selbst getragen hätten, das hätte sich nicht getragen. Ok, in Kosten denken ist nicht alles, aber wir sind jetzt froh, dass sich jetzt diese Möglichkeit ergeben hat.”*

## Anhang 13: Ausschnitte problemzentriertes Interviews.

TN: *„Mit dieser Zollabrechnung, die wir hatten. Das war voriges Jahr ein Mordstheater. Dieses Jahr habe ich das so gemacht, wie der Zoll das haben wollte, aber dann bekam ich das einmal wieder. Das war ich schuld, weil die umgezogen sind und ich die neue Adresse nicht hatte. Und dann bekam ich das hinterher wieder, weil ich ein Formular nicht eingereicht hatte. Aber dieses Formular hatte ich letztes Jahr eingereicht. Nein, in dem alten Formular war aber wieder eine Frage dazu gekommen und das war dann Ausgabe Januar 2019 und das hatte ich nicht.”*

TN: *“Ich mein, das muss Europäisch geregelt werden mit dem Zoll, das ist mir klar. Aber wir sind im Eigenverbrauch! Warum muss hinter diesem kleinen Verbrauch und hinter dem Wenigen, das wir ins Netz einspeisen so ein großer bürokratischer Wurm hängen? Das kann man doch anders regeln. Da kann man doch sagen, bis so und so viel Einspeisung fällt das wegen Nichtigkeit unter den Tisch. Also das habe ich nicht verstanden.”*

TN: "Bürokratismus und vor allem Zollamt haben wir so schlechte Erfahrungen gemacht. Ende des Jahres haben wir wieder die Mehrwertsteuer beantragt, vom Zollamt und es ist immer Stichtag der 31. Dezember, dann muss der Antrag da sein. Dann haben wir das Mitte Dezember gemacht und irgendwann im Januar haben wir dann Bescheid bekommen, der Antrag ist zu spät eingegangen. Weil die umgezogen sind. An die Adresse von vorher geschickt, aber die sind umgezogen, dadurch ist der Antrag bei denen angeblich erst zum 4 Januar eingegangen, und dann waren wir raus. [...] Die haben sich darauf berufen, dass wir das an die falsche Adresse geschickt haben. Das ist aber wieder so typisch für das Zollamt. Wir haben von Anfang an Schwierigkeiten mit dem Hauptzollamt."

WAZ 17.08.2018

## 20 KWK-Betreiber speichern Strom

In einem weiteren Forschungsprojekt erhalten Hausbesitzer für ihre Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen Geräte, die eine spätere Energieentnahme erlauben

Vier fünf Jahren begann die Innovation City Gesellschaft mit dem Projekt „200 KWK-Anlagen in Bottrop“. Daraus wurden hunderte Strom produzierende Heizungsanlagen, die nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) funktionieren, in Bottroper Heizungskellern eingebaut. Nun folgt das Projekt „KWK plus Speicher“. Darin erhalten 20 Besitzer der gasbetriebenen Anlagen einen Batteriespeicher, so dass der erzeugte Strom auch zeitversetzt genutzt werden kann.

### Innovation City

„Aktuell liegt unser Eigenverbrauch bei dem Strom aus der KWK-Anlage bei 65 bis 70 Prozent. Das wird zukünftig durch den Speicher hoffentlich noch mehr“, berichtet das Ehepaar Gröbe, das einen der 20 Batteriespeicher erhalten wird. In der zweiten Jahreshälfte soll der Einbau aller Speicher beginnen. „Ohne die Förde-



Bereit zum Mitsprechen: Ehepaar Gröbe (v.l.) vor ihrer KWK-Anlage, Alexandra Boller vom GfH und Simone Reichardt von der ICM (Z+K) besichtigen die Batterie anlässlich der Vertragsunterzeichnung für das Folgeprojekt.

rung im Rahmen des Innovation City-Projektes sähe unsere finanzielle Bilanz bislang nicht ganz so attraktiv aus“, sagen sie. „Es gibt uns ein gutes Gefühl, unseren eigenen Strom zu produzieren, zumal wir gleichzeitig auch unser Hei-

verhalten durch die neue Technologie optimieren.“

Technisch laufe mit der KWK-Anlage alles gut. „Aber das Drumherum, beispielsweise die Abwicklung mit dem Finanzamt, ist teilweise recht aufwändig.“ Obwohl sie sich des bürokratischen Aufwands verbunden mit dem Betrieb der KWK-Anlage und des hin- und herkommenden Speichers bewusst sind, freuen sich die Betreiber schon auf das Folgeprojekt. Es ist übrigens ebenfalls ein Forschungsvorhaben.

Hocheffiziente KWK-Systeme sind ein wesentlicher Bestandteil der Klimaschutzstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen. Das Projekt „KWK plus Speicher“ soll

wichtige Erkenntnisse auf dem Weg vom Labor in die Praxis liefern. Dazu werden unterschiedliche, bereits auf dem Markt verfügbare Batteriespeicher bei den 20 ausgewählten Projektteilnehmern analysiert. So soll erforscht werden, welcher Speicher zu welcher Anlage passt und wie die Nutzung künftig flexibilisiert werden kann. Das bedeutet, dass der erzeugte Strom durch den Stromspeicher zukünftig auch zu Zeiten, in denen die Heizung keinen Strom erzeugt, verbraucht werden kann.

Das Gas- und Wärme-Institut Essen übernimmt erneut die Projektleitung, die Innovation City Management GmbH (ICM) ist für die Kommunikation verantwortlich.

### Über 200 Einzelprojekte

- Seit 2010 werden in Bottrop innovative Ideen und Lösungen entwickelt, wie den Herausforderungen des Klima- und Strukturwandels im urbanen Raum begegnet werden kann.
- In dem „Labor Bottrop“ wird

durch Innovation City demonstriert, wie ein klimagerechter Stadtbau unter Berücksichtigung der Sicherung des Industriestandorts aussehen kann. Es wurden über 200 Einzelprojekte initiiert und zum Teil bereits abgeschlossen.

Anhang 14: Ausschnitt Pressearbeit (1)

2.1.13

# Baustein zur Energiewende

KWK-Systeme werden um Batteriespeicher erweitert

Heinz und Birgit Wehres erhielten jetzt hohen Besuch von Vertretern aus Stadt und Land: Oberbürgermeister Bernd Tischler kam, Franz Wilhelm Iven aus dem NRW-Wirtschaftsministerium, Prof. Klaus Görner vom Gas- und Wärme-Institut Essen (GWI), Burkhard Dreischer von der Innovation City Management GmbH (ICM) und Margit Thomczek von der Energieagentur NRW.

Anfang war die Inbetriebnahme eines elektrischen Speichers als Ergänzung zu einer KWK-Anlage (Kraft-Wärme-Kopplungsanlage). Die beiden sind Teilhaber des Forschungsprojektes „KWK plus Speicher“, das durch das Land NRW gefördert und von GWI geleitet wird. Der Speicher in ihrem Haus wird nicht der einzige in Bottrop. Neben geplant sind 20 - Installationen werden diese bei den Teilnehmern des vorherigen Projektes „500 KWK-Anlagen in Bottrop“.

Die Integration, der Betrieb und die Einbindung in das bestehende



Heinz und Birgit Wehres, aus Bottrop, erhalten hohen Besuch von Vertretern aus Stadt und Land

Foto: privat

nische Monitoring der Speicherspeicherung der Flexibilität der KWK-Systeme im Projektgebiet. Das GWI und seine Projektpartner analysieren die gewonnenen Daten und bewerten unter anderem die Wirtschaftlichkeit für den Einsatz von elektrischem Speicher in Verbindung mit Mikro-KWK-Systemen. Die Installationen werden zudem durch eine sozialwissenschaftliche Nutzer-Analyse zur stundenspezifischen Erfassung von strom- und leistungsbezogenen psychologischen Variablen begleitet. Zudem werden Systemkombinationen im Labor unter reproduzierbaren Bedingungen analysiert und Untersuchungen im Bereich der Grundlagenforschung zur Verbesserung der Batterie-Chemie unternommen.

„Durch den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen in Kombination mit einem Batteriespeicher kann der produzierte Strom im Objekt selber genutzt werden“, erläuterte Prof. Klaus Görner bei seinem Besuch in Bottrop, der das Projekt als Wissenschaftlicher Leiter des GWI durchführt. Er hatte Beispiele parat, was Familie Wehres mit ihrer Speicherkapazität von 3,85 Kilowattstunden machen kann: vier Stunden im Stück fliesen zum Beispiel oder 20 bis 30 Stunden lang den Computer betreiben.

Ob Bernd Tischler berichte bei dem Termin von den vielen Medienanfragen zum Ende des Besuchs. „Die Wissenschaftler interessiert alle, wie Bottrop von der Kohlestadt zur Innovation City wurde.“ Im Labor Bottrop würden neue Techniken umgesetzt und ausprobiert, wie auch „KWK plus Speicher“ zeige. „Nach Auswahl der technischen und finanziellen Kriterien, die das GWI ausgewertet hat, wurde nun der Speicher von einem lokalen Bottroper Installateur eingebaut und bei Familie Wehres in Betrieb genommen“, erläuterte Tischler. Bottrop trage mit den Forschungsprojekten im Mikro-KWK-Anlagenbetrieb einen wichtigen Baustein zur Energiewende im öffentlichen und im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor bei.

Anhang 15: Ausschnitt Pressearbeit (2)



## „Wir sind unsere eigenen Stromerzeuger“

*Sie wissen nicht genau, was eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage ist? Dann sind Sie nicht alleine! Die Bürgermeisterin vom Geräte erfahren eine ausführlich über die Aufschwung in Privathäusern. Das haben sie ihrem geringen CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verdanken. Familie Häfner hat dies überzogen, daher schloss sie sich einem besonderen Projekt an.*

Stadt Innovation City Management GmbH/Gisela Bönisch, hahere Strömung  
Fokus: KWK plus Speicher, KWK plus Speicher

Wenn Hager Häfner von Strom spricht, ist seine (bittere) Lüge wahr. Im Haus. Er meint die Heizung im Keller: eine gasbetriebene Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (KWK-Anlage) mit Zuluventilator. Seit einigen Jahren haben die Häfners eine Solaranlage in Betrieb in einem Anbau. Seit kurzem werden sie zudem einen Backofen geheizt. Und das alles im Namen der Heizung.

Das System der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (KWK-Anlage) ist, aber sie ist die Heizung im Keller: ein kleinerer als Wärme wird auf diese Weise erzeugt. Das Angebot des Projekts: „300 KWK“.

Ein hybrides Stromerzeugungssystem

„Ich bin begeistert, weil wir hier einen Stromerzeuger, eine Heizung, einen Zuluventilator und eine Wärmeenergieerzeugung und produziert nicht weniger Strom“ unter der Hand. „Zufall“ sagt jedoch die nachfolgende, ungewöhnliche PV-Anlage für eine hohe Energieerzeugung. Und im Keller, wenn die Stromerzeugung ausreicht, zündet die KWK.“ Hager Häfner freut sich, dass er dies System mit der Installation des elektrischen Systems für zu jeder Zeit haben kann. In einem Fall ist die Batterie mit einer Leistung von 10 Kilowatt eine weitere Möglichkeit, den KWK-Anlage, die auch für die Photovoltaik-Anlage.

**KWK-Technologie fürs Klima**

Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme gelten als hochflexibel und eignen sich für unterschiedliche Gebäude. Neben Wohnhäusern, auch Industrie- und Gewerbebetriebe, öffentliche Einrichtungen, Krankenhäuser, Schulen und Universitäten. Die Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage ist eine kompakte, modulare Einheit, die Wärme und Strom gleichzeitig erzeugt. Sie ist besonders geeignet für kleine bis mittelgroße Gebäude. Die KWK-Anlage ist eine kompakte, modulare Einheit, die Wärme und Strom gleichzeitig erzeugt. Sie ist besonders geeignet für kleine bis mittelgroße Gebäude.

**Das letzte Speichererzeuger**

„Ich bin in den Genuss des letzten Speichers des GW gekommen“, erzählt Hager Häfner und steht vor „No. 20“ im Keller seines Hauses. Er wurde Anfang April installiert und ist in Betrieb gekommen. Seitdem hat sich das persönliche Monitoring, das Hager Häfner parallel zur automatisierten Steuerung der Module und des Batteries, installiert. Was auch dazu beiträgt, dass die Batterie innerhalb einer Photovoltaik-Anlage mit einer Kapazität von 24 Kilowattstunden (kWh) betrieben. Hager Häfner hat die PV-Anlage im Keller von Marktstandort-Registrierung der Zuluventilator registriert.

**Energieerzeuger leben**

Unter der Haube liegt in Hager Häfners Tag morgens um 5.30 Uhr im Keller in einem großen, dunklen Metallgehäuse, das die KWK-Anlage ist und von der KWK-Anlage erzeugt wird. Als nächstes geht er die Stromerzeugung und Stromerzeugung, wie viel Strom er die KWK-Anlage produziert und wie viel Strom die PV-Anlage produziert. „Die KWK-Anlage ist ein Gerät, das die KWK-Anlage produziert und wie viel Strom die PV-Anlage produziert.“

„Die KWK-Anlage ist ein Gerät, das die KWK-Anlage produziert und wie viel Strom die PV-Anlage produziert.“

„Die KWK-Anlage ist ein Gerät, das die KWK-Anlage produziert und wie viel Strom die PV-Anlage produziert.“

„Die KWK-Anlage ist ein Gerät, das die KWK-Anlage produziert und wie viel Strom die PV-Anlage produziert.“



Ein kleiner Einblick in die KWK-Anlage im Keller. Die KWK-Anlage ist ein Gerät, das die KWK-Anlage produziert und wie viel Strom die PV-Anlage produziert.

### Wie funktioniert eine Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage?



Zunächst wurden KWK-Anlagen vor allem in Kfz-Werkstätten genutzt, doch der Einsatz in Privathäusern nimmt zu. Das Prinzip ist es sich einfach: KWK-Anlagen erzeugen gleichzeitig Strom und Wärme, die die Bewohner direkt vor Ort nutzen. So wird die parallel zur Stromerzeugung produzierte Wärme für die Heizung und Warmwassererzeugung verwendet. Der eingesetzte Brennstoff wird gewissermaßen doppelt genutzt, sodass weniger Primärenergie verbraucht wird. Falls die selbst produzierte Energie nicht ausreicht, wird automatisch Strom aus dem öffentlichen Stromnetz gezogen. Der eigene Stromüberschuss wiederum wird ins allgemeine Stromnetz eingespeist. Die Technologie gilt als sehr effiziente Form der Energiegewinnung mit einem Gesamteffizienzgrad von bis zu über 90 Prozent.

Die Größe eines Kraftwerks für die Funktion einer Kraft-Wärme-Kopplung. Die Größe ist unterschiedlich und variiert zwischen 100 bis 1000 Kilowatt (kW). Die Größe ist unterschiedlich und variiert zwischen 100 bis 1000 Kilowatt (kW).

Wichtig ist Kauf. Ausgerechnet letztes Jahr im Herbst haben Häfners die bereits keine Heizung und kein warmes Wasser gehabt. „Im 1.4 Uhr hat der Installateur die Anlage zum Laufen gebracht, um 1.6 Uhr kamen die Gäste“, erinnert sich Hager Häfner und lächelt in der Nachbarnschaft.

**Nach einige Stunden ablassen**

Bürgermeisterin Gisela Bönisch, Geschäftsführerin der Innovation City Management GmbH, heißt, dass das Projekt „KWK plus Speicher“ dazu beitragen wird, dass sich mehr Menschen selbst mit Energie versorgen können. „Das ist unser Ziel, denn es macht viel mehr Sinn, den Strom selbst zu nutzen, als ihn einzukaufen.“ Darüber hinaus ist allerdings an, dass für eine entsprechende Energieerzeugung von unten nach oben abgebaut werden müssen. „Unbedingt erforderlich ist eine Einzelkabelanlage des KWK-Anlagenbetriebs. Viele Nutzer sind mit der Administration überfordert.“

**Private als Unternehmer**

Hager Häfner hat sich in die sehr komplizierte Bürokratie versagt. Da sein Überschlag Strom in die öffentliche Netz ein-

### Was hat es mit der Laborstadt Bottrop zu sich?



Die Stadt in Bottrop hat im letzten Jahr ein neues Modell. Das Modell heißt: Energieerzeugung von unten. Mit verschiedenen Projekten hat Innovation City Bottrop die Laborstadt seit 2010, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß innerhalb von zehn Jahren zu halbieren. Neben Energieerzeugung im Bestandsbau, zählt auch das Kraft-Wärme-Kopplungs-Projekt dazu. In 100 Privathäusern wurden KWK-Heizungsanlagen installiert. Verkauf wurden 48 CO<sub>2</sub>- und 40 Stromerzeugern sowie 1000 Kilowattstunden (kWh) anliegen. Ziel ist, unterschiedliche Anlagen in verschiedenen Gebäudetypen zu testen und herauszufinden, unter welchen Bedingungen die jeweilige KWK-Anlage optimal läuft, sodass sich flexible Brennstoffe und somit CO<sub>2</sub> einsparen lassen. Beim Projekt „KWK plus Speicher“ sind Betriebskosten auf Basis von Lithium oder Blei im Einsatz. Es wird erbracht, welcher Speicher am besten zu welcher Anlage passt und wie die Nutzung Flexibilität werden kann.

Im April sind hat die KWK-Anlage der Häfners einen Auslieferungstermin erhalten. Es wird ebenfalls im Winterbetrieb auslaufen, der Geräteprüfung in Nachbarnschaft werden.

gründet wird, ist er auf einem Schlag zum Stromproduzenten und somit zum Unternehmer geworden. Einmal im Jahr steht daher die Umsatzverteilung an. Das ist eine Welt für sich. Was Hager Häfner sein Ausleben über die Formulare ganz besonders zum Kaufschon bringt, sind die unterschiedlichen Abschlagszahlungen, zum Beispiel von Hausbauern und Energieerzeugern. „Das sind wirklich Hürden“, erinnert er, „aber die Rechenzentren schaffen eine Angliederung schneller nicht.“

Als auch Familie Häfner für das Projekt „300 KWK-Anlagen in Bottrop“ meldete, war die alte Heizungsanlage bereits 23 Jahre alt. Die neue Technik hatte sie genau, die alte Heizungsanlage gab dann letztlich den Ausschlag. Denn die Nachbarnschaft liegt dem Betrieb schon länger am Herzen. Lange Tage kommen für sie wegen des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks nicht in Frage. Eine Blumenweise für Blumen und andere Maschinen ist schon angelegt. Das Thema ist auch wichtig, was wegen im Auftrag der Ressourcenplanung und Klimaforschung.



Immer dieses Gehäuse befindet sich der Speicher. Bei der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage entsteht.

Alle Sicherungen und Zähler haben eine Beschriftung, so kann beim nächsten Mal das Gehäuse, Hager Häfner behält die Daten eines im Blick und orientiert sich richtig.

So sieht die Stromerzeugung von KWK- und Photovoltaik-Anlage in Stromerzeugung und Stromerzeugung aus.



Es ist ein gutes Gefühl, wenn alle Geräte in der Küche – von Backofen bis zum Wärmehochherd – mit dem eigenen Strom versorgt werden können. Im Wohnzimmer sitzt ein Kaffeehaus für Geschäftskunden, das der Leihplatz von Hager Häfner und Bönisch vorbehalten.

Anhang 16: Ausschnitt Pressearbeit (3)

**Seite:** 11  
**Ressort:** Lokales  
**Mediengattung:** Tageszeitung  
**Jahrgang:** 2019

**Nummer:** 0  
**Auflage:** 11.096 (gedruckt) 12.521 (verkauft) 12.587 (verbreitet)  
**Reichweite:** 0,038 (in Mio.)

# KWK-Anlagen stabilisieren Stromnetz

Bottrop wird Teil des Designnetzes. Das Projekt erforscht, wie die Energiewende gelingen kann. Interaktive Stele am Söding-Center gewährt Einblicke ins Thema.

Von Matthias Dörmaylag

In Bottrop-Außen stehen 130 Millionen KWK-Anlagen. Die Anlagen sind vor allem in der Industrie zu finden. Sie sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme. Sie sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme. Sie sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme.



Neue Stele vom Gas- und Wasserkraft Center präsentiert die Vorteile der neuen Stele vor dem Söding-Center. Sie bietet Einblicke in die Energiewende.

**Bottrop ist einer von 30 Designnetzen**

Bottrop und die Innenstadt City werden zu einem von 30 Designnetzen im Projekt Designnetz. In diesem Projekt werden die vielen kleinen Projekte in NRW, die heute noch als Einzelprojekte existieren, zu einem zusammenhängenden Netz und in die Zukunft der Energiewende zu integrieren. Die KWK-Anlagen sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme. Sie sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme.

Die vier physischen KWK-Anlagen im Söding-Center sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme. Sie sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme. Sie sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme.

Wichtig ist auch die Integration der KWK-Anlagen in das Stromnetz. Das Designnetz erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Designnetz erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Designnetz erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können.

Das Designnetz erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Designnetz erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Designnetz erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Designnetz erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können.

**Collibri: vom Brand**



Die vier physischen KWK-Anlagen im Söding-Center sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme. Sie sind ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Sie produzieren Strom und Wärme.

Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können.

Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können.

Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können. Das Projekt ist ein wichtiger Baustein für die Energiewende. Es erforscht, wie die KWK-Anlagen in das Stromnetz integriert werden können.

Anhang 17: Ausschnitt Pressearbeit (4)