



Abschlussbericht zum Verbundprojekt

100 KWK-Anlagen in Bottrop

Vom Labor in die Demonstration
KWK-Modellversuch zur CO₂-Reduktion
in der Innovation City

Aktenz.: 64.65.69 - PRO - 0051 A



Gefördert durch:



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Ziel2.NRW
Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung

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



Diese Veröffentlichung ist wie folgt zu zitieren:

M. Schmidt, F. Burmeister, R. Albus (Hrsg.): *100 KWK-Anlagen in Bottrop – Vom Labor in die Demonstration – KWK-Modellversuch zur CO₂-Reduktion in der Innovation City*; Abschlussbericht zum Verbundprojekt; Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Institut Energiesysteme und Energiewirtschaft der Hochschule Ruhr West, Innovation City Management GmbH (2016).

Die Inhalte der Teilkapitel liegen in der Verantwortung der jeweiligen Institute und beziehen sich auf den Sachstand im September 2015, sofern nicht anders gekennzeichnet.

Autoren

Gas- und Wärme-Institut Essen (GWI)

Michael Schmidt
Maren Wenzel
Dr. Manfred Lange
Jörn Benthin
Mustafa Flayyih
Nadine Lefort
Tim Hanisch
Frederic Frankenhoff
Kai-Florian Scholten
Frank Burmeister
Dr. Rolf Albus
Prof. Dr. Klaus Görner

Hochschule Ruhr West (HRW)

Institut Energiesysteme und Energiewirtschaft

Sven Kühnel
Marcel Schönknecht
Prof. Dr. Viktor Grinewitschus

Innovation City Management GmbH (ICM)

Jannis Heuner
Kamil Folta
Heinz-Eberhard Stapelmann
Ulrich Kaak

Management Summary

Motivation und Hintergrund

Zur Begrenzung negativer Folgen des Klimawandels hat die Landesregierung NRW verbindliche Einsparziele im Klimaschutzgesetz festgelegt. Die Reduktion der Treibhausgasemissionen um 25 % bis 2020 gegenüber 1990 hat dabei größte Priorität. Der Ausbau hocheffizienter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) soll hierbei wesentlich zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen. Dementsprechend soll der KWK-Anteil an der Gesamtstromerzeugung bis 2020 auf mindestens 25 % gesteigert werden.

Das Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ ist eine wesentliche Komponente der KWK-Ausbaustrategie in NRW. Das Projekt baut auf den Ergebnissen der DVGW-Innovations-offensive auf. Umfangreiche Laboruntersuchungen, praxisnahe Langzeituntersuchungen sowie Simulationsrechnungen bilden die Grundlage für Konzepte und Handlungsempfehlungen für den effizienten und ökonomischen Einsatz von KWK-Systemen in der Praxis. Eine darauf aufbauende Praxis- und Demonstrationsphase ermöglicht die Weiterentwicklung, Optimierung und Marktetablierung der Technologien für den Einsatz im Wohnungs- und Gewerbesektor. Die erfolgreiche Umsetzung des Projekts fördert somit die Verbreitung und Netzintegration der innovativen und hocheffizienten Mikro-KWK und Brennstoffzellen.

Ziel des Projekts

Ziel des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ ist die Demonstration der Reduktion der CO₂-Emissionen und damit des Primärenergiebedarfs durch den Einsatz von KWK-Systemen in einem erweiterten Projektgebiet der InnovationCity. Mit der Umsetzung des Projekts in der Modellstadt Bottrop soll eine größtmögliche Übertragung der Ergebnisse auf andere Regionen in und außerhalb NRWs erzielt werden.

Weiteres Ziel des Projekts ist die Steigerung und Hebung von KWK-Potenzialen im Wohnungs- und Gewerbesektor. Auf diese Weise wird der Einsatz von Mikro-KWK- und Brennstoffzellen-Systemen gestärkt und beschleunigt. Die Ergebnisse des Projekts tragen somit zu einer nachhaltigen Minderung des Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen bei der Energieversorgung im häuslichen und gewerblichen Bereich bei.

Neben der ökologischen Bewertung stehen die Wirtschaftlichkeit sowie die optimierte Auslegung von Mikro-KWK-Systemen und deren Anlagenperipherie im Fokus des Projekts. Weiterführende Erkenntnisse zu technologischen Potenzialen und administrativen Herausforderungen ermöglichen interdisziplinäre Handlungsempfehlungen, welche den KWK-Ausbau zur Erreichung der klimapolitischen Ziele beschleunigen und fördern.

Methodisches Vorgehen

In einem erweiterten Gebiet der InnovationCity Modellstadt | Bottrop wurden in repräsentativen Gebäudetypen mit unterschiedlichen Wärmestandards 100 KWK-Systeme installiert. Das Technologieportfolio umfasst am Markt verfügbare Stirling- und Otto-motorische sowie brennstoffzellenbasierte KWK-Systeme verschiedener Leistungsklassen.

Die Installation und Inbetriebnahme wird dokumentiert und analysiert. Anschließend wird der Anlagenbetrieb und -service evaluiert. Dabei werden sowohl technische als auch administrative Anforderungen an den privaten Anlagenbetreiber, das Handwerk, die Hersteller und den Verteilnetzbetreiber betrachtet.

Die KWK-Systeme werden mit einer Datenerfassung ausgerüstet, sodass die zur Bewertung erforderlichen anlagen- und objektspezifischen Verbrauchsdaten kontinuierlich erfasst werden. Das Betriebsverhalten der KWK-Systeme in ausgewählten Referenzgebäuden wird zunächst qualitativ ausgewertet. Das Betriebsverhalten der Systeme wurde in unterschiedlichen Jahres- und Tageszeiten detailliert beschrieben und analysiert.

Im Hinblick auf einen „Vorher-Nachher-Vergleich“ des Energieeinsatzes und der CO₂-Einsparpotenziale werden insbesondere die Nutzungsgrade im realen Anlagenbetrieb ermittelt und wissenschaftlich analysiert. Zur ökologischen und ökonomischen Bilanzierung wurde eine Methodik entwickelt, welche die KWK-Systeme der zuvor genutzten Energieversorgung gegenübergestellt. Die Bilanzgrenze wird so gewählt, dass der gesamte vom KWK-System erzeugte und eingespeiste Strom sowie der Strombezug aus dem öffentlichen Netz berücksichtigt werden. Die Emissionen der Strombereitstellung wurden zunächst mit Bezug auf den Kraftwerkspark auf Bundesebene und anschließend auf Landesebene evaluiert.

Zur Ermittlung des Brennstoffbedarfs der konventionellen Wärmebereitstellung durch die Altanlagen wurden deren Jahresnutzungsgrade mit Hilfe eines theoretischen Ansatzes bestimmt. Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt in Anlehnung an das Berechnungsverfahren der Richtlinie VDI 2067, welches zum Zweck des Projekts angepasst wurde. Ergänzend wurden die CO₂-Einsparungskosten ermittelt.

Des Weiteren wurden die Gebäude und die Anlagentechnik modelliert. Darauf basierend wurden Simulationen durchgeführt, in welche die KWK-Anlagen, Hydraulik und Warmwasserspeicher integriert wurden. Die entwickelten Mehrzonen- und Einzonenmodelle wurden anhand der Messdaten validiert und in einer Jahressimulation genutzt, um allgemeingültige Aussagen abzuleiten.

In erweiterten Analysen wird der Netzeinfluss der KWK-Systeme bewertet. Dies erfolgt sowohl bilanziell als auch von elektrotechnischer Seite. Optionen und Potenziale zur Integration von E-Mobility und Home-Automation-Systemen werden identifiziert und bewertet. Hinsichtlich der Optimierung des KWK-Betriebs werden zeitlich differenzierte Analysen sowie eine umfassende Parametervariation durchgeführt. Ergänzend werden Tages- und Jahresverläufe analysiert, um den Einsatz und die Potenziale von Energiespeichern aufzuzeigen.

Ergebnisse und Kernaussagen

Durch das Projekt wurde aufgezeigt, dass eine Demonstration von 100 KWK-Systemen in einem kurzen Zeitraum möglich ist. Die interdisziplinäre Vorgehensweise zur strukturierten Auswahl, Zuordnung und abschließenden Installation sowie Inbetriebnahme von Mikro-KWK-Systemen hat in der Praxis seine methodische Anwendbarkeit bewiesen. Der Einsatz des übergreifenden Servicekonzepts hat sich ebenfalls als positives Instrument herausgestellt, in dessen Rahmen auch Störungsmeldungen erfasst wurden. In zeitlicher Nähe zur Inbetriebnahme wurden vermehrt Störungen durch die Mitmacher wahrgenommen. Im Verlauf des Projekts nahm die Anzahl an Störungen stetig ab, sodass ein störungsarmer Betrieb sowie eine hohe Verfügbarkeit der KWK-Systeme im Projekt nachgewiesen werden konnten.

Im Projektzeitraum wurde durch die ökologische Bewertung auf Landesebene eine Minderung der CO₂-Emissionen um 40 % gegenüber der zuvor genutzten Energieversorgung nachgewiesen. Der Primärenergiebedarf wurde um 26 % reduziert. Die Wirtschaftlichkeit aller messtechnisch bewertbaren KWK-Systeme ist stark von den angesetzten Rahmenbedingungen abhängig. Je nach Bewertungsansatz (Projektprice, Listenprice inkl. unterschiedlicher Förderprogramme) konnte zum Teil ein wirtschaftlicher Betrieb aufgezeigt werden. Entsprechend fallen die CO₂-Vermeidungskosten je nach Ansatz zum Teil sehr positiv aus.

Die Validierung der Modelle für die thermische Gebäudehülle und das Versorgungssystem war erfolgreich. Das gemessene thermische Verhalten der abgebildeten Gebäude entspricht sehr gut der Theorie. Sowohl die kumulierten bilanziellen Ergebnisse als auch regelungstechnische Ereignisse weisen eine gute Übereinstimmung auf. Die Validierung gilt sowohl für hochdetaillierte Mehrzonen- als auch für reduzierte Einzonenmodelle zur Abbildung vernetzter Strukturen.

Hinsichtlich des Netzeinflusses wurden im gesamten Messzeitraum keine Spannungseinbrüche, -überhöhungen, -unterbrechungen oder -transienten registriert, woraus eine Möglichkeit zum flexiblen netzdienlichen Betrieb ableitbar ist. Es wurde aufgezeigt, dass ein stromorientierter Betrieb sowie die Integration eines Home-Automation-Systems die Wirtschaftlichkeit von KWK-Systemen steigern kann. Hierzu kann ergänzend die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudesubstanz sehr vorteilhaft in das Gebäude-Energiemanagement einbezogen werden. Durch die Erweiterung der Anlagenperipherie durch E-Mobility können weitere CO₂-Einsparungen im Transportsektor gegenüber herkömmlichen PKW (Benzin und Diesel) erzielt werden. Diese liegen je nach Allokationsmethode der CO₂-Emission bei bis zu 85 %. Durch die Implementierung elektrischer Speicher kann der Stromeigennutzungsanteil zusätzlich signifikant erhöht werden. Durch die zeitabhängige Analyse eines Referenzobjekts konnte das Potenzial der Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils um 25 % aufgezeigt werden. Aufgrund der Komplexität und ausschließlich theoretischen Simulation sind weiterführende Prüfstands- und Demonstrationsuntersuchungen erforderlich.

Durch die projektspezifischen Erfahrungen auf technischer und administrativer Ebene konnten umfangreiche Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die größten Potenziale werden in der Vereinfachung des Anmeldeverfahrens und der Abrechnungsmethodik gesehen. So wurde bereits ein Leitfadens für die Anmeldung von Mikro-KWK-Anlagen erarbeitet.

Inhaltsverzeichnis

1	MOTIVATION UND HINTERGRUND	1
2	PROJEKTREALISIERUNG	3
2.1	Technologieplanung und -auswahl	4
2.1.1	Beschreibung der eingesetzten KWK-Systeme.....	4
2.1.2	Darstellung systemabhängiger Anforderungen	5
2.1.3	Beschreibung der standardisierten Messtechnik	6
2.1.4	Erweiterte Messtechnik für Referenzgebäude.....	13
2.2	Mitmacherakquise und Technologiezuordnung.....	18
2.2.1	Endkundenansprache und Vorauswahl	18
2.2.2	Detaillierte Aufnahme von Gebäude- und Nutzerdaten.....	19
2.2.3	Vorermittlung von erwarteten Anlagenlaufzeiten.....	22
2.2.4	Transparente Darstellung der Systemzuordnung	23
2.2.5	Verifizierung der Objekteignung durch Hersteller.....	24
2.2.6	Finale Vor-Ort-Begehung	25
2.2.7	Differenzierung der unterschiedlichen Realisierungspfade	25
2.3	Installation und Inbetriebnahme	27
2.3.1	Anforderungen an die Installationsbetriebe	27
2.3.2	Installation und Inbetriebnahme der KWK-Systeme	27
2.3.3	Installation und Inbetriebnahme der Messtechnik	29
2.4	Betriebsphase	30
2.4.1	Endkundenbetreuung.....	30
2.4.2	Störungsdokumentation und -auswertung	31
2.4.3	Funktions- und Plausibilitätschecks	34
2.5	Evaluation des Projektverlaufs	36
2.5.1	Zusammenfassung des Projektverlaufs	36
2.5.2	Fortschrittsanalyse.....	38
2.5.3	Visueller Vorher-Nachher-Vergleich.....	40
3	ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG	45
3.1	Auswertung der Objektverteilung.....	46
3.1.1	Statistische Auswertung der 100 Objekte	46
3.1.2	Übertragung und Vergleich von Dämmstandards	53
3.1.3	Auswahl von 10 Referenzgebäuden.....	55

3.2	Darstellung und Untersuchung der Messergebnisse	60
3.2.1	Kumulierte Gesamtauswertung	60
3.2.2	Kumulierte Objektanalyse	61
3.2.3	Wochenanalyse	63
3.2.4	Tagesanalyse	69
3.3	Ganzheitliche Betrachtung	73
3.3.1	Methodik zur ökologischen Bilanzierung	73
3.3.2	Ergebnisse der primärenergetischen Betrachtung	80
3.3.3	Ergebnisse der CO ₂ -emissionsbilanzierenden Bewertung	83
3.3.4	Berechnungsverfahren zur ökonomischen Bilanzierung	86
3.3.5	Übertragung des Berechnungsverfahrens	90
3.3.6	Ergebnisse der wirtschaftlichen Bilanzierung	102
3.3.7	Übergreifende Analysen und Diskussion	110
3.4	Dynamische Simulationen	139
3.4.1	Grundlegender Modellaufbau	140
3.4.2	Modellbildung	141
3.4.3	Wetterdaten	142
3.4.1	Mehrzonenmodell: Abgleich mit Messdaten	145
3.4.2	Einzonenmodell: Jahressimulation	174
3.4.3	Zusammenfassung	177
3.5	Erweiterte Analysen und Optimierungen	179
3.5.1	Bewertung des Netzeinflusses	179
3.5.2	Potenzialabschätzung zur Integration von E-Mobility	187
3.5.3	Stromorientierung des KWK-Betriebs	190
3.5.4	Einsatz eines Home-Automation-Systems	205
3.5.5	Einsatzbereiche für elektrische und thermische Speicher	210
4	KOMMUNIKATION UND TRANSFER.....	219
4.1	Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit	220
4.1.1	Projektveranstaltungen	220
4.1.2	Anmeldungsleitfaden	220
4.1.3	Print-, Onlinemedien, Veröffentlichungen und Vorträge	223
4.1.4	Home-Stories	224
4.2	Handlungsempfehlungen und Ausblick	229
4.2.1	Handlungsempfehlungen	229
4.2.2	Ausblick	231
5	VERZEICHNISSE	IX
6	ANHANG	XXVII

1 Motivation und Hintergrund

Die Landesregierung NRW hat zur Begrenzung möglicher negativer Folgen des Klimawandels verbindliche Einsparziele im Rahmen des Klimaschutzgesetzes fixiert. Primäres Ziel ist die Reduktion der Treibhausgasemissionen um 25 % bis 2020 gegenüber 1990. Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) als anerkannte Hocheffizienztechnologie kann einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Reduktion der Treibhausgasemissionen leisten. Die KWK-Ausbaustrategie in Nordrhein-Westfalen soll daher die Energiewende entscheidend beschleunigen. Durch die energetischen Vorteile der KWK ist die Steigerung des KWK-Anteils an der Gesamtstromerzeugung bis 2020 auf mindestens 25 % ein Teilziel der Landesregierung.

Das Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ soll ein wesentliches Element der KWK-Ausbaustrategie in NRW sein. Der Fokus liegt dabei auf dem verstärkten Einsatz von Mikro-KWK und Brennstoffzellen-Heizgeräten im Wohnungs- und Gewerbesektor. Der projektbezogene Hintergrund ist zusammengefasst in Abbildung 1 dargestellt.

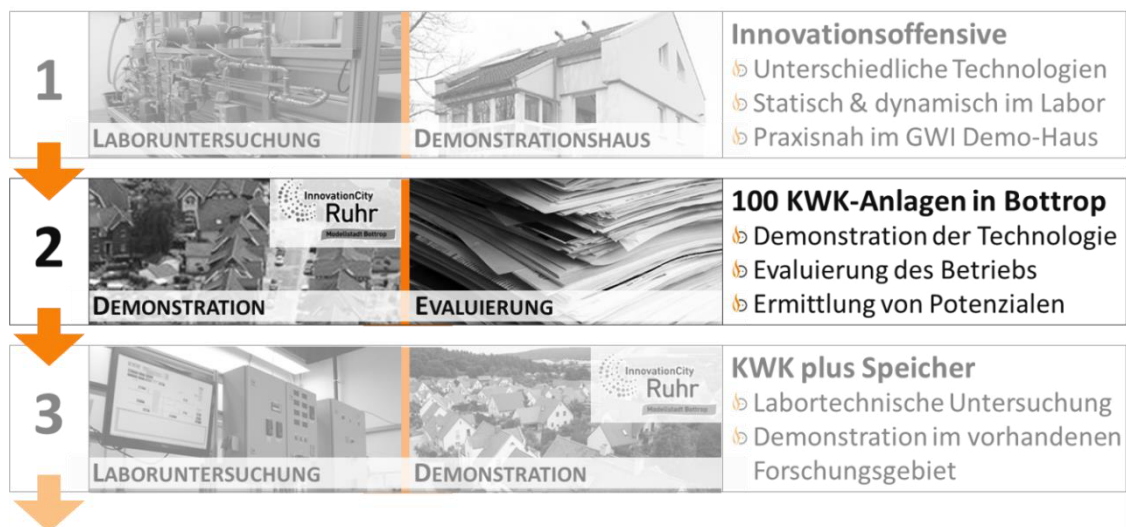


Abbildung 1: Strategische Forschungsplanung zur KWK-Demonstration des GWI

Ausgangsbasis für das Projekt stellen die Ergebnisse umfangreicher Laboruntersuchungen, praxisnaher Langzeituntersuchungen sowie der Simulationsrechnungen im Rahmen der DVGW-Innovationsoffensive dar. Demnach liegen abgesicherte Konzepte und Handlungsempfehlungen für einen effizienten Einsatz der KWK-Technologien in der Praxis vor. Diese sind im Hinblick auf die Weiterentwicklung, Optimierung und Marktetablierung der Technologien für den Einsatz im Wohnungs- und Gewerbesektor im Rahmen einer Demonstration weiter zu untersuchen. Die Verbreitung und Netzintegration der innovativen und hocheffizienten Mikro-KWK und Brennstoffzellen kann durch die weiterführende Praxis- und Demonstrationsphase nachhaltig befördert werden.

Die erfolgreiche Umsetzung des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ und die Erkenntnisse aus der Demonstration sollen zur Steigerung und Hebung von KWK-Potenzialen im Wohnungs- und Gewerbesektor beitragen. Die damit einhergehende Verbesserung der Marktposition von hocheffizienten KWK-Systemen beschleunigt deren Integration in die Energieversorgung. Auf diese Weise können der Primärenergiebedarf und CO₂-Emissionen der Energieversorgung im häuslichen und gewerblichen Bereich nachhaltig verringert werden. Im Fokus des Demonstrationsprojekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ liegen der Nachweis der CO₂-Einsparung, die Übertragbarkeit der Ergebnisse sowie die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen.

Das Projektgebiet ist in der InnovationCity | Modellstadt Bottrop verankert. Das Ziel der InnovationCity Ruhr ist ein klimagerechter Stadtumbau bei zeitgleicher Sicherung des Industriestandortes. Dabei sollen die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2020 halbiert und die Lebensqualität gesteigert werden. Das Projektgebiet repräsentiert ein charakteristisches Stück des Ruhrgebiets mit ca. 70.000 Einwohnern und rund 22.000 Arbeitsplätzen. So ist die Übertragbarkeit des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ mit europaweitem Leuchtturmcharakter sichergestellt. Des Weiteren garantiert die Übertragbarkeit auf andere Regionen in und außerhalb von NRW die Nachhaltigkeit des Projekts.

Innerhalb eines erweiterten Gebietes zur InnovationCity | Modellstadt Bottrop werden in repräsentativen Gebäudetypen mit unterschiedlichen Wärmestandards 100 KWK-Systeme unterschiedlicher Technologien und Leistungsklassen installiert. Das Technologieportfolio umfasst im Markt eingeführte Stirling- und Otto-motorische sowie brennstoffzellenbasierten KWK-Systeme. Die Etablierung der bereits im Markt eingeführten Geräte wird durch die Zusammenarbeit mit den Herstellern, dem Handwerk, den Energieversorgern, den Nutzern und der wissenschaftlichen Begleitung gefestigt. Die Installation wird dokumentiert und analysiert, Anlagenbetrieb und -service werden evaluiert. Die 100 Anlagen werden mit einer für das Projekt konzipierten Datenerfassung ausgerüstet, um sämtliche anlagen- und objektspezifischen Verbrauchsdaten kontinuierlich zu erfassen. Ziel ist es einen „Vorher-Nachher-Vergleich“ in Bezug auf die Kriterien Energieeinsatz und -verbrauch sowie CO₂-Einsparpotenziale herstellen zu können. Dazu werden insbesondere die Nutzungsgrade und die Treibhausgasemissionen im realen Anlagenbetrieb erfasst und wissenschaftlich analysiert. Neben der ökologischen und ökonomischen Bewertung steht die optimierte Auslegung von Mikro-KWK-Systemen sowie deren Anlagenperipherie im Fokus des Projekts.

Die Innovation des Projekts besteht im Einsatz von 100 KWK-Anlagen in einem kleinen Projektgebiet, in welchem alle wesentlichen Akteure direkt verfügbar sind. Ein solcher Projektrahmen ist in Deutschland bisher einzigartig und trägt damit zur Technologieführerschaft des Landes NRW bei. Durch die Breitenwirksamkeit des Projekts vom Kunden über das Handwerk bis hin zu Herstellern und Energieversorgern erfolgt eine Aktivierung aller beteiligten Akteure.

2 Projektrealisierung

Im Rahmen der Technologieplanung und -auswahl wurden die KWK-Systeme in Anforderungsbeschreibungen ausgeschrieben. Technologisch wurden Stirling-motorische, Otto-motorische und brennstoffzellenbasierte KWK-Systeme unterschieden. Die ausgewählten KWK-Systempakete enthalten in der Regel das KWK-Modul, einen Pufferspeicher und ein Zusatzheizgerät. Es wurden objektspezifische Anforderungen der jeweiligen Hersteller berücksichtigt. Die Technologieplanung und -auswahl umfasste ergänzend die Ausschreibung und Auswahl der erforderlichen Messtechnik.

Zur Mitmacherakquise wurden quantifizierbare Gebäudedaten von potenziellen Bewerbern gesichtet. Darauf basierend wurde ein Vor-Auswahl-Fragebogen erstellt und online zur Verfügung gestellt. Die Aktivierung der Bewerber erfolgte durch Informationsabende, Energieberatungen und diverse Medien. Als Entscheidungsgrundlage wurden die erhaltenen Objektinformationen ausgewertet und das Einsatzpotenzial von Mikro-KWK ermittelt. Bei den folgenden Erstbegehungen wurden detaillierte Gebäude- und Nutzerdaten erfasst und zur Vergleichbarkeit bereinigt. Zur Technologiezuordnung wurden die zu erwartenden Anlagenlaufzeiten der KWK-Systeme vorermittelt. Die daraufhin zugeordneten Systeme wurden von den jeweiligen Herstellern zur Installation freigegeben. Bei den finalen Vor-Ort-Begehungen erfolgte die Planung zur Integration des zugeordneten KWK-Systems inklusive aller Komponenten in die bestehende Anlagenhydraulik.

Auch für die Installation erfolgte eine europaweite Ausschreibung der Dienstleistung. Dies galt sowohl für die Installation der KWK-Systeme als auch für die damit kombinierte Integration der Messtechnik. Zur Installation der KWK-Anlagen war der Nachweis über eine erfolgreiche Schulung eines Mitarbeiters des Installationsbetriebs beim jeweiligen Hersteller sicherzustellen. Für die Einbindung der Messtechnik wurden dem Handwerk Installations-schemata mit den vorgesehenen Messstellen und Messbezeichnungen ausgehändigt. Nach Installation erfolgte die Inbetriebnahme mit dem Installateur und dem Hersteller.

Die Betriebsphase wurde durch die technische und formelle Endkundenbetreuung begleitet. Die Prüfung der Messdaten bezüglich Verfügbarkeit und Plausibilität erfolgte durch ein projektspezifisches tabellarisches Prüfsystem, eine Datenbankvisualisierung sowie eine manuelle Bewertung von Leistungs- und Lastverläufen. Dadurch konnten Messfehler identifiziert und behoben werden. Zur Bewertung der Systemfunktionalität wurden die erfassten Störungen ausgewertet. Über ein Drittel der Systeme weisen bis zum jetzigen Zeitpunkt keinerlei Informationen über Störungen auf, mehr als zwei-Drittel aller Systeme hatten innerhalb der Betriebszeit zwei oder weniger Störungen.

2.1 Technologieplanung und -auswahl

2.1.1 Beschreibung der eingesetzten KWK-Systeme

Im Rahmen des Projekts wurden unterschiedliche KWK-Systempakete europaweit, unter der Prämisse der Abdeckung eines möglichst breitgefächerten Anlagenportfolios, ausgeschrieben. Neben den detaillierten Produktspezifikationen wurden Angaben zur Gewährleistung, zum Wartungsumfang und zu -intervallen, schriftliche Angaben von Referenzen sowie bisher gelieferter Einheiten als Entscheidungsgrundlage herangezogen. Die Sicherstellung einer Ersatzteilverfügbarkeit von zehn Jahren sowie mit dem Projekt vereinbarte Lieferfristen im Abrufverfahren waren Bestandteil der Ausschreibung.

Insgesamt wurden in unterschiedlichen Anforderungsbeschreibungen die 100 KWK-Systeme in Systempaketen ausgeschrieben, die hinsichtlich der eingesetzten Technologien in folgende Bereiche untergliedert werden können:

- ↳ 40 Stirling-motorische KWK-Systeme
- ↳ 48 Otto-motorische KWK-Systeme
- ↳ 12 brennstoffzellenbasierte KWK-Systeme

Als Ergebnis der Ausschreibung wurde in der Realisierung des Projekts ein leistungsklassenübergreifendes Technologieportfolio von KWK-Systemen installiert. Die unterschiedlichen Systeme verschiedener Hersteller sowie eine Übersicht der technischen Kenndaten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die ausgewählten KWK-Systempakete enthalten neben den KWK-Modulen einen Pufferspeicher und ein Zusatzheizgerät. Detaillierte technische Beschreibungen der aufgeführten Teilsysteme können den verfügbaren technischen Dokumentationen der jeweiligen Hersteller entnommen werden.

Tabelle 1: Eingesetzte Systeme im Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“

Stk	System	Technologie	elektrische Leistung in kW	thermische Leistung in kW	η_{el} in %
20	Brötje EcoGen WGS 20.1	Stirling-Motor	1,0	5,0	17,6
10	Viessmann Vitotwin 300-W	Stirling-Motor	1,0	5,3	17,0
10	Viessmann Vitotwin 350-F	Stirling-Motor	1,0	5,3	17,0
36	Vaillant ecoPower 1.0	Otto-Motor	1,0	2,5	26,3
12	Vaillant ecoPower 4.7	Otto-Motor	4,7	12,5	24,6
10	CFC ¹ BlueGen	Brennstoffzelle	1,5	0,5	60,0
2	CFC ¹ BlueGen Beta 2	Brennstoffzelle	1,5	0,5	60,0

Die Planung der weiteren Schritte erfolgte auf Basis der beschriebenen Anforderungen an die KWK-Systempakete aus den Ausschreibungen, sodass lediglich allgemeine Vorauswahlen möglich waren. Dies hat zu Verzögerungen im Zuordnungs- und Installationsprozess geführt.

¹ CFC = Ceramic Fuel Cells GmbH, seit 01.07.2015 SOLIDpower GmbH.

2.1.2 Darstellung systemabhängiger Anforderungen

Neben dem Nutzerbedarfsprofil, siehe Kapitel 2.2.2, gibt es objektspezifische Anforderungen an die einzusetzenden Systeme. Je nach Hersteller variieren diese mehr oder weniger stark und können in folgende Bereiche aufgeteilt werden:

- 🔥 Kellerzugang
- 🔥 Türbreiten
- 🔥 Deckenhöhen
- 🔥 Aufstellfläche
- 🔥 Abgasführung

Überwiegend entscheidend für die Einbringung der Anlagenkomponenten sind die Größen der Systemspeicher. Kellerzugänge müssen entsprechenden Rangiererraum aufweisen, sodass der Speicher im gekippten Zustand in den Keller transportiert werden kann. Gleichmaßen muss die Kellerdeckenhöhe für die Aufstellung des Pufferspeichers ausreichend sein. Im Regelfall können die Isolierung der Speicher zur Montage abgenommen werden, was die Einbringung in den Keller erleichtert. Die Mindestaufstellflächen für die Systemkomponenten sowie die Montagefundamente sind ebenfalls zu prüfen. Dabei müssen neben den Geräteabmaßen auch die Freiräume für Wartungszwecke berücksichtigt werden. Als eine weitere Installationsvoraussetzung müssen die Herstellerangaben hinsichtlich der Abgasführung im jeweiligen Objekt kontrolliert werden – auch hier gibt es je nach System und Hersteller unterschiedliche Anforderungen. In Tabelle 2 sind die erforderlichen Anforderungen an die Raumhöhe und die Türbreite für die jeweiligen herstellerabhängigen Systempakete, die im Rahmen dieses Projekts und zum Zeitpunkt der Umsetzung maßgeblich waren, aufgelistet.

Tabelle 2: Mindesteinbringmaße für die Systemkomponenten der eingesetzten Anlagenpakete, [1]–[6]

System	EcoGen WGS	Vitotwin 300-W	Vitotwin 350-F	ecoPower 1.0	ecoPower 4.7	BlueGen Beta 2
Speicher	SPS 800	Celltwin 340-M	Vitocell 100 W	VPS 300/2 VPS 500/2	VPS 800/2 VPS 1000/2	FC-H-200
Kippmaß ^a [mm]	1910 ^a	1890 ^a	2.232 ^b	1727 ^a	1815 ^a	1.750 ^b
Min Raumhöhe ^b [mm]	1910 ^a	1890 ^a	2.232 ^b	1730 ^a	2134 ^a	1.750 ^b
Breite [mm]	790	790	600	500 650	790	500

Präanalytisch ist in Abbildung 2 dargestellt, dass je nach System eine Einbringung der Gesamtsysteme nur mit zusätzlichen baulichen Maßnahmen (z. B. Türerweiterung) möglich wäre, was bereits in der Planungsphase ein Hemmnis darstellt.

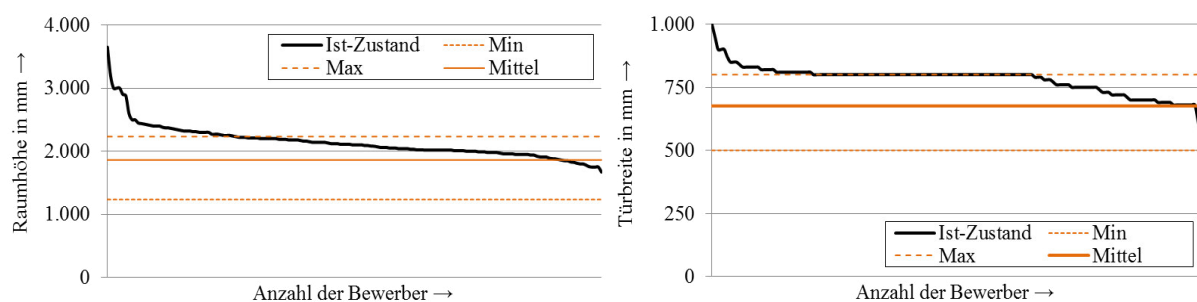


Abbildung 2: Auswertung der Ausschussraten aufgrund von Mindesteinbringmaßen

2.1.3 Beschreibung der standardisierten Messtechnik

Die automatisierte Messdatenerfassung zeichnet alle relevanten Anlagenbetriebs- und Objektbedarfsdaten für die nachgelagerten Analysen auf. Die eingesetzten Systembauteile wurden hinsichtlich der technischen Anforderungen unter der Prämisse eines einwandfreien Betriebs vorkonzipiert und im Rahmen der Projektrealisierung – analog zu den KWK-Systemen – europaweit ausgeschrieben. Die einzeln ausgeschriebenen Systemkomponenten sind:

- ↳ Temperatur- und Feuchtefühler ϑ ψ
- ↳ Bidirektionale Wechselstromzähler $E^{1\sim}$
- ↳ Bidirektionale 3-Phasen Drehstromzähler $E^{3\sim}$
- ↳ Gaszähler verschiedener Durchflussgrößen V
- ↳ Wärmemengenzähler verschiedener Durchflussgrößen Q
- ↳ Datenerfassungssystem und Kommunikation über GSM
- ↳ Zentraler Datenserver am Gas- und Wärme-Institut

Durch die gewählten Messstellen sind eine komplette Bilanzierung des KWK-Systems sowie eine quantitative Abschätzung des Nutzerverhaltens möglich. Je nach KWK-System variieren die Anzahl der Messgeräte sowie deren Einbauorte. Durch eine temporäre Musterinstallation wurden sämtliche Systeme zusammenschaltet, um die Gesamtfunktionalität vor der Einbringung in die Demonstration sicher zu stellen. Abbildung 3 zeigt exemplarisch den schematischen Aufbau der messtechnischen Ausstattung, deren Komponenten innerhalb der nachfolgenden Teilkapitel im Detail beschrieben werden.

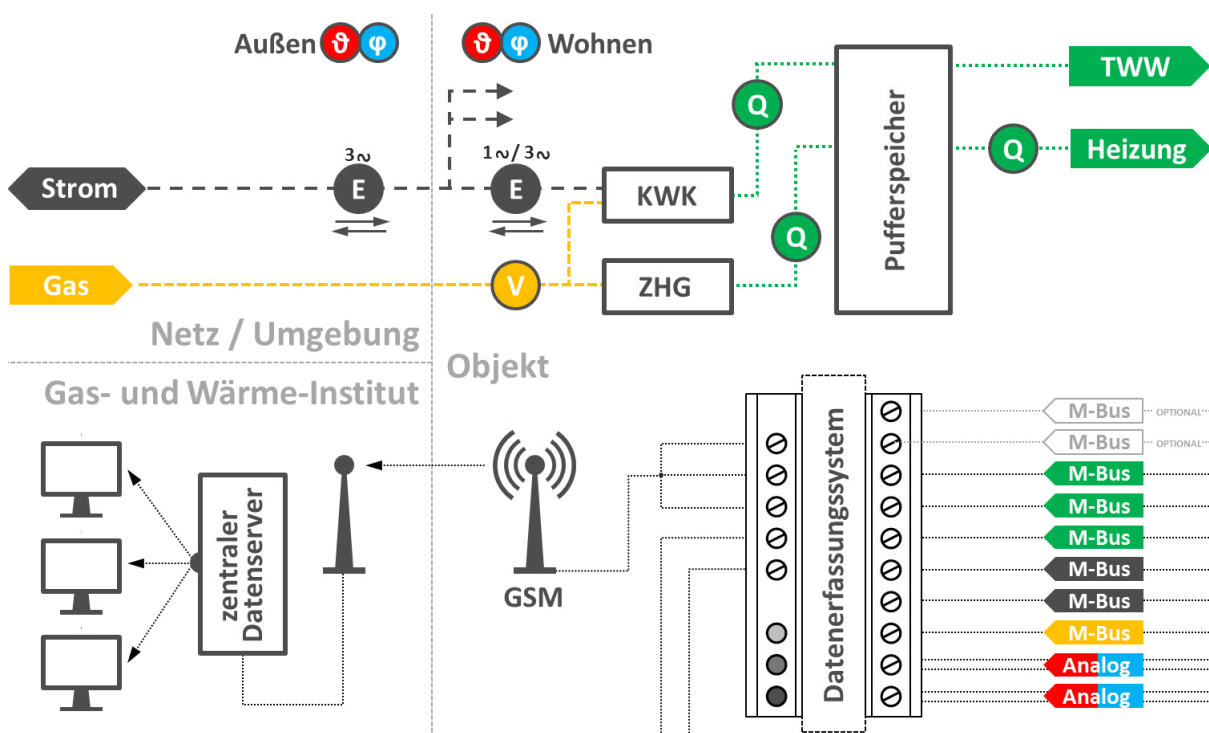


Abbildung 3: Exemplarische schematische Darstellung der installierten Messtechnik

Die Planung der messtechnischen Ausrüstung erfolgte auf Basis der definierten Anforderungen der Ausschreibungen. Dies hat zu Verzögerungen im Installationsprozess geführt.

2.1.3.1 Temperatur- und Feuchtefühler

In den messtechnisch ausgestatteten Objekten des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ wurden i. d. R. zwei analoge Temperatur- und Feuchtefühler (siehe Abbildung 4) im Innen- und Außenbereich jedes Objekts installiert.

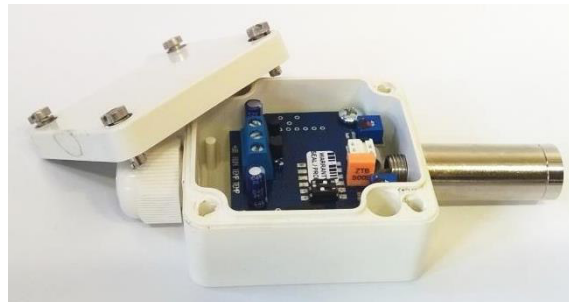


Abbildung 4: Messtechnik: Temperatur- und Feuchtefühler

Dabei wurde der Innenfühler möglichst in einem Wohnraum angebracht. Ein Wohnraum wird in diesem Projekt definiert als ein Raum in einer Wohnung oder in einem Haus, indem sich die Bewohner überwiegend über den Tag hinweg aufhalten. Hierdurch werden Messdaten erfasst, die einen Rückschluss auf das Nutzerverhalten möglich machen.

Der Außenfühler wurde – sofern möglich – neben der Außentemperaturerfassung der Heizungsanlage angebracht. Hierdurch werden auf Basis der Vielzahl an Systemen ortsabhängige Daten zur Witterung erfasst, die zur Bewertung des witterungsabhängigen Anlagenbetriebs herangezogen werden können. Aufgrund einer nicht detaillierten herstellereitigen Beschreibung der Installationsanforderungen zeigte sich im frühen Projektverlauf, dass einige der Temperaturfühler im Außenbereich eine Korrosion der Sensorik aufwiesen. Diese führte zum Teil zu Sensorausfällen und zu damit einhergehenden Erneuerungen sowie zur Überprüfung von bereits installierten Messstellen.

Die technischen Eigenschaften der verbauten Temperatur- und Feuchtefühler sind in Tabelle 3 zusammengefasst aufgeführt. Der aufgezeigte Messbereich in Kombination mit der vergleichsweise hohen Messgenauigkeit stützt die Wertigkeit sowie die Genauigkeit der erfassten Messdaten.

Tabelle 3: Messtechnische Eigenschaften: Temperatur- und Feuchtefühler

Messtechnisch erfasste Datenpunkte	
Feuchte, aktuell	#,##### % r. F.
Temperatur, aktuell	#,##### °C
Genauigkeit und Meldeintervall	
Meldeintervall	abfrageabhängige Wertänderung
Messbereich	Feuchte: 0 ... 100 % r. F. Temperatur: -20 ... 80 °C
Messgenauigkeit	Feuchte: < 3 % r. F. (30 ... 70 % bei 20°C), sonst < 5 % r. F. bei 20°C Temperatur: < 0,3 K (10 ... 40°C), sonst < 0,5 K Langzeitstabilität: +/- 1 %/a

2.1.3.2 Stromzähler

Zur elektrischen Bilanzierung der KWK-Systeme und des Objekts wurden je Objekt i. d. R. zwei bidirektionale M-Bus-Zähler (siehe Abbildung 5) verbaut. Eine Bewertung des selbstgenutzten KWK-Stromanteils sowie des KWK-Stromdeckungsgrads wird somit ermöglicht.



Abbildung 5: Messtechnik: Stromzähler: 1-phasig Wechselstrom (links), 3-phasig Drehstrom (rechts)

Für die stromseitige Bilanzierung des KWK-Systems wurde je nach System ein bidirektionaler 1-Phasen- oder 3-Phase-Stromzähler installiert. Dieser detektiert die Nettostromproduktion des KWK-Moduls abzüglich weiterer installierte Stromverbraucher im Heizungsraum, die dem Heizsystem (z. B. Zusatzheizgerät, Pumpen) zuzuordnen sind. Hierdurch wird eine systemübergreifende Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt. Eine transparente Methode zur Rückrechnung der additiven heizungsbedingten Strombedarfe wird in Kapitel 3.3.1 zur erweiterten Bilanzierung und Bewertung beschrieben.

Zur Bilanzierung der Stromseite eines Objekts werden der Strombezug sowie die Einspeisung des überschüssig produzierten KWK-Stroms mit einem 3-Phasen-Zwei-Richtungszähler am Hausnetzanschluss gemessen. Ausnahmen bestehen hier im Bereich der Mehrfamilienhäuser. Ein Zugriff auf die Hausnetzanschlussleitung ist im Rahmen des Projekts mit den vorgesehenen Stromzählern aufgrund der beschränkten Zugriffsmöglichkeit auf die Hausanschlussleitungen des Verteilnetzbetreibers nicht möglich. Eine Erfassung der einzelnen Mietparteien wurde nicht vorgesehen.

Da mehr Datenpunkte erfasst werden als erforderlich, wurden die zu übermittelnden Datenpakete voreingestellt. Nicht benötigten Messpunkte wurden deaktiviert, um die zu übertragende Datenmenge zu reduzieren. Die messtechnisch erfassten Datenpunkte sowie die Angaben zur Messgenauigkeit und zum Meldeintervall sind in Tabelle 4 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4: Messtechnische Eigenschaften: Stromzähler: 1-phasig Wechselstrom, 3-phasig Drehstrom

Messtechnisch erfasste Datenpunkte	
Energie (+), kumuliert	# Wh = #,### kWh
Energie (-), kumuliert	# Wh = #,### kWh
Leistung (+/-), aktuell (nur 3~)	# W = #,### kW
Genauigkeit und Meldeintervall	
Meldeintervall	abfrageabhängige Wertänderung
Messbereich	1~: U_n 230V (+/-20 %), I_{Max} 75A 3~: U_n 3x230V/400V (+/-20 %), I_{Max} 80A
Messgenauigkeit	Genauigkeitsklasse B

2.1.3.3 Gaszähler

Die Evaluation der Systemeffizienz beruht auf dem Vergleich von bereitgestellter Energie zum hierfür notwendigen Energieeinsatz. Zur Bilanzierung der Systeme ist daher in jedem Objekt ein Gaszähler (siehe Abbildung 6) installiert, der die eingehenden Energiemengen erfasst.



Abbildung 6: Messtechnik: Gaszähler q_p 1,5 und q_p 2,5

Die Systeme, bestehend aus KWK-Aggregat und Zusatzheizgerät, werden zur direkten Vergleichbarkeit i. d. R. durch einen gemeinsamen Gaszähler erfasst, da eine separate Ermittlung z. T. technologiebedingt nicht realisierbar ist. Je nach Messstellenkonfiguration wurden objekt- und technologieabhängig z. T. auch zwei Gaszähler zur differenzierten Bewertung des KWK-Aggregats und des Zusatzheizgeräts installiert.

Die installierten Gaszähler sind Einrohr-Balgengaszähler, wodurch die Integration in das bestehende Versorgungssystemen mit einem vergleichsweise geringen Aufwand in Reihe mit dem Abrechnungszähler möglich ist. Die messtechnischen Eigenschaften der installierten Gaszähler sind in Tabelle 5 enthalten und sind hinsichtlich der leistungsabhängigen Zählerauswahl differenziert.

Tabelle 5: Messtechnische Eigenschaften: Gaszähler q_p 1,5 und q_p 2,5

Messtechnisch erfasste Datenpunkte	
Volumen, Gas, Temp.-Komp., kumuliert	#,### m ³ = # Liter
Volumen, Gas, kumuliert	#,### m ³ = # Liter
Genauigkeit und Meldeintervall	
Meldeintervall	stündliche Wertänderung
Messbereich	G4: Balgenvolumen = 1,2 Liter, $q_{\max} = 6 \text{ m}^3/\text{h}$, $q_{\min} = 0,04 \text{ m}^3/\text{h}$ G6: Balgenvolumen = 2,2 Liter, $q_{\max} = 6 \text{ m}^3/\text{h}$, $q_{\min} = 0,04 \text{ m}^3/\text{h}$
Messgenauigkeit	Klasse 1,5: +/- 1,5 % vom Messbereichsendwert

Die installierten Gaszähler erfassen das Arbeitsgasvolumen sowie das temperaturkompensier- te Gasvolumen, welches für weitere Berechnungen heranzuziehen ist. Als einschränkendes Kriterium zur direkten Verwertung der erfassten Profile ist anzumerken, dass die Zähler intern lediglich eine stündliche Wertänderung vornehmen, wodurch zeitlich stark differenzierte Aus- sagen nur begrenzt möglich sind. Die Ableitung von hochaufgelösten Profilen erfolgt durch eine Synthetisierung des Profils. Über den Abgleich der gewichteten hochaufgelösten Aus- gangsleistung der Energiebereitstellungssysteme mit der gewichteten stündlich erfassten Ein- gangsleistung des Gaszählers ist die Ermittlung eines synthetischen Profils möglich. Diese relativierte Herangehensweise ermöglicht die transparente und somit nachvollziehbare Konvertierung der Gasprofile, die für die Bewertung von zeitlich-differenzierten Systemver- halten notwendig sind. Für die bilanzielle Evaluierung der Systeme auf Jahres- bzw. Projekt- laufzeitebene stellt das stündliche Intervall keine Einschränkung dar, sodass eine detaillierte Ermittlung der CO₂- und Primärenergie-Einsparungen (vgl. Kapitel 3.2) möglich ist.

2.1.3.4 Wärmemengenzähler

Für die Bilanzierung der Wärmeverteilung werden je Objekt zwischen zwei und fünf Wär- memengenzähler (siehe Abbildung 7), verteilt auf den Geräte- sowie den Heizkreislauf instal- liert.



Abbildung 7: Messtechnik: Wärmemengenzähler q_p 1,5 und q_p 2,5

Gerätetechnisch werden sowohl das KWK-Aggregat als auch das Zusatzheizgerät in Bezug auf die Wärmebereitstellung getrennt erfasst. Bei einigen KWK-Systemen bilden das KWK- Aggregat und das Zusatzheizgerät eine Einheit, sodass nur die gesamte bereitgestellte Wärme messtechnisch erfasst werden kann.

Die Heizwärmebedarfe werden messtechnisch erfasst. Eine direkte Bilanzierung des Trink- warmwassers ist aufgrund der hohen rechtlichen Anforderungen an die Zulassung von Wär- memengenzähler für Trinkwasserleitungen nicht realisiert worden. Die Wärmemenge für die Trinkwarmwasserbereitung wird überschlägig rechnerisch aus der Differenz der produzierten Wärme und erfassten Wärmemenge für den Heizkreis ermittelt, wobei hier die Wärmeverluste des Wärmespeichers zu z. T. erheblichen Abweichungen führen. In einigen Fällen (z. B. bei einer Zwei-Speicher-Variante) war es jedoch möglich die Speicherbeladung für die Trink- warmwasserbereitung zu messen.

Entsprechend der Zielsetzung der Demonstration von KWK-Systemen wurden im Rahmen des Projekts marktverfügbare Wärmemengenzähler zur Systembilanzierung eingesetzt. In Tabelle 6 sind die messtechnischen Eigenschaften der Wärmemengenzähler enthalten, die zur Eingrenzung des Anwendungsbereichs der ermittelten Daten herangezogen werden.

Tabelle 6: Messtechnische Eigenschaften: Wärmemengenzähler q_p 1,5 und q_p 2,5

Messtechnisch erfasste Datenpunkte	
Energie, kumuliert	#.000 Wh = # kWh
Volumen, Wasser, kumuliert	#,## m ³ = #0 Liter
Leistung, aktuell	#00 W = #,# kW
Volumenstrom, Wasser, aktuell	#,### m ³ /h = # l/h
Temperatur, Vorlauf, aktuell	#,# °C
Temperatur, Rücklauf, aktuell	#,# °C
Temperatur, Differenz (VL-RL), aktuell	#,## K
Genauigkeit und Meldeintervall	
Meldeintervall	abfrageabhängige Wertänderung
Messbereich	q_p 1,5: $q_{\text{Nenn}} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $q_{\text{max}} = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ q_p 2,5: $q_{\text{Nenn}} = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $q_{\text{max}} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$

Im Gegensatz zu den Temperatur- und Feuchtefühlern sowie den Stromzählern zeichnen sich die Wärmemengenzähler durch einige Kriterien aus, die zu der Notwendigkeit einer nachgelagerten Konvertierung und Synthetisierung der ermittelten Bedarfsprofile führen. Die kumulierten Energien werden in einer Genauigkeit von einer Kilowattstunde – wie es üblich für Wärmemengenzähler ist – gespeichert, was zu vergleichsweise hohen Abweichungen bei kleinen thermischen Leistungen führt. Die instantanen Messwerte werden mit einer Genauigkeit von 100 W ausgegeben, sodass diese für die Bereitstellungs- und Bedarfsprofilermittlung zugrunde gelegt werden. Dieser Ansatz enthält zwar die Unsicherheit, welche Leistungen zwischen den Messzeitpunkten vorliegen, da es sich bei thermischen Systemen jedoch um vergleichsweise träge Systeme handelt, kann dieser Ansatz als sinnvoll angesehen werden. Durch den Abgleich der kumulierten instantanen Profile mit den erfassten kumulierten Energiemengen, kann die Genauigkeit der Ergebnisse weiter präzisiert werden.

2.1.3.5 Messdatenkommunikation

Die einzelnen Zähler und Fühler werden entsprechend des Einsatzes im Objekt vorkonfiguriert, sodass diese vor Ort nur noch an den Datenlogger anzuschließen sind. Der Datenlogger hat vier Analog-Eingänge, die i. d. R. für die Temperatur- und Feuchtefühler genutzt werden, sowie acht M-Bus Eingänge für die digitalen messtechnischen Zähler. Bei der Auswahl der Messdatenkommunikation wurde auf eine besonders einfache Integration und Zusammenschaltung der Systeme geachtet. Die gewählte Hardware zur Datenübertragung stellt eine bereits ausreichend erprobte, marktverfügbare Plug & Play-Lösung dar.

Im Rahmen der Anforderungen an die Messtechnik sowie der realisierbaren Möglichkeiten der Messtechnik innerhalb des Projekts wurde die Abfragerate definiert. Für die Auslesung eines Zählers sind im eingesetzten System bestimmte, vordefinierte Zeiträume erforderlich. Um die notwendigen Zeitintervalle zur Zählerabfrage des Datenloggers einzuhalten und um

die zu transportierende Datenmenge und Häufigkeit zu limitieren, ist eine Abfrage- und Übertragungsrate von 5 Minuten umgesetzt worden.

In Abbildung 8 ist ein Datenlogger exemplarisch dargestellt. Neben der eigentlichen Kommunikationsschnittstelle, dem integrierten Netzteil sowie den einzelnen Anschlusselementen ist der Stromzähler zur KWK-Bilanzierung integriert, um eine kompakte und möglichst einfach zu installierende Bauweise der Messtechnik sicher zu stellen.

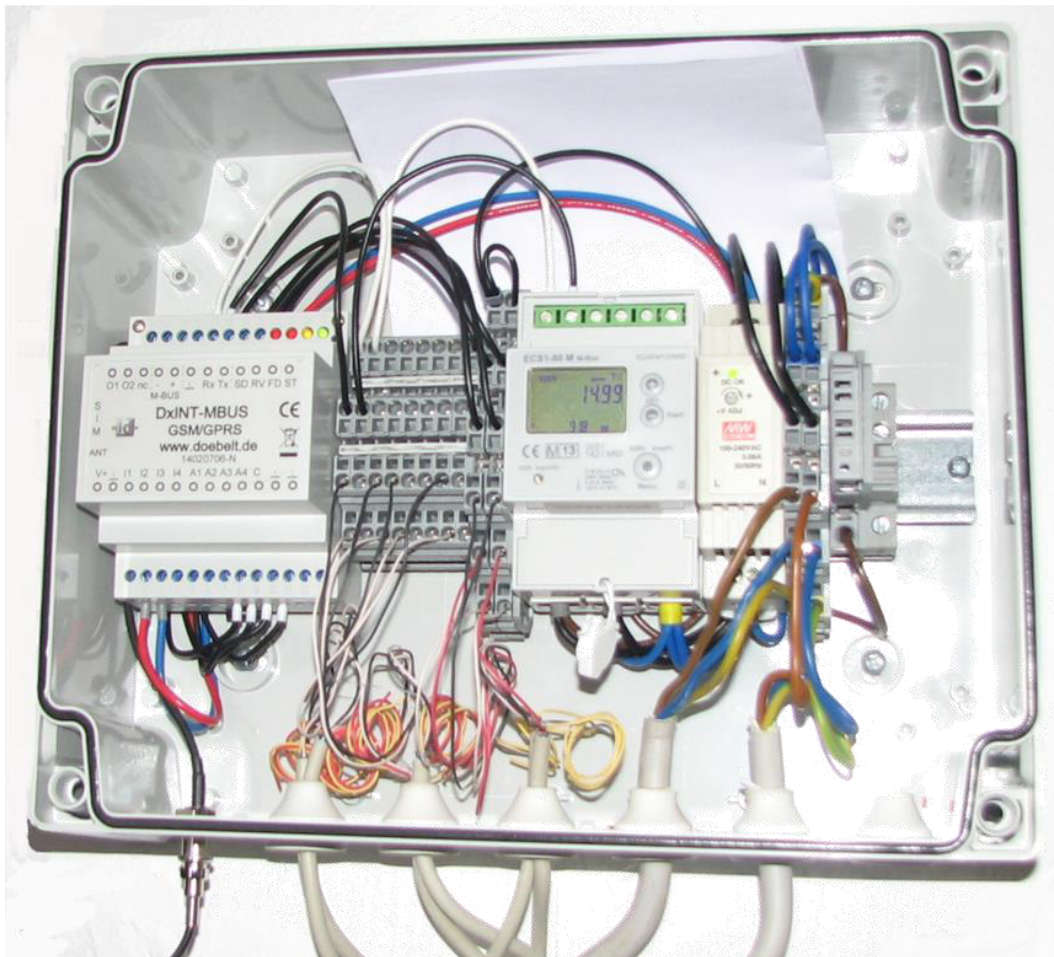


Abbildung 8: Messtechnik: Datenlogger

Die Datenübertragung erfolgt auf Basis von GSM (Global System for Mobile Communications), das einen Standard für Mobilfunknetze darstellt. Durch die Wahl einer endkundenunabhängigen Datenübertragung werden kritische Schnittstellen reduziert, die im Rahmen der Projektrealisierung andernfalls zu Problemen und damit einhergehenden erheblichen Verzögerungen hätten führen können. Die erfassten Messdaten werden zyklisch an einen Zentral-Server am GWI übermittelt.

2.1.4 Erweiterte Messtechnik für Referenzgebäude

Um die Smart-Grid-Fähigkeit der Objekte zu bewerten, wurde in 10 ausgewählten Referenzgebäuden² erweiterte Mess- und Steuerungstechnik installiert. Auf Grundlage dieser Mess- und Steuerungstechnik wurde an der HRW außerdem eine Visualisierung entwickelt, die den Bewohnern die Strombilanz und -verbräuche in ihrem Gebäude grafisch darstellt.

2.1.4.1 Strombilanz, Pufferspeichertemperaturen und deren Visualisierung

Die erweiterte Mess- und Steuerungstechnik in den Referenzgebäuden basiert auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), die in Kapitel 2.1.4.2 in Abbildung 11 zu sehen ist. Mit Hilfe dieser SPS werden sowohl die aktuellen Stromflüsse im Gebäude als auch die Temperaturen im Pufferspeicher in Echtzeit gemessen. Konkret werden folgende Werte erfasst:

🔥 BHKW-Stromerzeugung	Wirkleistung, Wirkenergie
🔥 Strombezug aus dem Netz	Wirk- und Blindleistung, Wirk- und Blindenergie
🔥 Stromeinspeisung ins Netz	Wirk- und Blindleistung, Wirk- und Blindenergie
🔥 Pufferspeichertemperaturen	Temperatur oben, Mitte, unten

Der Gebäudestromverbrauch wird von der SPS nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Gebäudeverbrauch} = \text{Bezug} + \text{Erzeugung}_{(\text{BHKW})} - \text{Einspeisung} \quad (2-1)$$

Pufferspeicher

Um den Ladezustand des Pufferspeichers beurteilen zu können, wird dessen Temperatur – wie in Abbildung 9 dargestellt – jeweils an drei Stellen gemessen: im oberen, mittleren und unteren Bereich des Pufferspeichers. Aus diesen Werten wird anschließend noch die Durchschnittstemperatur berechnet. Die Temperaturmessungen erfolgen mit Pt100-Widerstandssensoren als Oberflächentemperaturfühler. Die Sensoren wurden aus Gründen der Zugänglichkeit im Bereich der Stützen angebracht (siehe Abbildung 9, links). Wenn möglich wurden sie, wie in Abbildung 9 (rechts) gezeigt, direkt auf dem Stahl-Drucktank angebracht. Teilweise wurden die Sensoren auf der Zuleitung angebracht, wo sie jedoch größeren und schnelleren Temperaturänderungen als der Pufferspeicher selbst ausgesetzt sind.

² Die Auswahl der Referenzgebäude ist in Kapitel 3.1.3 beschrieben.

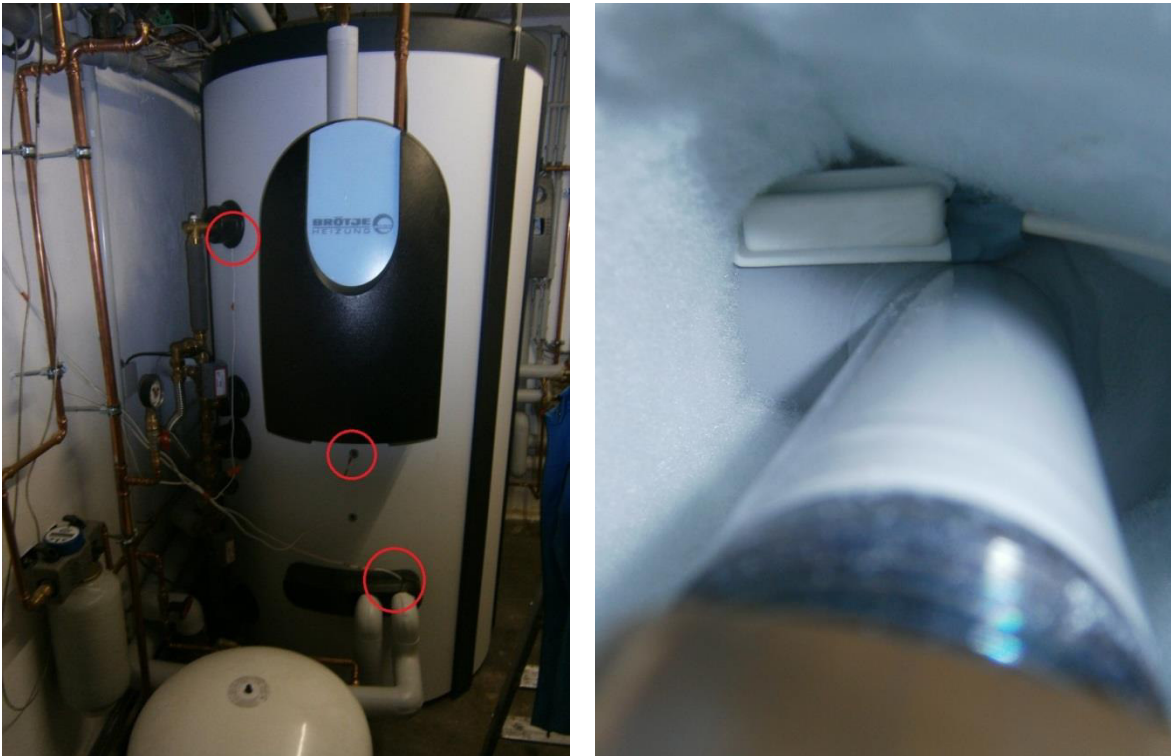


Abbildung 9: Messung der Temperatur an drei Stellen des Pufferspeichers – oben, Mitte, unten – (links) und Anbringung des Oberflächentemperaturfühlers auf dem Stahl-Drucktank (rechts).

Visualisierung

Des Weiteren wurde an der HRW eine Visualisierung entwickelt, um die aktuelle Strombilanz und die Stromverbräuche im Gebäude sowie das Betriebsverhalten der KWK-Anlage für die Bewohner transparent zu machen (siehe Abbildung 10). Die Visualisierung wurde speziell den Bewohnern der Ein- und Zweifamilienhäusern zur Verfügung gestellt, da sie als KWK-Anlagenbetreiber direkt von potenziellen Einsparungen durch Energiemanagement-Maßnahmen profitieren.

Die visualisierten Echtzeit-Informationen über den Betriebszustand der KWK-Anlage (an/aus) sowie die aktuelle Strombilanz im Gebäude (Netto-Strombezug oder Netto-Einspeisung) geben den Bewohnern die Möglichkeit, gezielte Handlungen vorzunehmen und somit den Betrieb der KWK-Anlage zu optimieren. So ist es beispielsweise sinnvoll, flexible elektrische Verbraucher gezielt während der Zeiten zu betreiben, in denen das BHKW in Betrieb ist. Auf diese Weise lässt sich der Eigenverbrauch des erzeugten BHKW-Stroms und somit die Wirtschaftlichkeit der KWK-Anlage erhöhen.

Die Visualisierung wurde aus der Entwicklungsumgebung der SPS – Codesys – heraus umgesetzt und den Bewohnern sowohl als App als auch als Website zur Verfügung gestellt. Um Rückschlüsse über die Akzeptanz und die tatsächliche Nutzung ziehen zu können, wurde die Anzahl der Visualisierungsaufrufe messtechnisch erfasst.

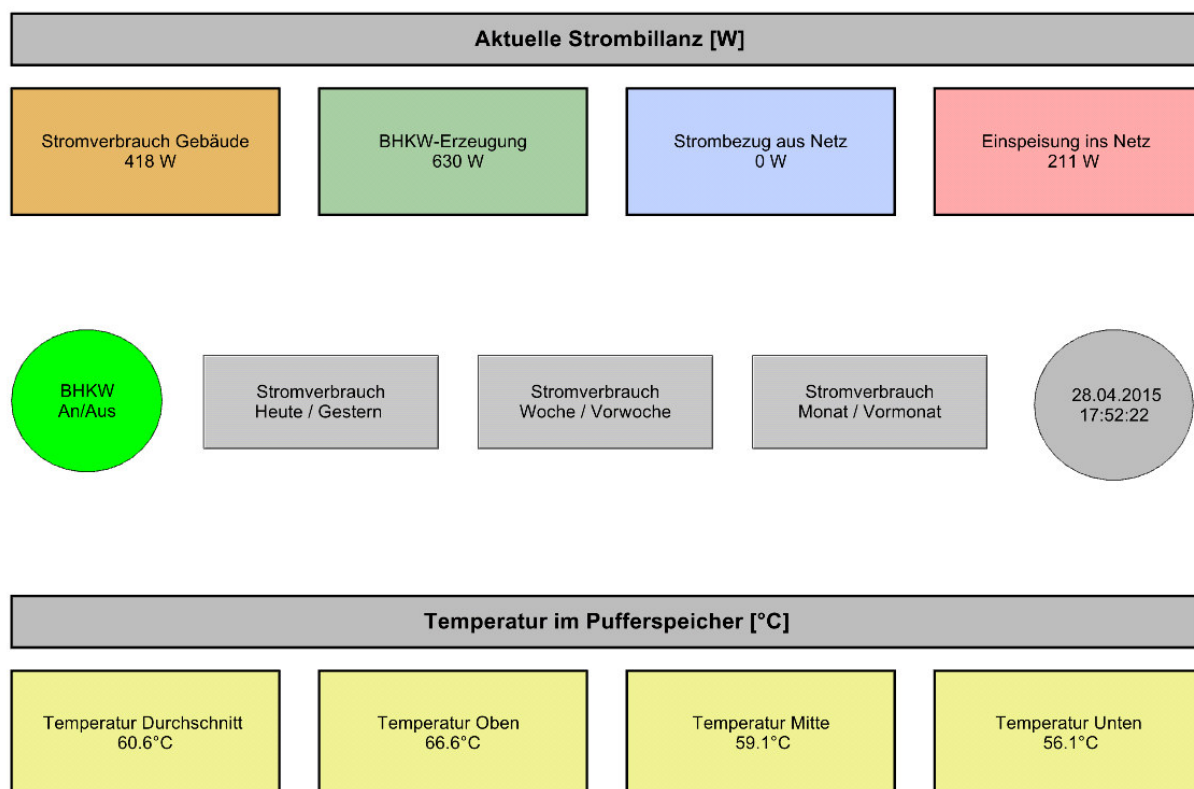


Abbildung 10: Screenshot der Visualisierung der Strombilanz sowie der Pufferspeichertemperaturen

2.1.4.2 SPS: Datenaufnahme und -speicherung sowie BHKW-Steuerung

In den Referenzgebäuden wurde jeweils eine SPS der Fa. WAGO installiert, wie in Abbildung 11 dargestellt ist. Die WAGO-SPS besitzt Klemmen für die Erfassung von standardisierten S0-Impulsen. Mit diesen werden der Strombezug des Gebäudes aus und die Stromeinspeisung ins Netz aufgezeichnet, die als S0-Impulse am 3-Phasen-EMU-Professional-Zähler des GWI ausgelesen werden.

Die Stromerzeugung des BHKW wird je nach BHKW-Typ wie folgt erfasst:

- 🔥 bei einphasigen BHKW mit einem Lesekopf („DFP-307“), der die Infrarot-Impulse am 1-Phasen M-Bus-Zähler des GWI in der Datenübertragungsbox ausliest und
- 🔥 bei dreiphasigen BHKW an einem zweiten 3-Phasen- M-Bus-Zähler des GWI.

Des Weiteren ist die SPS mit einer Klemme für die Pt100-Widerstandssensoren ausgestattet, mit denen die Pufferspeichertemperaturen erfasst werden (siehe Abbildung 11).

Aufbauend auf der beschriebenen Hardware wurde die SPS in der Entwicklungsumgebung Codesys so eingerichtet, dass die Messdaten in frei skalierbaren Zeitintervallen in einer MySQL-Datenbank gespeichert werden können. Dabei wurde das Zeitintervall in den Referenzgebäuden auf zwei Minuten festgelegt. Die aufgenommenen Messdaten werden sowohl

- 🔥 lokal bei dem jeweiligen Probanden auf einem Odroid-U3 Einplatinen-Computer (siehe Abbildung 11) mit Ubuntu-Betriebssystem als auch
- 🔥 zentral an der HRW auf einem Apache-Webserver gespeichert (siehe Kapitel 2.1.4.4).

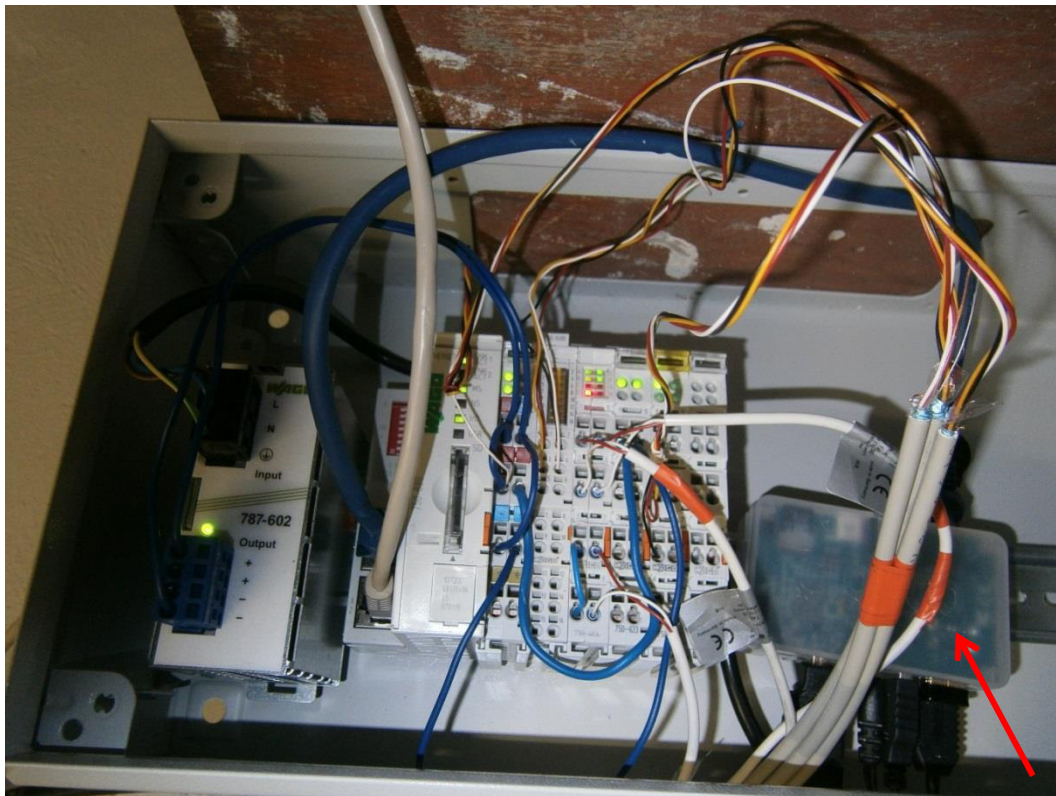


Abbildung 11: WAGO-SPS mit Einplatinen-Computer Odroid-U3 (Pfeil)

Ausblick

Neben dem Monitoring der Stromverbräuche und der Pufferspeichertemperaturen sowie deren Speicherung und Visualisierung kommt der SPS und dem Odroid-Rechner zukünftig noch eine weitere zentrale Bedeutung zu: sie bilden die technische Grundlage, um die BHKW steuern und somit im Rahmen eines Energiemanagements stromorientiert betreiben zu können. Perspektivisch ist auch die Einbindung in ein virtuelles Kraftwerk möglich.

2.1.4.3 Raumklima-Sensoren

Zur Erfassung des Raumklimas wurde an der HRW ein Raumklima-Sensor entwickelt („Sensornest“, siehe Abbildung 12). Erfasst werden

- 🔥 die Raumlufttemperatur (°C),
- 🔥 die relative Luftfeuchtigkeit (%) und
- 🔥 der CO₂-Gehalt der Raumluft (ppm).

Der Sensor für den CO₂-Gehalt befindet sich im Inneren des Sensor-Gehäuses, während der Sensor für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit aus dem Gehäuse herausragt, um Messwertverfälschungen zu vermeiden (siehe Abbildung 12). Um die Raumklimadaten möglichst realistisch und einheitlich zu erfassen, wurde darauf geachtet, dass die Sensoren in ca. 1 bis 1,20 m Höhe und nicht in der Nähe der Fenster oder der Heizkörper aufgestellt werden.



Abbildung 12: Raumklima-Sensor („Sensornest“) und typischer Aufstellort

Als Plattform für das „Sensornest“ dient ein netzbetriebener Einplatinen-Computer (Raspberry Pi B+), der mit den o. g. Sensoren kombiniert wurde. Die Abfrage und Datenspeicherung erfolgt mittels Python-Skripten, die periodisch aufgerufen werden. Dadurch wird eine schlanke Programmierung erreicht, die die begrenzten Systemressourcen sparsam verwendet.

2.1.4.4 Messdatenspeicherung und Kommunikation

Die Messdaten, welche von den Raumklima-Sensoren und der SPS in frei wählbaren Zeitintervallen aufgezeichnet werden, werden zunächst lokal auf dem jeweiligen Einplatinen-Computer gespeichert – einem Raspberry Pi B+ im Fall der Raumklima-Sensoren bzw. einem Odroid-U3 im Fall der SPS. Des Weiteren sind die Einplatinen-Computer mit dem WLAN der Bewohner verbunden, um eine Vernetzung der Sensoren untereinander sowie den Zugriff auf das Internet zu ermöglichen. Über das Internet werden die Messdaten schließlich an die HRW übertragen, wo sie auf einem Apache-Webserver in zwei MySQL-Datenbanken noch einmal zentral gespeichert und gesichert werden.

Der Webserver kann die Anfragen, die mittels http von einem beliebigen Client kommen können, verarbeiten und zurückgeben. Die gesamte Verarbeitung der Daten erfolgt dann serverseitig, ausgegeben wird eine standardisierte HTML-Seite. Den Bewohnern kann auf diese Weise eine datenbankgestützte Visualisierung der aktuellen Raumluftqualität über eine Website bereitgestellt werden (nicht zu verwechseln mit der SPS-gestützten Visualisierung von Strombilanz und Pufferspeichertemperaturen in Abbildung 10). Der Zugriff auf diese Website kann sowohl von einem Desktop-PC aus als auch per Tablet-PC und/oder Smartphone erfolgen.

Durch die Verwendung von standardisierten Protokollen und Schnittstellen kann zudem eine einfache Einbindung in die Smart-Home-Lösung realisiert werden, die in Kapitel 3.5.4 näher vorgestellt wird.

2.2 Mitmacherakquise und Technologiezuordnung

2.2.1 Endkundenansprache und Vorauswahl

2.2.1.1 Endkundenansprache

Bei der Umsetzung von städtebaulichen Großprojekten steht in den letzten Jahren vermehrt die öffentliche Akzeptanz im Fokus. Unabhängig davon, ob diese im Bereich Industrie, (erneuerbare) Energie oder Infrastruktur geplant sind, gibt es innerhalb verschiedener Interessengruppen Bestrebungen gegen diese Projekte. Auch wenn die Gründe dafür vielfältig sein können, sind fehlende Informationen eine Hauptursache für die mangelnde Akzeptanz. Deshalb ist ein wesentlicher Ansatzpunkt des Projekts InnovationCity Ruhr | Modellstadt Bottrop die lokalen und regionalen Interessengruppen, unter anderem Bürger, lokale Unternehmen und Medien, individuell „abzuholen“ und über die gesamte Laufzeit des Projekts „mitzunehmen“. Hier ist das Beratungs- und Informationsangebot ein Schlüsselement der InnovationCity Ruhr. Im Zentrum für Information und Beratung (ZIB) werden umfassende Aktivierungs- und Beratungsmaßnahmen angeboten, die die ICM in Kooperation mit dem Partnernetzwerk und den Partnerunternehmen umsetzt.

Beim Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ standen weniger Akzeptanzprobleme im Vordergrund als ein großes Informationsdefizit zum Thema KWK, moderne Heizungstechnik und die Rolle als Stromerzeuger oder Anlagenbetreiber aufzutreten. Aus diesem Grund haben die Mitarbeiter umfassende Informationsarbeit betrieben und gezielt Endkunden für die Teilnahme im Projekt angesprochen. Dazu gab es Informationsstände in der Bottroper Innenstadt und Themenabende im ZIB, an dem zu Heizungstechnologien im Allgemeinen und KWK-Technik im Besonderen informiert wurde. Darüber hinaus wurden Informationsmaterialien für das Projekt entwickelt (Flyer, Internetseite, Fragen & Antworten).

Um einen schlanken Auswahlprozess zu ermöglichen und Objekte mit besonders hoher Eignung auszuwählen, wurde die Gebäudestruktur betrachtet und potenzielle Objekte ausgewählt. Hierbei stand zu Beginn die Beschaffung und Sichtung von quantifizierbaren Gebäudedaten zur standardisierten Auswahl von potenziellen Bewerbern durch eine Literaturrecherche im Vordergrund. Nach Identifikation von wissenschaftlichen Interessenschwerpunkten wurde ein verkürzter Vor-Auswahl-Fragebogen (siehe Anhang A1) zur Implementierung für die Homepage icruhr.de zur Bewerberakquise unter Berücksichtigung folgender zentraler Eigenschaften erstellt:

- ↳ Objektgröße
- ↳ Objektart (z. B. Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus)
- ↳ Gebäudealter und Alter der Anlagentechnik
- ↳ Art der Wärme- und Stromversorgung
- ↳ Nutzeranzahl

Die Bewerbung für das Projekt erfolgte dabei eigenständig durch die Bewerber über den kurzen Online-Fragebogen auf der Homepage.

Die Online-Bewerbung erlaubte die Ansprache einer möglichst großen Interessensgruppe, wobei schon im Vorfeld gewisse Kriterien zur Filterung von nicht geeigneten Bewerbern angewendet werden konnten. Dadurch konnte beispielsweise eine Verdrängung der bestehenden Fernwärmeversorgung ausgeschlossen werden. Die Möglichkeit der Bewerbung wurde intensiv durch Informationsabende, Energieberatungen und unterschiedlichste Medien beworben worauf sich eine Vielzahl an Gebäudeeigentümern den Aufrufen zur Bewerbung folgte. Die Angaben der Bewerber wurden in einer Datenbank in elektronischer Form zur weiteren Bearbeitung aufgenommen. Die Bewerber repräsentieren die gesamte Bandbreite an Gebäudetypen, Gebäudealtern, Haushaltsgrößen und Energieträgern, die in Bottrop vertreten sind.

2.2.1.2 Beschreibung des Vorauswahlverfahrens

Als Entscheidungsgrundlage für die Vor-Ort Erstbegehungen erfolgte eine zeitlich gestaffelte Auswertung der fragebogentechnisch erfassten Objektinformationen hinsichtlich potenzieller Einsatzmöglichkeiten von Mikro-KWK-Systemen. Als Grundlage zur Potenzialermittlung werden die Heizwärmebedarfe der Objekte herangezogen. Sofern ein Objekt ursprünglich nicht mit Gas versorgt wurde, wurde der Heizwärmebedarf nach dem in Kapitel 2.2.2.2 beschriebenen Verfahren ermittelt. Ferner wird in Kapitel 2.2.2.2 aufgezeigt, wie der berechnete Heizwärmebedarf in einen auslegungsrelevanten Nutzwärmebedarf umgerechnet wird.

Im ersten Schritt wurden Bewerber mit Mehrfamilienhäusern auf eine Warteliste gestellt. Für die verbleibenden Bewerber wurde geprüft, ob eine Vor-Ort-Begehung durch eine GWI-Fachgruppe sinnvoll ist. Dabei stellen die zwei nachfolgend aufgeführten Ausschlusskriterien die Entscheidungsgrundlage dar, ob eine Vor-Ort-Begehung durchzuführen ist:

- 🔥 Beim Objekt handelt es sich um ein geplantes Objekt oder einen Neubau, da das Projekt auf den Wohnungsbestand fokussiert ist.
- 🔥 Das Objekt weist einen Nutzwärmebedarf von < 7.000 kWh/a bei zentraler oder einen Nutzwärmebedarf von < 10.000 kWh/a bei dezentraler Warmwasserversorgung auf.³

2.2.2 Detaillierte Aufnahme von Gebäude- und Nutzerdaten

2.2.2.1 Vor-Ort-Erstbegehung

Zur standardisierten Auswahl von geeigneten Bewerbern stand zu Beginn die Beschaffung und Sichtung von quantifizierbaren Gebäudedaten im Vordergrund. Parallel zur Sichtung der Rückmeldungen der Fragebögen erfolgte die inhaltliche Fixierung des Fragebogens für die Datenaufnahme im Rahmen der Vor-Ort-Erstbegehung zur Prüfung der zu berücksichtigten Kriterien für die Anlageneignung (siehe Kapitel 2.2.3). Hierzu erfolgte bei den potenziell geeigneten Bewerbern eine Vor-Ort-Begehung durch eine GWI-Fachgruppe bestehend aus Technikern für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik (SHK), Elektrofachhandwerkern und Ingenieuren. Im Rahmen der Begehung wurde ein standardisierter Fragebogen, für den Bereich Wohnen und Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) mit dem Kunden zusammen ausgefüllt (siehe Anhang A2 und Anhang A3). Der Fokus der Aufnahme der Gebäude- und Nutzerdaten lag mit einem Anteil von 95 % auf dem Wohngebäudesektor.

³ Die Grenzen verschieben sich im Laufe des Projekts systembedingt in Richtung niedrigerer Wärmebedarfe.

Für die Organisation und Durchführung der Vor-Ort-Begehungen wurde eine standardisierte Vorgehensweise erarbeitet und in einem Leitfaden (siehe Anhang A4) dokumentiert. Dieser beinhaltet die abgestimmte Vorgehensweise der Terminvereinbarung mit allen Beteiligten sowie die Mitteilung an den Kunden über benötigte Dokumente und Informationen, die zum Zeitpunkt der Begehung vorliegen sollten, damit eine reibungslose und vollständige Datenaufnahme während der Begehung gewährleistet werden konnte. Dies betrifft zum Beispiel die Strom- und Gasrechnungen der letzten drei Jahre sowie detaillierte Informationen zum Objekt und dessen technische Gebäudeausrüstung wie auch durchgeführte oder geplante Renovierungen. Bei den Vor-Ort-Terminen wurden unter anderem die Türbreiten und Deckenhöhen gemessen und der Zugang zum Keller begutachtet, um das Objekt auf die systemabhängigen Anforderungen prüfen zu können (vgl. Kapitel 2.1.2). In gleicher Weise wurden die Anzahl und Maße der vorhandenen Kamine dokumentiert und vereinfachte Aufmaße des potenziellen Aufstellraums angefertigt sowie Fotos des Objekts und deren jeweilige Altanlage gemacht.

2.2.2.2 Datenbereinigung

Die gesammelten Informationen werden halbautomatisiert in eine Objektdatenbank übertragen. Hierbei werden bereits einige simulationsvorbereitende Berechnungen durchgeführt. Die im Folgenden aufgeführten wesentlichen Berechnungen werden detailliert erläutert:

- ↳ Witterungsbereinigung des Energiebezugs
- ↳ Umrechnung von Energiebezug zu Heizwärme
- ↳ Umrechnung von Energiebezug zu Nutzwärme

Witterungsbereinigung des Energiebezugs

Da die heiztechnisch relevanten Temperaturverläufe über die Jahre unterschiedlich sind, müssen erfasste Verbrauchsdaten hinsichtlich der Witterung bereinigt werden, um vergleichbare Objektbedarfe transparent ableiten zu können. Die durchgeführte Witterungsbereinigung beruht auf den, nach VDI 2067 [7] bei einer angenommenen Raumtemperatur von 20 °C und einer Heizgrenztemperatur von 15 °C, berechneten Gradtagzahlen (GTZ). Nach Rücksprache mit dem Deutschen Wetterdienst wird als Vergleichsstandort Düsseldorf angenommen, da Düsseldorf örtlich und höhenteknisch vergleichsweise nah an Bottrop liegt.

- ↳ Bottrop / 51.5° nördlicher Breite, 6.9° östliche Länge / 55 m über NN
- ↳ Düsseldorf / 51.3° nördlicher Breite, 6.8° östliche Länge / 36.6 m über NN

Die zugrunde gelegten Gradtagzahlen für die Jahre 2009 bis 2012 sowie das 10-jährige Mittel als Vergleichsgröße sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Gradtagzahlen nach VDI 2067, 2009-2012 sowie 10-jähriges Mittel, Standort Düsseldorf

Jahr	2009	2010	2011	2012	10-jähriges Mittel
GTZ	3.074,1	3.086,6	3.159,8	3.130,6	3.112,8

Die gemittelte Witterungsbereinigung für die Anzahl an aufgenommen Jahren i erfolgt nach:

$$\bar{E}_{\text{ber.}} \left[\frac{\text{Einheit}}{a} \right] = \frac{\sum_0^i E_{\text{unber.}} \left[\frac{\text{Einheit}}{a} \right] \cdot \frac{GTZ_i}{GTZ_{10j.-\text{Mittel}}}}{i} \quad (2-2)$$

Umrechnung von Energiebezug zu Heizwärme

Im Protokoll der Vor-Ort-Begehung wurden unter anderem die Energiebezüge der letzten drei Jahre abgefragt. Der ausgefüllte Fragebogen ist im Gegensatz zur Erstbewerberbefragung noch nicht auf Kilowattstunden umgerechnet, sondern beinhaltet eine Angabe über den Energiebezug in der jeweils üblichen Einheit. Die Umrechnung auf die heizwertbezogene Heizwärme⁴ erfolgt **über** folgende Umrechnungsfaktoren:

☞ f für Erdgas:	$\text{kWh}_{\text{Hi}} / \text{kWh}_{\text{Hs}}$	$= 1,11^{-1}$
☞ f für Flüssiggas (bei 0°C):	$\text{kWh}_{\text{Hi}} / \text{kg}_{\text{Flüssiggas}}$	$= 12,87$
☞ f für Strom:	$\text{kWh}_{\text{Hi}} / \text{kWh}_{\text{Strom}}$	$= 1$
☞ f für Öl:	$\text{kWh}_{\text{Hi}} / \text{l}_{\text{Öl}}$	$= 9,96$
☞ f für Kohle:	$\text{kWh}_{\text{Hi}} / \text{kg}_{\text{Kohle}}$	$= 9,4$

Der mathematische Zusammenhang zur Ermittlung des heizwertbezogenen Heizwärmebedarfs ist in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$\bar{Q}_{\text{ber.}} \left[\frac{\text{kWh}_{\text{Hi}}}{\text{a}} \right] = \bar{E}_{\text{ber.}} \left[\frac{\text{Einheit}}{\text{a}} \right] \cdot f \left[\frac{\text{kWh}_{\text{Hi}}}{\text{Einheit}} \right] \quad (2-3)$$

Umrechnung von Energiebezug zu Nutzwärme

Für die Auslegung von Heizsystemen wird nicht die Heizwärme sondern die Nutzwärme benötigt. Der Nutzungsgrad des Heizungssystems beschreibt das Verhältnis von Nutz- zu Heizwärme im Objekt.

$$Q_{\text{Nutz}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] = Q_{\text{Heiz}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] \cdot \eta_{\text{Nutz}} \quad (2-4)$$

Wenn im Rahmen der Vor-Ort Begehung der Wirkungsgrad des verbauten Heizungssystems ermittelt werden konnte, wird ein Wirkungs- zu Nutzungsgradverhältnis von 0,88 für die Berechnung des Nutzungsgrades angenommen.

☞ $\eta_{\text{Nutz}} = \eta_{\text{Wirk}} \cdot 0,88$,wenn Wirkungsgrad vorhanden

Sofern kein Wirkungsgrad als Grundlage zur Nutzungsgradermittlung der Anlage ermittelt werden konnte, wird der Nutzungsgrad als Funktion des Anlagentalers angenommen.

☞ $\eta_{\text{Nutz}} = 0,70$	,für:	Anlagentaler > 20 Jahre
☞ $\eta_{\text{Nutz}} = 0,80$	,für:	20 Jahre \geq Anlagentaler > 15 Jahre
☞ $\eta_{\text{Nutz}} = 0,90$	,für:	15 Jahre \geq Anlagentaler > 10 Jahre
☞ $\eta_{\text{Nutz}} = 0,95$	,für:	10 Jahre \geq Anlagentaler

Bei dem gewählten Ansatz zur Ermittlung des Nutzenergiebedarfs sind eine Vielzahl an Annahmen getroffen worden, sodass Abweichungen zum realen Nutzenergiebedarf zu erwarten sind. Vor allem bei Energieträgern, deren Verbrauch unabhängig von der Lieferung ist (z. B. Kohle, Öl, Flüssiggas), sind die Angaben der Bewerber lediglich als grobe Richtgrößen zu verstehen, da nicht genau abgegrenzt werden kann, wie viel vom jeweiligen Energieträger pro Jahr benötigt worden ist.

⁴ Wirkungs- und Nutzungsgrade sind üblicherweise auf den Heizwert bezogen.

2.2.3 Vorermittlung von erwarteten Anlagenlaufzeiten

Als Grundlage für die Technologiezuordnung erfolgt die Ermittlung der zu erwartenden Anlagenlaufzeiten. Diese erfolgt im Rahmen einer vereinfachten mathematischen Laufzeitermittlung, die eine üblicherweise genutzte Methodik zur Systemauslegung auf Basis von Jahresdauerlinien zugrunde legt.

- ↳ Unterscheidung der Bedarfe für Trinkwarmwasser (TWW) und Heizwärme
- ↳ Methodik zur Betriebsprognose
- ↳ Verifizierung der Betriebsprognosen-Methodik

Die Technologiezuordnung basiert auf den Ergebnissen der vorermittelten Anlagenlaufzeiten.

Differenzierung TWW- und Heizwärmebedarf

Der bei der Datenbankerstellung berechnete Nutzwärmebedarf muss für die Anlagenbetriebsprognose in die Bedarfsbereiche Trinkwarmwasser und Heizwärme differenziert werden. Der TWW-Bedarf wird in Anlehnung an [8] mit 2 kWh/Pers./d angenommen. Auf ein Jahr mit 365 Tagen hochgerechnet ergibt sich ein TWW-Bedarf von 730 kWh/Pers./a.

$$\bar{Q}_{\text{TWW}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] = n_{\text{Pers.}} [1] \cdot 730 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot f_{\text{TWW}} [1] \quad (2-5)$$

Da nicht alle Objekte über eine zentrale TWW-Bereitung Verfügung wird diese Eigenschaft über den Faktor f_{TWW} berücksichtigt. Dieser Faktor ist wie folgt festgelegt:

- ↳ $f_{\text{TWW}} = 1,0$, für zentrale TWW-Bereitung
- ↳ $f_{\text{TWW}} = 0,5$, für zentrale und dezentrale TWW-Bereitung
- ↳ $f_{\text{TWW}} = 0,0$, für dezentrale TWW-Bereitung

Der Nutzwärmebedarf, der für die Heizwärmeversorgung verbleibt, ergibt sich aus der Differenz des Nutzwärmebedarfs und des TWW-Bedarfs.

$$\bar{Q}_{\text{Hzg}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] = \bar{Q}_{\text{Nutz}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] - \bar{Q}_{\text{TWW}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] \quad (2-6)$$

Methodik zur Betriebsprognose

Die Berechnung der zu erwartenden Anlagenlaufzeit beruht auf einer mathematisch ermittelten Jahresdauerlinie. Eine detaillierte Beschreibung des Ansatzes, an den sich die Methodik zur Betriebsprognose im Rahmen dieses Projekts anlehnt ist in [9] ausführlich beschrieben. Die Methodik wurde ferner für den modulierenden Betrieb der KWK-Systeme erweitert. Zusätzlich wird die obere Modulationsgrenze um 5 % erhöht und die untere Modulationsgrenze um 30 % verkleinert um die Funktionalität des Pufferspeichers zu berücksichtigen. Zum Teil wurden herstellerabhängig anlagenbedingt weitere Annahmen getroffen. Die zu erwartenden Vollbenutzungsstunden (V_{bh}) ergeben sich aus dem Verhältnis der erwarteten thermischen Arbeit des KWK-Systems zur Nennleistung des KWK-Systems.

$$V_{\text{bh}} = \frac{Q_{\text{KWK}}}{\dot{Q}_{\text{KWK}}} \quad (2-7)$$

Die ermittelten Vollbenutzungsstunden werden im ersten Schritt als Eingangsgröße zur Anlagenzuordnung (siehe Kapitel 2.2.4) herangezogen.

Verifizierung der Betriebsprognosen-Methodik

Zur Verifizierung des beschriebenen Vorgehens wurden Verlaufsdiagramme für die unterschiedlichen Systeme zur Prüfung durch die Hersteller erstellt. In Abbildung 13 ist ein exemplarisches Betriebsprognose-Diagramm anonymisiert mit den minimalen, maximalen und Ziel-Laufzeitvorgaben⁵ aufgeführt.

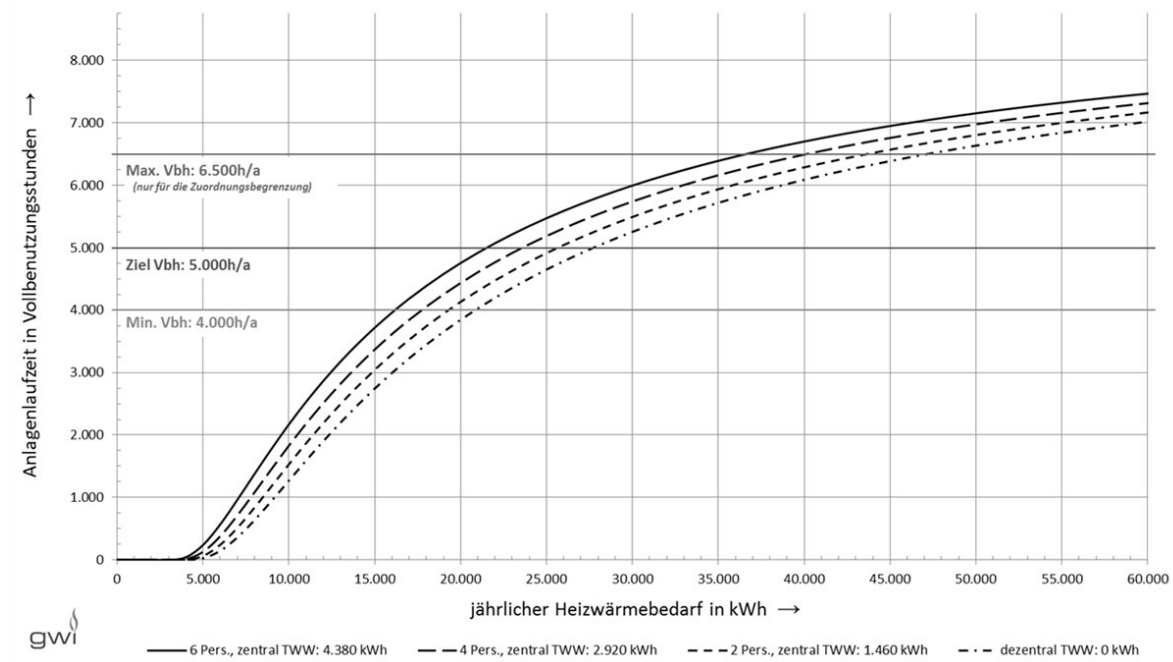


Abbildung 13: Exemplarisches anonymisiertes Betriebsprognose-Diagramm

2.2.4 Transparente Darstellung der Systemzuordnung

Die Zuordnung der Systeme zu den Objekten erfolgt im ersten Schritt automatisiert. Das für ein Objekt am besten geeignete System – die Eignung bezieht sich auf Auslegungsvorgaben der Hersteller – wird dem entsprechenden Objekt entsprechend Abbildung 14 zugeordnet.

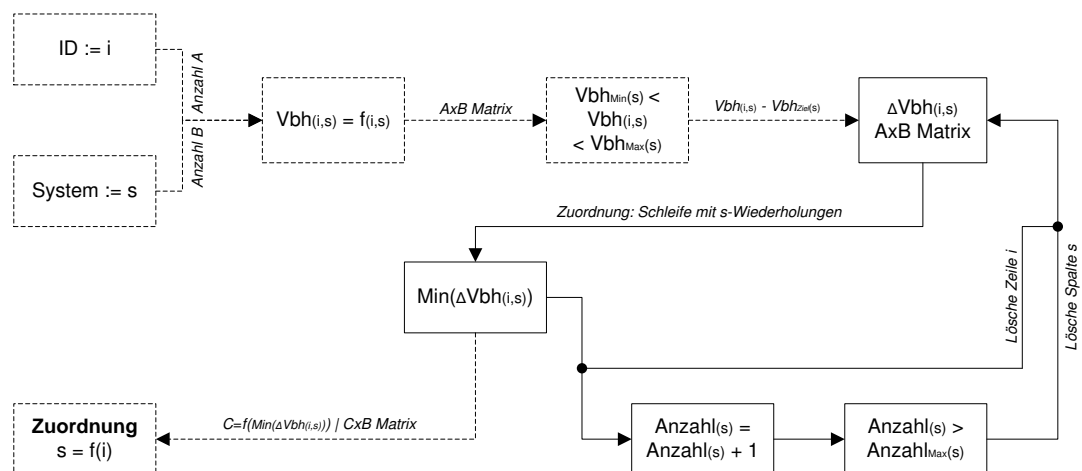


Abbildung 14: Flussdiagramm zur Anlagenzuordnung

⁵ Die Ermittlung der Ziel- und maximalen Betriebslaufzeit erfolgte bilateral mit den jeweiligen Herstellern, da i. d. R. nur eine minimal zu erreichende Betriebslaufzeit als Ausschlusskriterium vorgesehen ist.

Für jedes – durch die Bewerbung und die erste Vor-Ort-Begehung erfasste – Objekt (i), repräsentiert durch eine ID, wird für jedes KWK-System (s) die zu erwartende KWK-Laufzeit ermittelt. Im zweiten Schritt werden jene Objekt-Technologie-Kombinationen ausgeschlossen, die nicht innerhalb der Randvorgaben der Hersteller (minimale bzw. maximale Systemlaufzeit, siehe Abbildung 13) liegen. Für die verbleibenden möglichen Objekt-Technologie-Kombinationen wird die absolute Abweichung zur Ziel-Systemlaufzeit (siehe Abbildung 13) ermittelt, die als Grundlage des Zuordnungsprozesses herangezogen wird. Auf Basis des objektiven Entscheidungskriteriums werden die Systeme entsprechend der minimalen absoluten Abweichungen zu den Ziel-Systemlaufzeiten zugeordnet.

Sofern die minimalen Auslegungskriterien der Hersteller nicht erreicht werden können, stoppt die automatisierte Zuordnung. In diesem Fall können gleichzeitig Objekte ohne Zuordnung und Systeme ohne Zuordnung verbleiben. Die Wahrung der „Repräsentativität der Objektverteilung“ erfolgt nachgelagert durch den zweiten Realisierungspfad auf Basis einer erweiterten Bewerberanzahl (vgl. Kapitel 2.2.7) als Abschluss des Zuordnungsprozesses.

2.2.5 Verifizierung der Objekteignung durch Hersteller

Das beschriebene Vorgehen zeigt theoretisch die Einsatzbereiche der Systeme auf. Da es zwischen Theorie und Praxis jedoch immer Unterschiede gibt, werden die vom GWI zugeordneten Systeme anhand von anonymisierten Anlagenauswahlbögen durch die Hersteller zur Installation freigegeben. Dieser nachgelagerte Prozessschritt stellt die sinnvolle betriebsabhängige Einsetzbarkeit der zugeordneten KWK-Systeme sicher, welches im Sinne der Mitmacher und im Sinne der Projektnachhaltigkeit ist.

- VERTRAULICH -

Anlagenauswahlbogen | ID: [ID]

Belegung Objekt	Personen	Wohnfläche Objekt	m ²
Baujahr Objekt		Letzte Renovierung	
Alter Heizung	Jahre	Energieträger	
TWW-Bereitung			
Wärmeübertrager			

Endenergiebezug Kohle	kWh/a	Messfühler Wohnzimmer	
Themische Last ¹	kW	geplanter Aufstellraum (AR)	
Wärmebedarf ²	kWh/a	Raumhöhe AR	mm
▪ TWW-Bedarf ³	kWh/a	geringste Türbreite bis AR	mm
▪ Heizwärmebedarf	kWh/a	Elektrische Anschlüsse AR	
Strombedarf	kWh/a	Anzahl Kamine	

Weitere el. Systeme

Weitere th. Systeme

Geplante KWK-Anlage

Anlageneignungsprüfung GWI ⁴	Anlageneignungsprüfung Hersteller ⁴
▪ Vollbenutzungsstunden	h/a
▪ Vollbenutzungsstunden	h/a

¹ Annahme: $dQ/dt_{\text{max}} = dQ/dt_{\text{TWWmax}} + dQ/dt_{\text{H2GWR}} = (5 \cdot Q_{\text{th}} + Q_{\text{TWW}}) / 8760$

² Der Wärmebedarf resultiert aus dem Endenergiebezug und wurde mit Annahmen durch das GWI ermittelt. Die Hersteller sind angehalten den Endenergiebezug als Auslegungs- bzw.

³ Annahme: bei dezentraler TWW-Bereitung: $Q_{\text{TWW}} = 0$, bei zentraler TWW-Bereitung: $Q_{\text{TWW}} = n_{\text{Pst}} \cdot 2 \cdot 365$, bei Kombinationen $Q_{\text{TWW}} = n_{\text{Pst}} \cdot 365$

⁴ Prognostizierte Ergebnisse beruhend auf den aufgenommenen Objekteigenschaften. Es können keine Anlagenlaufzeiten etc. garantiert werden!

Abbildung 15: Exemplarischer anonymisierter Anlagenauswahlbogen

2.2.6 Finale Vor-Ort-Begehung

Nach den theoretischen Anlagenzuordnungen erfolgte die finale Begehung der Objekte. Die Begehung diente der finalen Prüfung des Objekts hinsichtlich der baulichen Eignung für die Einbringung der zugeordneten KWK-Anlage. Dies beinhaltete neben der erneuten Prüfung der räumlichen Abmessungen (Türbreiten des zu wählenden Transportweges, der Abgasführung etc.) die finale, ortsabhängige Planung zur Integration des KWK-Systems inklusive aller Komponenten in die bestehende Anlagenhydraulik.

Die finale Vor-Ort-Begehung wurde durch die GWI-Fachgruppe geleitet. Ausschreibungsbedingt wurden zu den Terminen alle Installateure, die sich im Rahmen der europaweiten Ausschreibung beworben haben und hinsichtlich der ausschreibungsabhängigen Kriterien (siehe Kapitel 2.3.1) als geeignet eingestuft worden sind, eingeladen. Diese haben vor Ort die Randinformationen für ein fundiertes Angebot für die objektabhängige Installation der KWK-Anlage sowie der zugehörigen projektbedingten Messtechnik aufgenommen. Durch die Anwesenheit eines Herstellervertreeters, wurde die zuvor theoretische Eignungsprüfung auch vor Ort erneut gegengeprüft. Somit konnten alle relevanten und ggf. kritischen Aspekte noch einmal Vor-Ort mit allen beteiligten Akteuren geprüft werden und offenen Fragestellungen gegenüber dem Hersteller erörtert werden. Durch dieses Vorgehen konnten Fehler bei der Angebotslegung sowie der abschließenden Einbringung der Systeme auf ein minimales Maß reduziert werden.

2.2.7 Differenzierung der unterschiedlichen Realisierungspfade

Der Weg von der Objektidentifikation bis hin zur finalen Zuordnung wird als Realisierungspfad bezeichnet. Das in den Kapitel 2.2.1 bis Kapitel 2.2.6 aufgezeigte strukturierte Vorgehen beschreibt die möglichen Teilschritte des übergeordneten Realisierungspfads, welches in Abbildung 16 in einem Prozessflussbild schematisch dargestellt ist.

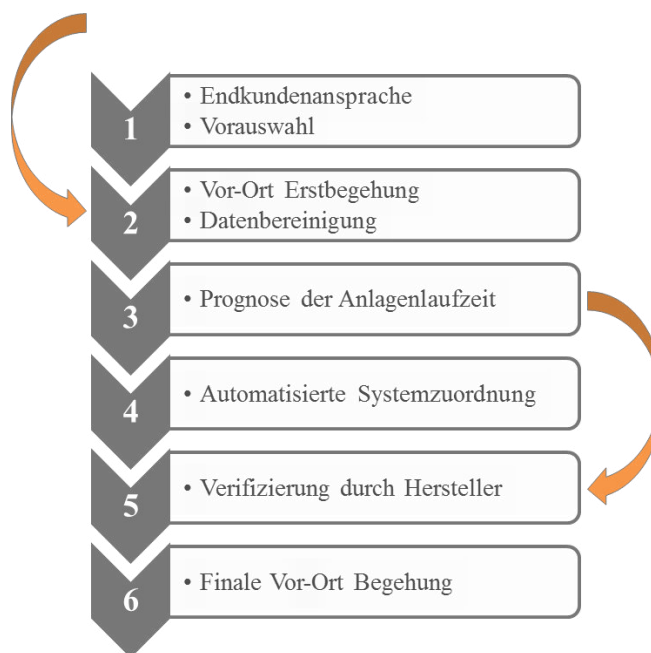


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Realisierungspfade

Entsprechend der Projektentwicklung sind unterschiedliche Realisierungswege genutzt und evaluiert worden, von denen nachfolgend zwei zentrale Wege aufgezeigt werden. Durch die Verfügbarkeit unterschiedlicher Realisierungspfade konnte eine hohe Flexibilität in Abhängigkeit von den zeitabhängigen Rahmenbedingungen erreicht werden.

Online-Bewerbung

Der Pfad „Online-Bewerbung“ stellt den idealisierten Weg dar. Hierbei werden von der Mitmacheraquise durch eine – in der öffentlich beworbenen – Online-Plattform über eine Vorauswahl mit nachgelagerter Vor-Ort-Erstbegehung die Grundlagen für eine Entscheidung eingeholt. Auf Basis von systemabhängigen prognostizierten Laufzeiten erfolgte die parallele Zuordnung einer größeren Anzahl an Systemen entsprechend der optimalen Eignung. Nach Freigabe der Vorplanung durch die Hersteller und einer abschließenden finalen Vor-Ort-Begehung, wurden sämtliche Aspekte des Zuordnungsprozesses abgeschlossen, sodass die Installation, die Inbetriebnahme sowie der Anlagenbetrieb initiiert werden konnten. Dieser detaillierte Realisierungspfad hat den Nachteil, dass spezifische Teilschritte nur auf eine vergleichsweise hohe Grundgesamtheit angewendet werden konnten. Die Einzelfallprüfung ist durch den beschriebenen Pfad nur bedingt möglich, sodass eine zielorientierte Adaption dieses Vorgehens durch den Pfad „Kunden werben Kunden“ durchgeführt worden ist.

Kunden werben Kunden

Beim Pfad „Kunden werben Kunden“ wurden Bewerber über projektbeteiligte Partner und/oder Mitmacher vorgeschlagen. Der im Online-Bewerbungspfad beschriebene Weg wurde in einer verkürzten Form durchgeführt um die vorgeschlagenen Bewerber zu prüfen. Beim zweiten Pfad wurden bereits Informationen über noch verfügbare Systeme berücksichtigt, um Bewerbungen ohne Erfolgsaussicht im Voraus auszuschließen. In diesem Rahmen wurden ferner allgemeine Randparameter vorab berücksichtigt um eine vergleichsweise hohe Abdeckung von repräsentativen Gebäuden mit unterschiedlichen Wärme- und Dämmstandards (vgl. Kapitel 0) sicherzustellen. Die nachgelagerte Wahl des zweiten Kernpfades war eine sinnvolle Entscheidung, da durch die zielorientierte Prüfung von Bewerbern die Zuordnungsquote positiv gesteigert werden konnte.

2.3 Installation und Inbetriebnahme

2.3.1 Anforderungen an die Installationsbetriebe

Analog zu den KWK-Systemen sowie zur Messtechnik erfolgt auch für die Installation eine europaweite Ausschreibung der Dienstleistung. Ausschreibungsbedingung ist für die Installation der KWK-Anlagen der Nachweis über eine erfolgreiche Schulung eines Mitarbeiters des Installationsbetriebs beim jeweiligen Hersteller sicherzustellen. Dieser Nachweis musste bis spätestens zum Zeitpunkt der Installation vorgelegt werden. Darüber hinaus beinhaltet die Installationsvoraussetzung die vorherige Demontage und Entsorgung des vorhandenen Altgerätes. Weiterhin ist die heizungstechnische Einbindung des KWK-Systems inkl. aller Systemkomponenten (Pufferspeicher, Pumpen, Zusatzheizgerät etc.) sowie die abgasseitige Einbindung der KWK-Anlage und des Zusatzheizgeräts durchzuführen. Die Installationsanforderung enthielt ferner die elektrische Einbindung der KWK-Anlage.

Ein weiterer Bestandteil der Installation ist die Integration der projektspezifischen Messtechnik. Hierzu gehören die Einbindung des Gaszählers und der Wärmemengenzähler in die Anlagenhydraulik. Durch eine geschulte Elektrofachkraft wurden die bidirektionalen Stromzähler am Hausanschluss und für die KWK-Anlage, die Temperatur und Feuchtefühler sowie der Datenlogger elektrisch eingebunden und anschließend mit dem Datenlogger verbunden.

Nach der Installation ist eine Spülung des Heizungssystems und ein hydraulischer Abgleich durchzuführen. Im Anschluss ist die Inbetriebnahme – die auch z. T. geteilt erfolgte – mit der GWI-Fachgruppe und einem Herstellervertreter inklusive eines Funktionstest des KWK-Systems und der Messtechnik vorzunehmen. Für die Dauer des Projekts war eine angemessene Rufbereitschaft bei etwaigen Störfällen zu gewährleisten.

2.3.2 Installation und Inbetriebnahme der KWK-Systeme

Für die Anlageninstallation waren die im Rahmen einer Ausschreibung ausgewählten Handwerker dazu verpflichtet, die herstellereigene Schulungen zur Installation der Mikro-KWK-Systeme zu besuchen. Für die Einbindung der Messtechnik in die Hydraulik wurden dem Handwerk exemplarische Installationsschemata der jeweiligen Hersteller mit den vorgesehenen Messstellen und Messbezeichnungen ausgehändigt (siehe Abbildung 17, Seite 28). Nach der Installation der Anlage erfolgte die Inbetriebnahme in der bestimmungsgemäßen Durchführung in Kombination mit dem Installateur und dem Hersteller. Die erstellten Protokolle der Inbetriebnahme verbleiben jeweils beim Anlagenhersteller.

Je nach Objekt war die Einbindung der Systeme in die Objekte mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, die das Handwerk jedoch sehr gut löste. Dies beruht zum einen auf den langjährigen Erfahrungen der Handwerker, zum anderen aber auch auf dem hinzugewonnenen Wissen durch die Herstellerschulungen. Beispielsweise konnte die Wärmeversorgung bei der Installation im Winter durch die temporäre Integration eines mobilen Heizgerätes gewährleistet werden. Vor allem räumliche Anforderungen der Hersteller wurden teilweise durch innovative Lösungsansätze erfüllt.

Bereits identifizierte Hemmnisse durch die Fachgruppenbegehung wurden aufgezeigt und in Abstimmung mit dem Mitmacher beauftragt. Dies betraf zum Beispiel die Einbringung des ausgewählten Systemspeichers. In einigen Fällen war die Einbringung auf Grund von zu geringen Deckenhöhen oder zu engen Zugängen nicht möglich, weshalb hierzu Alternativen zusammen mit dem Hersteller und Installateur erarbeitet wurden. Dies betraf hauptsächlich die Wahl eines anderen Speichersystems.

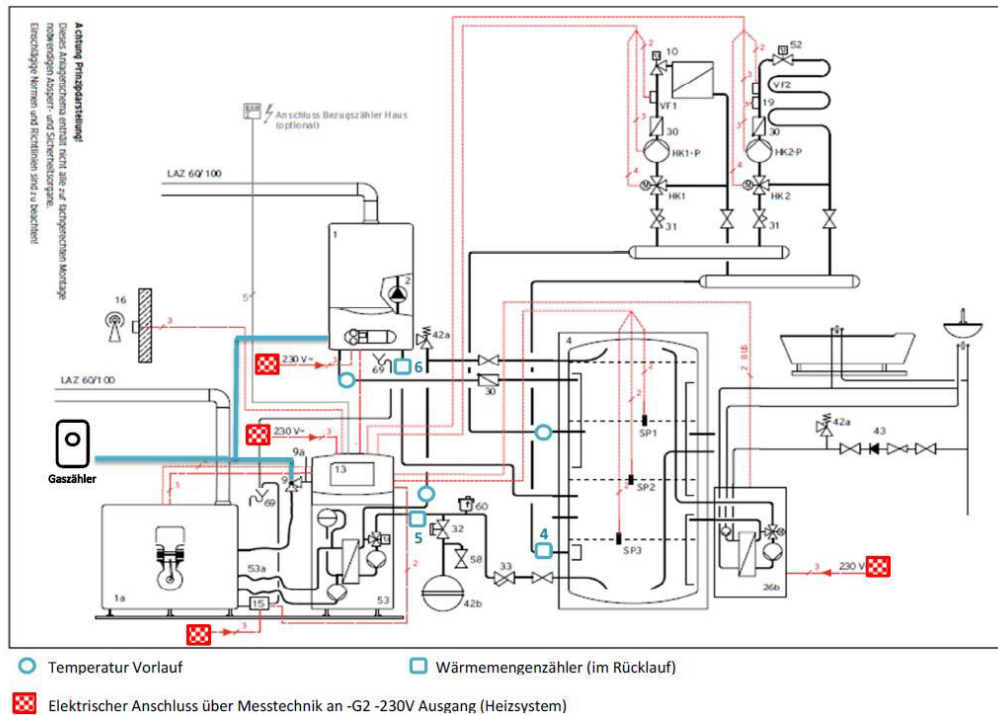


Abbildung 17: Exemplarisches Hydraulikschema mit zu verbauender Messtechnik, [10]

Nach abschließender Prüfung bei der finalen Vor-Ort-Begehung wurden im Rahmen der Installation unterschiedliche kritische Kernbereiche identifiziert:

- 🔥 Die Abgasführung stellt einen relevanten Aspekt bei der Einbringung von KWK-Systemen dar. Kann die Abgasführung von zwei getrennten Systemen nicht kaskadiert werden, muss die Möglichkeit bestehen zwei Abgasführungen in einem Kamin zu integrieren oder es müssen mindestens zwei separate Kamine für die Installation zu Verfügung stehen.
- 🔥 Der Flächenbedarf im Aufstellraum ist kritisch zu prüfen. Können nicht alle Systemkomponenten in einem Raum in der z. T. detailliert vorgeschriebenen Form aufgestellt werden, ist die Möglichkeit der erweiterten Installation in anliegenden Räumen zu prüfen. Bei der Installation sind Wartungsfreiräume unbedingt zu berücksichtigen.
- 🔥 Kann die Stabilität der tragenden Wand nicht gewährleistet werden, müssen Montagesysteme des jeweiligen Herstellers angewendet werden. Dabei ist zwingend darauf zu achten, dass wandhängende Geräte nach Herstellervorgaben von der tragenden Wand fachgerecht entkoppelt werden.
- 🔥 Für bodenstehende Systeme war im Projekt in den meisten Fällen ein Schall entkoppeltes Fundament vorgesehen, dessen einwandfreie Realisierung zur Reduktion von möglichen Geräuschentwicklungen sicherzustellen ist.

2.3.3 Installation und Inbetriebnahme der Messtechnik

Die Installation der Messtechnik erfolgte i. d. R. durch zwei Fachunternehmen. Die Anlagenhydraulik wurde dabei durch den Heizungsinstallateur durch einen Gaszähler und die Wärmemengenzähler ergänzt. Die Einbringung der für die Messtechnik relevanten Stromzähler sowie die Verdrahtung der gesamten Zähler mit der Datenübertragungsbox erfolgten durch eine Elektrofachkraft.

Vor der Installation wurde jedes messtechnische Bauteil eigens auf den vorgesehenen Einsatzbereich manuell vorkonfiguriert. Dies beinhaltete die Vordefinition der Messgeräte ID sowie die Voreinstellung der zu übermittelnden Datenpakete. Damit die zu verbauende Messtechnik richtig positioniert wird, wurden die Messgeräte entsprechend gelabelt und die Messgerätepositionen jeweils in das Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der Hersteller eingezeichnet (siehe Abbildung 17, Seite 28). Die Datenlogger-Boxen wurden für den Einsatz weitestgehend vorverdrahtet, um den Installationsaufwand sowie die Fehlereintrittswahrscheinlichkeit zu minimieren. Durch die Implementierung einer eigenen Datenlogger-Sicherung wurde sichergestellt, dass die Messtechnik ausschließlich durch die GWI Fachgruppen vor Ort in Betrieb genommen werden konnte.

Für die Installation der Datenlogger-Box und der Stromzähler sowie die Verdrahtung der gesamten Messtechnik wurde ein elektrischer Schaltplan für jeden Anlagentyp angefertigt (siehe exemplarisch Abbildung 18). Die Pläne veranschaulichen die Platzierung der Sensoren auf den zugehörigen Messkanälen. Die Datenaufnahme wurde dadurch möglichst standardisiert, um die Auswertung der Daten zu automatisieren. Die Ausgabe der individuell zusammengestellten Messdaten- und Datenlogger-Pakete sowie die Installationspläne wurden im Rahmen einer standardisierten Protokollierung erfasst.

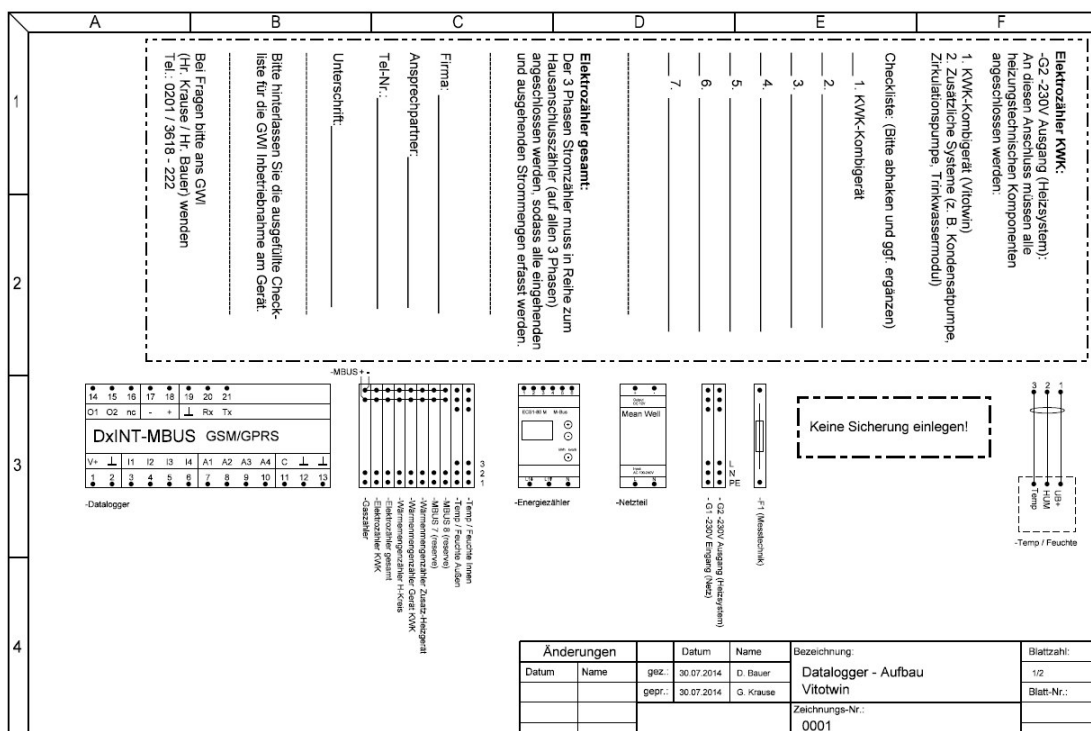


Abbildung 18: Exemplarischer Elektroschaltplan zur Messtechnikintegration

Bei der Inbetriebnahme der Messtechnik wurde die gesamt verbaute Messtechnik auf die richtige Installation vor Ort und über die parallele Live-Analyse der eingehenden Messdaten auf den GWI-Datenserver geprüft. Im Fokus hierbei standen die Messstellenposition und Konfiguration, die Verkabelung sowie die Überprüfung der Empfangsstärke der GSM-Verbindung und Übertragung auf den GWI-Server. Ein eigens für die Inbetriebnahme der Messtechnik ausgearbeitetes Protokoll (siehe Anhang A5) wurde zur standardisierten Abwicklung der Inbetriebnahmen verwendet. Dieses beinhaltet Checklisten für die Belegung der Anschlüsse, die Einbauorte der Messtechnik – insbesondere der Temperatur- und Feuchtefühler – sowie Angaben zur möglichen Abweichungen der vorgesehen Installationsorte und die gegebenenfalls erforderliche Dokumentation besonderer Fälle von Anlagentypen. Trotz der Erstellung eines vereinfacht nutzbaren Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der Hersteller inklusive der Positionierung der zu verbauenden Messtechnik, erfolgten erwartungsgemäß kleinere aber auch größere Fehler bei der Installation. Die Fehlerbehebung auf der hydraulischen Installationsseite umfasste signifikant die Umkonfiguration der Wärmemengenzähler, da diese vergleichsweise häufig nicht an den richtigen Messpositionen installiert worden sind. Des Weiteren wurden bei der Inbetriebnahme der Messtechnik Fotos der Messstellen und von den installierten Anlagen zur Fotodokumentation gemacht.

2.4 Betriebsphase

2.4.1 Endkundenbetreuung

In der Betriebsphase gab es eine klare Zuordnung der Projektpartner zu Themen und Herausforderungen, die bei den Mitmachern bzw. Anlagebetreibern aufkamen. Zu den allgemeinen und formalen Anfragen gehörten u. a. die Unterstützung bei der Anmeldung der Anlage bei dem BAFA (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) in den unterschiedlichen Varianten, die Kontaktaufnahme mit dem Hauptzollamt und die Kommunikation mit der ELE Verteilnetz GmbH. Zu den komplexeren Anfragen gehören Fragen zu der Durchführung, der Abrechnung und dem Umfang von Handwerkerleistungen, der Vermittlung bei Unstimmigkeiten zwischen den Partnern sowie der Sichtung und Erläuterung von Abrechnungen in Kommunikation mit dem Verteilnetzbetreiber und Energieversorger.

Um aufkommende Unklarheiten von vorne herein zu vermeiden, wurden dem Kunden bei Vertragsabschluss Beiblätter mit umfangreichen Informationen zur Anmeldung einer KWK-Anlage sowie ein Kontaktdatenblatt mit Ansprechpartnern in den relevanten Bereichen ausgehändigt (siehe Anhang A6). Das Beiblatt zur Vorgehensweise der Anmeldung des KWK-Systems beinhaltet eine Übersicht der notwendigen Meldungen sowohl vor als auch nach der Inbetriebnahme und Informationen über die jährlich einzureichenden Anträge. Dies sind unter anderem die Mitteilung an den örtlichen Netzbetreiber, das elektronische Anzeigeverfahren des BAFA und die jährliche Strommeldung für die Vergütung sowie die Beantragung der Energiesteuerrückerstattung. Akteure bei der Anmeldung der KWK-Anlagen sind neben den betreffenden Heizungsinstallateuren und Elektrofachkräften der örtliche Verteilnetzbetreiber, das BAFA sowie das zuständige Hauptzollamt.

Bei den Anmeldungen beim Verteilnetzbetreiber hat sich zu Beginn der Installationsphase herausgestellt, dass es vermehrt zu Schwierigkeiten bzw. Unstimmigkeiten der Zuständigkeiten beim Ausfüllen der Vielzahl an Formularen gekommen ist. Daraufhin wurde für das Anmeldeverfahren ein farblich gekennzeichnete Leitfaden erstellt (siehe Anhang A6), dessen Inhalte unter anderem beim KWK-Praxisforum an Interessierte weitergegeben wurde. Die gewählten Farbmarkierungen klären die Zuständigkeiten und erleichtern das Ausfüllen der Anmeldeunterlagen erheblich. Zudem wurden Herstellerangaben weitestgehend vorausgefüllt und Herstellernachweise bereitgestellt. Der Umfang der Antragsunterlagen liegt bei rund 20 Seiten und ist stark vom jeweiligen Hersteller abhängig.

Zudem wird dem Kunden bei möglichen Anlagenstörungen im Rahmen des Projekts eine Unterstützung zur schnellstmöglichen Fehlerbehebung in Form einer telefonischen Störungsmeldung und E-Mail-Kontaktadresse angeboten (siehe Anhang A7). Hierzu wurden eine projektbezogene Rufnummer eingerichtet und die Mitarbeiter der GWI Fachgruppen bei den unterschiedlichen Herstellern geschult. Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit der Störungsmeldung per Telefon oder per E-Mail zur Erfassung der Störungen und zur Weiterleitung dieser zum jeweiligen Hersteller oder Heizungsinstallateur. Dadurch wird weiterhin eine nachgelagerte Fehlerkategorisierung ermöglicht. Zugleich kann der Mitmacher telefonisch bei der Logbuchführung (siehe Kapitel 2.4.2.1) unterstützt werden. Im Falle einer zeitlich dringenden Störung ist eine durchgängige Erreichbarkeit durch die Störungsrufnummer des Installateurs oder auch Herstellers gegeben.

2.4.2 Störungsdokumentation und -auswertung

2.4.2.1 Logbuch

Zur Evaluation des Betriebs der Anlagen wurde ein KWK-Logbuch (siehe Anhang A8) entwickelt und den Mitmachern bei der Inbetriebnahme der KWK-Anlage mit einer kurzen Erläuterung zur Logbuchführung übergeben. Zur besseren Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit enthielt das Logbuch bereits eine vorausgefüllte Musterseite. Durchgeführten Arbeiten zur Störungsbeseitigung sollen wenn möglich vom Installateur oder Kundendienst des Herstellers vor Ort ausgefüllt werden. Zum geschlossenen Erfahrungsaustausch wird das Logbuch regelmäßig abgefragt.

Das Logbuch wurde so erstellt, dass der Kunde mögliche Störung und Änderungen an der Regelung unter Angabe des zuzuordnenden Zeitpunkts dokumentieren kann. Hierdurch wird die Möglichkeit einer detaillierten Störungsauswertung gegeben. Ferner können Angaben zur Änderungen an der Systemregelung nachvollzogen und zum besseren Verständnis von messtechnisch erfassten Systemverhalten herangezogen werden.

2.4.2.2 Störungsauswertung

Zur Bewertung der Systemfunktionalität werden im Folgenden die erfassten Störungen ausgewertet. Bei der Interpretation ist zu berücksichtigen, dass lediglich jene Störungen in der Auswertung enthalten sind, die dem GWI bis zum 30.11.2015 vorlagen, wobei nicht sichergestellt ist, dass alle Störungen entsprechend der Vorgaben an das GWI weitergeleitet wurden.

Der Begriff „Störung“ ist für die nachfolgenden Interpretationen der Ergebnisse nähergehend zu definieren. Als Störung werden jene Ereignisse angesehen, die den Endkunden dazu veranlassen haben das GWI zu kontaktieren. Störungen umfassen somit einen weitgefächerten Bereich, der auf der einen Seite Teil- oder Totalausfälle berücksichtigt, bei denen mitunter Reparaturen oder auch der Austausch von Teilsystemen erforderlich waren. Häufig konnten Störungen jedoch auch durch Korrekturen von Einstellungen oder Ähnlichem behoben werden, sodass eine Störung nicht immer mit einem Personaleinsatz des Installateurs oder Handwerks einherging. Auf der anderen Seite sind Störungsmeldungen enthalten, die aufgrund subjektiver Unzufriedenheit der Endnutzer (z. B. nicht korrekt eingestellte Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung) eingegangen sind, die nur indirekt bedingt sind. Da eine qualitative und vergleichbare Bewertung jedes einzelnen Störfalls nicht möglich ist, beruhen die nachfolgenden Ergebnisse auf quantitativen sowie gruppenabhängigen Bewertungen.

In Abbildung 19 sind die Störungen in Bezug auf die gesamte Laufzeit der Anlagen sortiert nach der Anzahl an Störungen aufgetragen.

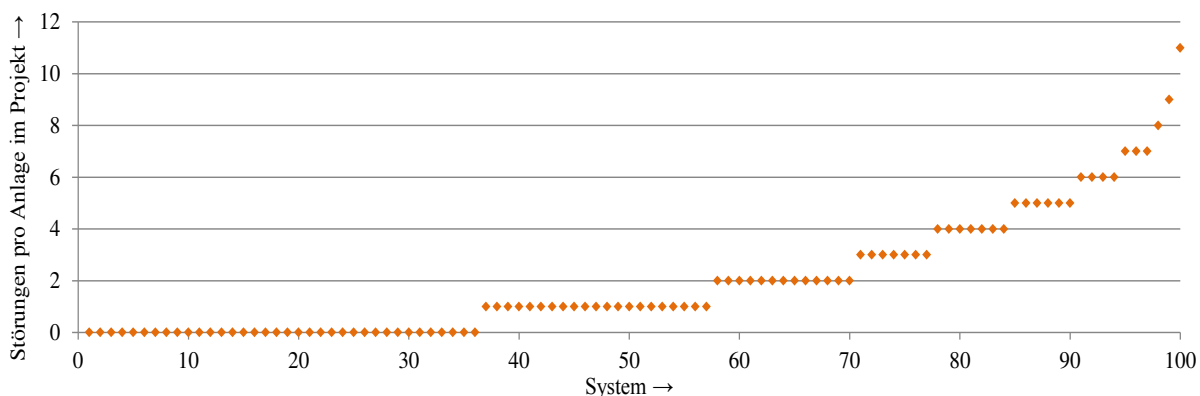


Abbildung 19: Sortierte Auftragung der Störungen pro Anlage bis zum 30.11.2015

Bei einem Großteil der installierten Gesamtsysteme ist eine vergleichsweise geringe Anzahl an Störungen aufgetreten. Bei mehr als einem-Drittel aller Systeme liegen bis zum jetzigen Zeitpunkt keinerlei Informationen über Störungen vor. Mehr als zwei-Drittel aller Systeme hatten innerhalb der Betriebszeit zwei oder weniger Störungen. Entgegen der Erwartung gab es jedoch bei einigen Systemen eine Häufung von Störungen, was zu einer vermehrten Unzufriedenheit bei den betroffenen Endkunden führte. Durch das engagierte, in Kapitel 2.4.1 beschriebene, Endkundenbetreuungsangebot konnten die Störungen jedoch schnellstmöglich, zielgerichtet und in direkter Abstimmung mit dem Hersteller und dem jeweiligen Installateur behoben werden. Die Ursache der Störungen ist – wie bereits im einleitenden Teil beschreiben – vielschichtig. Um eine detaillierte Auswertung der Störanfälligkeit der Systeme ableiten zu können, sind in Abbildung 20 die Störungshäufigkeit in Abhängigkeit von dem Betriebsin-

tervall aufgetragen um. Die gewählte Auftragsform ist darin begründet, dass sich die Systeme durch unterschiedliche Laufzeiten auszeichnen. Die Normierung auf die Anlagenzahl berücksichtigt die unterschiedliche Anzahl an Systemen, die in einem entsprechenden Betriebsstundenintervall in Betrieb waren. Anteilige Laufzeiten in einem Zuordnungsintervall werden als vollständige Zeiträume betrachtet, sodass geringfügige Abweichungen entstehen, von denen jedoch kein signifikanter Effekt auf die ableitbare Tendenz zu erwarten ist.

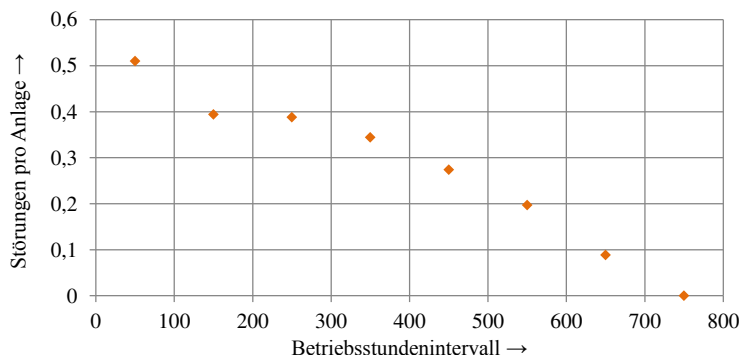


Abbildung 20: Störanfälligkeit in Abhängigkeit von dem Betriebsstundenintervall bis zum 30.11.2015

Die gemeldeten Störungen nehmen mit zunehmenden Betriebsstundenintervallen ab. Die abnehmende Tendenz spricht vor allem dafür, dass kleinere Fehler bei der Installation und in der ersten Betriebsphase aufgetreten sind und diese nach Behebung weitestgehend dauerhaft beseitigt wurden. So ist langfristig ein störungsarmer bis störungsfreier Betrieb zu erwarten. Für eine genauere Betrachtung wurden folgende Kategorien definiert und die gemeldeten Störungen entsprechend zugeordnet.

- 🔥 KWK-Modul
- 🔥 ZHG-Modul
- 🔥 System-Peripherie
- 🔥 Objekt-Peripherie
- 🔥 Sonstiges

Im linken Teil von Abbildung 21 sind die Auswertungen der Ergebnisse der Kategorisierung aufgeführt. Zur besseren Bewertung der Fehlerkategorien sind die Fehler pro Anlage und Betriebsintervall im rechten Teil der Abbildung integriert, wodurch Entwicklungen und Tendenzen aufgezeigt werden.

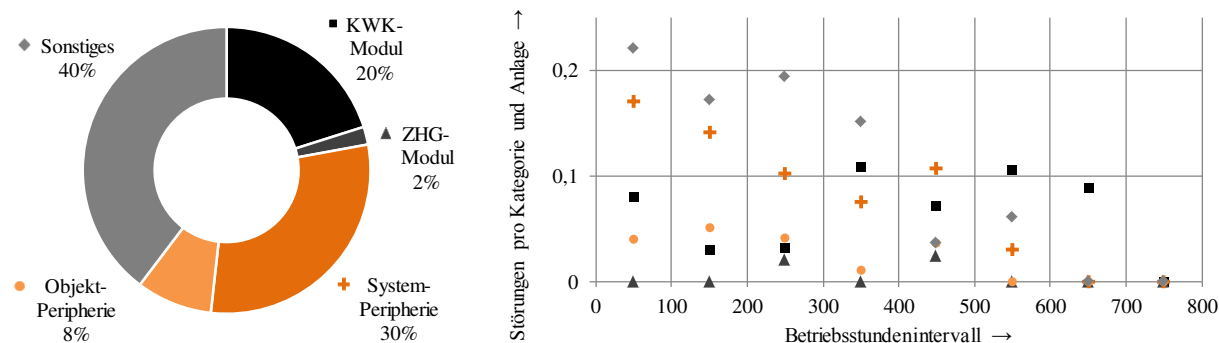


Abbildung 21: Kategoriebezogene Verteilung der Störungen (links) und Störanfälligkeit in Abhängigkeit von dem Betriebsstundenintervall sowie der Kategorie (rechts) bis zum 30.11.2015

Die Kategorisierung der Störungen verdeutlicht, dass knapp 50 % der Störungen direkt auf die Anlagentechnik zurückzuführen sind. Hierbei liegt jedoch mit 30 % der Gesamtstörungen ein Großteil innerhalb der Systemperipherie, wo es beispielsweise zu Störungen durch Fehler an der Kondensathebepumpe (einem Standardbauteil) kam. Die anderen 50 % der Fehler sind der Objektperipherie sowie sonstigen, nicht tiefergehend kategorisierbaren Störungen zuzuordnen.

Die Auswertung der betriebsintervallabhängigen Störanfälligkeit verdeutlicht, dass in den meisten Kategorien die Störungen mit zunehmenden Betriebsintervallen deutlich reduziert werden konnten. Lediglich beim eigentlichen KWK-Modul ist kein direkter Trend ableitbar, was vor allem in der vergleichsweise geringen Anzahl an zugrunde gelegten Systemen in den späteren Betriebsintervallen zurückzuführen ist. Durch eine längerfristige Auswertung kann eine robuste Aussage zur Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität getroffen werden.

2.4.3 Funktions- und Plausibilitätschecks

Die Überprüfung der eingehenden Messdaten hinsichtlich der Verfügbarkeit und der Plausibilität erfolgte im Rahmen einer Messtechnikprüftabelle (siehe Abbildung 22). Dabei wurde mit Hilfe eines Ampelsystems neben der Prüfung des Eingangs der Messdaten auch die zeitliche Plausibilitätsprüfung dokumentiert, sodass der messtechnische Bewertungszeitraum messpunktabhängig differenziert werden kann.

A	B	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	
Unit-ID	Döbelt-ID	M-Bus 3	Status	Zeitstempel	kum. N-Volumen	kum. B-Volumen	kum. Energie + SZ 1P DP1	kum. Energie - SZ 1P DP2	Spannung	Stromstärke	Zeitstempel	kum. Energie + SZ 3P DP3	kum. Energie - SZ 3P DP4	Leistung	kum. Energie WMZ DP1	kum. Durchfluss	Leistung	Durchfluss	Vorlauftemp.	Rücklauftemp.	Temp. Differenz	Zeitstempel	M-Bus 4	Status	
				I	I	Wh	Wh	V	mA		Wh	Wh	W	kWh	m³	kw	l/h	°C	°C	K					
1	läuft nicht auf																								
2	läuft auf																								
3	läuft auf, nicht p																								
4	läuft auf, plausi																								
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		-																							
		GZ																							
		SZ 1P																							
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		WMZ	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●
		SZ 3P	●	-	-	-	-	-	-	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	WMZ	●

Abbildung 22: Anonymer Teilausschnitt der Messtechnikprüftabelle

Für die Prüfung wurden sämtliche Datenpunkte der einzelnen Messgeräte (siehe Kapitel 2.1.3) in der Tabelle aufgeführt und geprüft. Wie in folgender Abbildung dargestellt, werden nach der Auswahl des jeweiligen Messgeräts an der betreffenden M-Bus-Stelle die relevanten Datenpunkt aktiviert bzw. nicht relevante Datenpunkte deaktiviert. Durch diesen Vorgang wird sichergestellt, dass alle betreffenden Datenpunkte einer Messstelle auf Plausibilität geprüft werden. Hierdurch erfolgte eine schnelle und zielführende Arbeitsweise, auch wenn die detaillierte Analyse der Messdaten zur Feststellung der Plausibilität sehr arbeitsintensiv war, da jede Messstelle manuell hinsichtlich des korrekten Messdatenverlaufs geprüft wurde. Im Rahmen der Funktions- und Plausibilitätschecks erfolgten folgende Unterscheidungen:

- ↳ läuft nicht auf
- ↳ läuft auf
- ↳ läuft auf, nicht plausibel
- ↳ läuft auf, plausibel

Für die finale Bewertung der Plausibilität der Messdaten wurde unter anderem die Datenbankvisualisierung unter Nutzung der messtechnischen Kontrollumgebung (siehe Abbildung 23) herangezogen. Durch die manuelle Bewertung von Leistungs- und Lastverläufen konnten Messfehler, die beispielsweise durch eine abweichende Integration der Messtechnik hervorgerufen werden konnten, identifiziert und behoben werden.

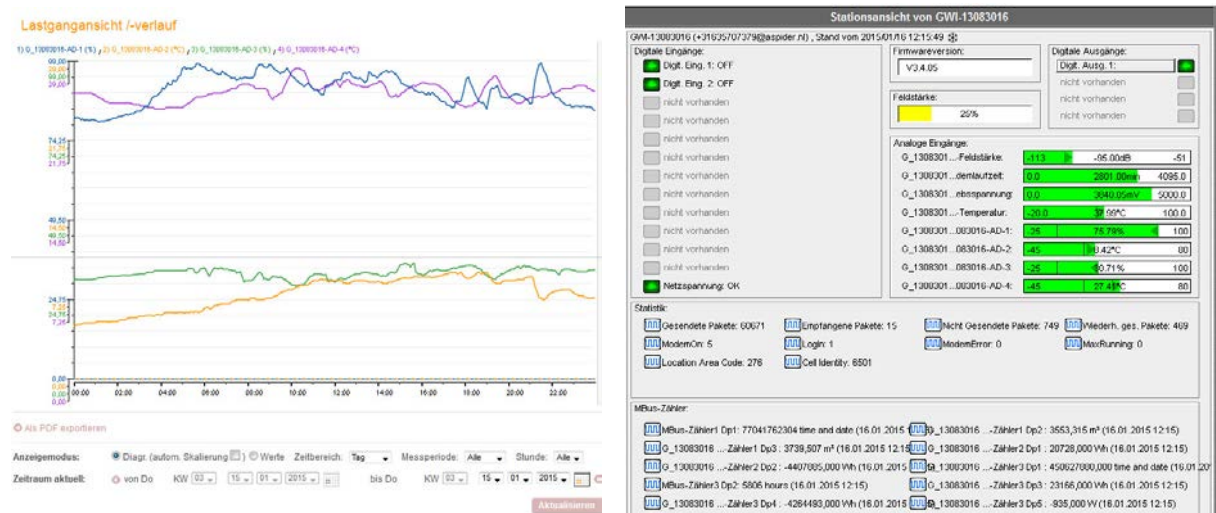


Abbildung 23: Auszug aus der Datenbankvisualisierung (links) und Kontrollumgebung (rechts)

Neben der Datenbankvisualisierung und Kontrollumgebung wurden eigens erstellte Programme genutzt, um kumuliert erfasste Energiemengen zeitlich zu differenzieren, um Prüfungen der Leistungsverläufe zu ermöglichen. Hierbei lag der Fokus auf der Konvertierung der erfassten kumulierten Energiemengen zu mittleren Leistungen sowie auf dem Umgang mit Messgenauigkeiten, Aktualisierungsintervallen und Messdatenausfällen.

2.5 Evaluation des Projektverlaufs

2.5.1 Zusammenfassung des Projektverlaufs

Das Projekt zeichnet sich durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Themenschwerpunkten aus, deren Koordination einen zentralen Bestandteil der Projektrealisierung dargestellt hat. In Abbildung 24 ist der Projektverlauf mit den jeweiligen sowohl technischen als auch administrativen Aufgaben zusammengefasst dargestellt.

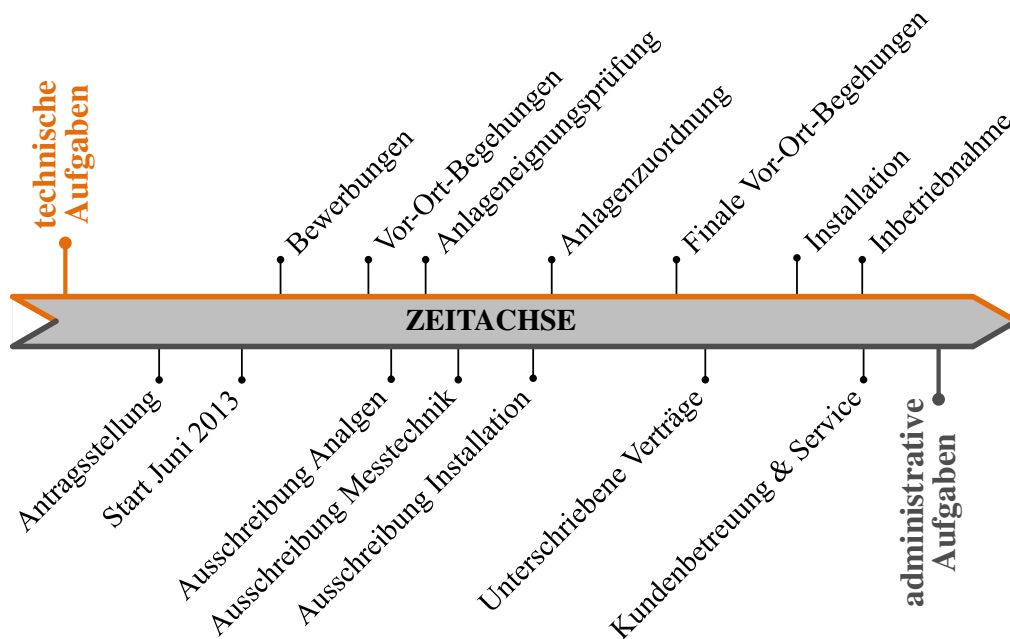


Abbildung 24: Projektverlauf unterteilt in technische und administrative Aufgaben

Nach Beginn des Projekts erfolgte zunächst, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, die Mitmacheraquise und Technologiezuordnung. Dies beinhaltete die Endkundenansprache sowie die Bewerbungsphase. Die eingegangenen Bewerbungsunterlagen durchliefen vorerst ein Auswahlverfahren, welches als Entscheidungsgrundlage für die Vor-Ort-Erstbegehungen diente. Nach Anlauf der Vor-Ort-Begehungen erfolgten auf der administrativen Seite die Ausschreibungen für die Anlagen, die Messtechnik und die Installationen. Nach Prüfung und Beauftragung der Angebote folgte, wie in Kapitel 2.2.3 ausführlich dargestellt, die Anlageneignungsprüfung der Objekte. Im Anschluss wurden die Anlagen zugeordnet und einer zusätzlichen Verifizierung durch den Hersteller hinsichtlich ihrer Eignung unterzogen. Im weiteren Projektverlauf wurde die finale Vor-Ort-Prüfung der Objekte hinsichtlich der baulichen Eignung für die Einbringung der zugeordneten KWK-Anlage durchgeführt. Darin enthalten war die Prüfung der räumlichen Abmessungen sowie die Planungen zur Integration der KWK-Systembestandteile in die bestehende Anlagenhydraulik. Eingeladen zu den finalen Vor-Ort-Prüfungen wurden alle Installateure, die sich im Rahmen der europaweiten Ausschreibung beworben hatten und hinsichtlich der ausschreibungsabhängigen Kriterien, siehe Kapitel 2.3.1, als geeignet eingestuft worden sind. Die finale Vor-Ort-Begehung diente den Installateuren somit auch zur Beschaffung aller notwendigen Randinformationen für die fundierte Angebotserstellung bezüglich der Anlagen- und der projektbedingten Messtechnikinstallation.

Die Inbetriebnahme der KWK-Anlage erfolgte durch den Hersteller. Die projektspezifische Messtechnik wurde durch eine der GWI-Fachgruppen mit in Betrieb genommen. Da das vielschichtige Anmeldeverfahren für eine Mikro-KWK-Anlage sehr aufwändig ist, wurden Unklarheiten bezüglich der Zuständigkeiten der verschiedenen Akteure erwartet. Aus diesem Grund wurde ein Leitfaden für die Anmeldung einer KWK-Anlage erarbeitet und ein Kundenservice für etwaige Anlagenstörungen eingerichtet.

Nach erfolgter Anlageninstallation stand die messtechnische Datenaufnahme zur nachgelagerte Realdaten-Analyse im Vordergrund. Parallel zur technischen Umsetzung der Demonstration erfolgten die umfassenden wissenschaftlichen Arbeiten. Auf die frühzeitig erarbeiteten theoretischen Grundlagen wurden die erfassten Messdaten übertragen, um bereits nach einer kurzen Zeit der Datenerfassung Ergebnisse aus dem Projekt ableiten zu können.

Arbeitsflussdiagramm bis zur Installation

Für den Zeitraum vom Projektbeginn bis zur Installation der Anlagen wurde ein Arbeitsflussdiagramm hinsichtlich der Zuständigkeiten der beteiligten Akteure erstellt, worin die Arbeitsbereiche bzw. Zuständigkeiten der Innovation City Management GmbH (ICM), des Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) und des Handwerks dargestellt sind (Anhang A9). Zu Beginn lag die Zuständigkeit für die Akquise der Endkunden sowie für die Bereitstellung einer Plattform zur Onlinebewerbung bei der ICM. Dabei wurden dem GWI regelmäßige Updates zur weiteren Datenverarbeitung und zur Auswahl der ersten Vor-Ort-Begehungen, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, übermittelt. Die ICM war zunächst Schnittstelle hinsichtlich der Kommunikation zwischen Bewerber und GWI, weswegen die Übermittlung des aktuellen Objektstatus an den Kunden zu deren bestehenden Aufgaben gehörte. Diesbezüglich wurden seitens GWI regelmäßige Updates zum Objektstatus und weiteren Kommunikation an die ICM übermittelt. Im Falle einer Eignung für die Vor-Ort-Begehung, wurden die Bewerber vorab durch ICM über die weitere Vorgehensweise informiert. Gleichmaßen wurden bei nicht Erfüllung der Vorauswahlkriterien Absagen versendet.

Die Vereinbarung der Vor-Ort-Begehungstermine erfolgte im weiteren Verlauf direkt über das GWI. Im Anschluss folgte der Zuordnungsprozess, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben und eine zusätzliche Verifizierung der vorab anonymisierten Daten durch den Hersteller. Nach erfolgter Freigabe der Hersteller konnten die weiteren Projektschritte bis hin zur Phase der Vertragsunterzeichnungen erfolgen.

Nach Erteilung der Installationsaufträge rückten die Zuständigkeiten der Heizungsinstallateure in den Fokus. Installationsrelevante Fragestellung hinsichtlich des KWK-Systems hatten die Betriebe direkt mit dem Hersteller zu klären. Für die elektroseitige Installation der projektspezifischen Messtechnik wurde die Möglichkeit eingeräumt Unteraufträge an das Elektro-Fachhandwerk zu vergeben, da dieser Bereich nicht von allen SHK-Fachhandwerkern durch eigenes Personal abgedeckt werden konnten. Detailfragestellungen hinsichtlich der Installation der Messtechnik waren direkt mit dem GWI abzustimmen. Die Abnahme der KWK-Anlage erfolgte durch den SHK-Installateur und dem Hersteller, die Abnahme der Messtechnik erfolgte in Anwesenheit einer der GWI-Fachgruppen.

2.5.2 Fortschrittsanalyse

Die Entwicklung des Projektfortschritts wird quantitativ in Abbildung 25 in Abhängigkeit von den einzelnen Projektphasen zur Realisierung (Bewerbung, Vor-Ort-Begehung, finale Vor-Ort-Prüfung und Vertragsunterzeichnung) zeitlich differenziert dargestellt. Bei der Interpretation der Bewerbungsphase ist zu berücksichtigen, dass es sich in diesem Falle lediglich um jene Bewerbungen handelt, die über die Online-Plattform eingegangen sind. Gleichermäßen werden die Fortschritte der konsekutiven Projektphasen nach der Installation (Inbetriebnahme (IBN) Gerät, Inbetriebnahme (IBN) Messtechnik und Messtechnik plausibel) aufgezeigt.

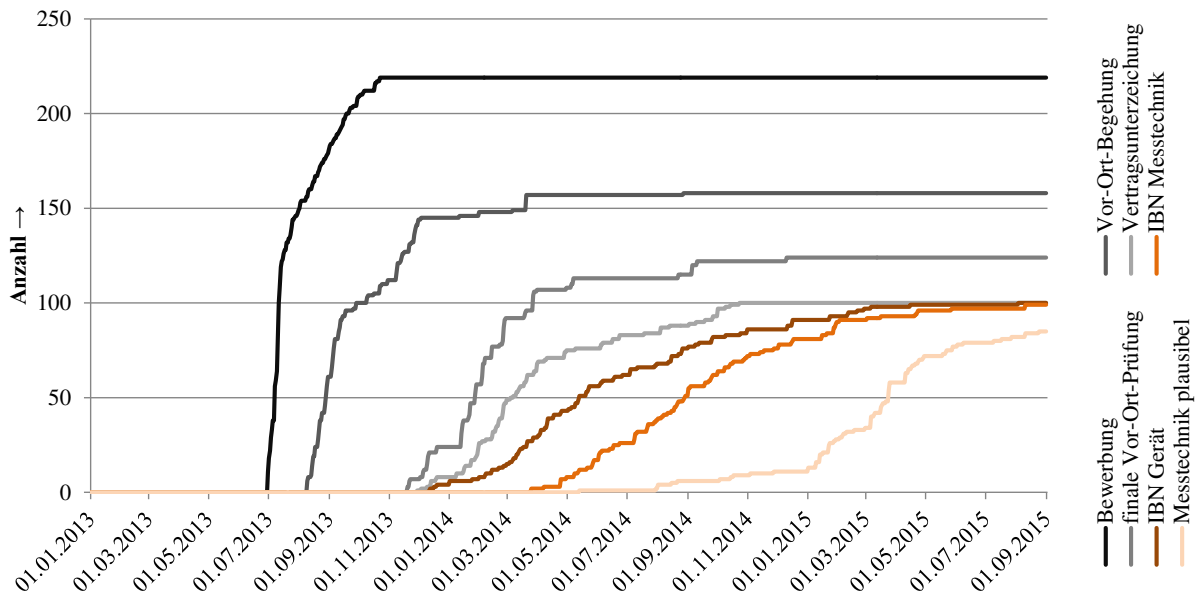


Abbildung 25: Zeitdifferenzierte Projektfortschrittsanalyse

Aufgrund der intensiven Werbung durch Informationsabenden, Energieberatungen und unterschiedlichste Medien folgten, wie in Abbildung 25 ersichtlich, gleich zu Beginn eine Vielzahl an Bürgern des Projektgebiets den Aufrufen zur Bewerbung, die sie mit Hilfe des kurzen Online-Fragebogen eigenständig durchführen konnten. Basierend auf zu prüfenden ortsabhängigen Kriterien taten sich bei den finalen Vor-Ort-Prüfungen mit dem Hersteller und dem Handwerk weitere unvorgesehene Herausforderungen auf, die in einigen Fällen zum Ausschluss von Objekten führten. Infolgedessen mussten im weiteren Verlauf nachträglich weitere potenzielle Gebäude identifiziert werden, weshalb es kurz nach dem Start der finalen Vor-Ort-Prüfungen zu einer leichten Zunahme der Vor-Ort-Begehungen gekommen ist. Der Verlauf spiegelt sich – jedoch in gedämpfter Form – entsprechend in der Projektphase der finalen Vor-Ort Prüfungen sowie der Vertragsunterzeichnung wieder.

Der zeitliche Verlauf der kumulierten IBN der Geräte als Äquivalent zur Installation der Systeme zeigt die unterschiedlichen Phasen und Hemnisse innerhalb der technischen Realisierung auf. Durch die Weihnachtszeit 2014 und den Jahreswechsel sowie durch niedrige Temperaturen zu Beginn des Jahres 2015 kann die Verschiebung der Differenzzeit zwischen Vertragsunterzeichnung und Inbetriebnahme begründet werden. Vor allem bei niedrigen Außentemperaturen war die Möglichkeit zur Installation eingeschränkt, da eine stetige Wärmeversorgung

sicherzustellen war. Durch mobile Heizsysteme, die temporär in das Heizungsnetz des Mitmachers integriert wurden, konnten jedoch auch in Zeiträumen mit niedrigen Temperaturen Installation vorgenommen werden. Die entsprechende Reduktion der Differenzzeit über die Sommermonate ist aus dem Vergleich des Verlaufs der Vertragsunterzeichnung und der Inbetriebnahme des Systems ersichtlich.

Bedingt durch Lieferengpässe bei der europaweit ausgeschriebenen Messtechnik waren Verzögerungen bei der Installation der Messtechnik unvermeidlich. Durch temporäre Überbrückungen der additiven Messstellen konnten jedoch die allgemeinen Installationsarbeiten bereits vor finaler Installation der Messtechnik abgeschlossen werden, sodass ein reibungsloser Betriebsübergang bei den Mitmachern sichergestellt werden konnte. Die zunächst zeitlich stark verzögerte Inbetriebnahme der Messtechnik konnte im Projektverlauf bis auf wenige Tage verkürzt werden. Sowohl bei der Installation und Inbetriebnahme der Systeme als auch der Messtechnik liegen starke Schwankungen vor, die durch begrenzte Kapazitäten sowie verfügbare Installationszeiträume der Handwerksbetriebe begründet sind. Daher war eine zeitgleiche Inbetriebnahme der Systeme und der Messtechnik nur in wenigen Fällen möglich.

Bei der Inbetriebnahme der Messtechnik konnte die Funktionsfähigkeit der Messgeräte sowie die Datenübertragung sichergestellt werden, eine Plausibilitätsprüfung der übertragenen Daten war allerdings zu diesem Zeitpunkt nicht bei allen Messstellen möglich. Dies ist unter anderem darin begründet, dass im Frühjahr zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme in einigen Fällen die Heizung schon außer Betrieb war und somit der Wärmemengenzähler im Heizkreis keine Daten erfassen bzw. liefern konnte. Nicht ordnungsgemäß integrierte Wärmemengenzähler konnten teilweise erst mit der Überprüfung der eingehenden Messdaten durch Prüfung der Plausibilität identifiziert werden.

In Abbildung 26 sind die Differenzzeiträume zwischen den jeweiligen Projektabschnitten sowie die Standardabweichung dargestellt. Ferner sind minimale sowie maximale Differenzzeiträume für die angegebenen Projektphasen aufgetragen. Der Zeitraum ab Vertragsunterschrift bis zur plausiblen Messtechnikübertragung beträgt durchschnittlich rund 350 Tage. Die Streuung liegt mit 100 Tagen für den kürzesten und 550 Tagen für den längsten Zeitraum in einem Bereich, der die objektspezifischen Herausforderungen widerspiegelt.

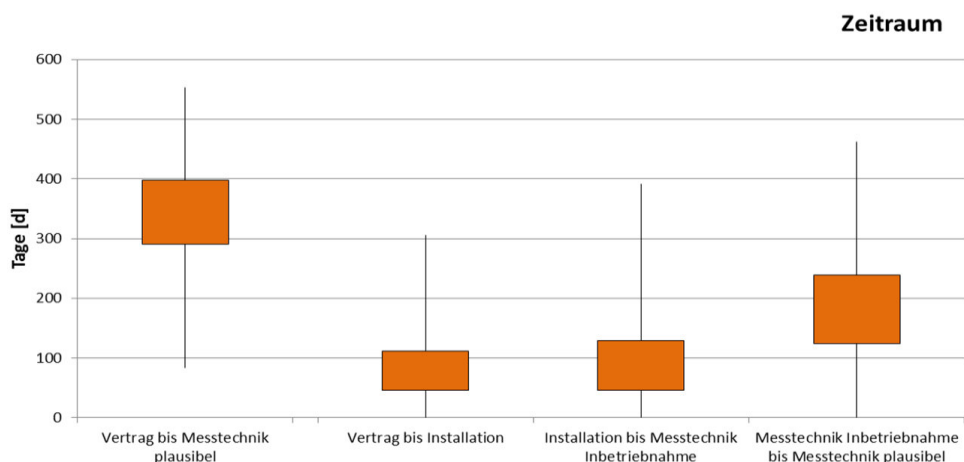


Abbildung 26: Auswertung der Projektfortschrittsanalyse

2.5.3 Visueller Vorher-Nachher-Vergleich

Beispiel I



Abbildung 27: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel I

In dem nun heizungstechnisch modernisierten Reihenendhaus aus dem Jahr 1956 lebt eine Familie mit drei Personen. Zuvor wurde die 120-Quadratmeter-Wohnfläche des Objekts über eine 20 Jahre alte Gasheizung mit Wärme versorgt. Ersetzt wurde die Anlage durch einen Stirling-Motor. Die Installation der KWK-Anlage mitsamt integrierter Brennwertherme zur Spitzenlastabdeckung sowie einem großen Pufferspeicher für die Heizung und die Warmwasserbereitung erfolgte hier, wie auf Abbildung 27 ersichtlich, auf engstem Raum. Das Objekt war das erste, das im Rahmen des „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ Demonstrationsprojekts mit einer Anlage ausgerüstet wurde.

Beispiel II



Abbildung 28: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel II

Das Objekt aus dem Baujahr 1919 wurde durch den Einsatz eines Stirling-Motors modernisiert. Durch eine Umstellung von einer 24 Jahre alten Kohleheizung zu einem Stirling-Motor (siehe Abbildung 28) konnte der Nutzerkomfort enorm erhöht werden. Das KWK-System besteht aus einem Systempaket mit integriertem Zusatzheizgerät und einem Pufferspeicher für die Wärmeversorgung.

Beispiel III



Abbildung 29: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel III

Im dargestellten Einfamilienhaus wurde eine 25 Jahre alte Öl-Heizung durch einen Gas-Verbrennungsmotor mit einer elektrischen Leistung von 1 kW ersetzt. Die Anlage versorgt das Gebäude aus dem Jahr 1981 mit rund 133 m² Wohnfläche. Bei diesem System wurde ein Zusatzheizgerät und einem Pufferspeicher für die Heizung und die Warmwasserbereitung verbaut. Durch die Umstellung von Öl auf den Energieträger Erdgas kann nun, wie in Abbildung 29 dargestellt, die Aufstellfläche der zuvor installierten Öltanks genutzt werden.

Beispiel IV



Abbildung 30: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel IV

In dem Objekt aus dem Baujahr 1987 wurde eine 11 Jahre alte Öl-Heizung durch ein erdgasbasiertes System bestehend aus einer Brennstoffzelle mit einer elektrischen Leistung von 1,5 kW und einem Zusatzheizgerät sowie einem Pufferspeicher für die Heizung und die Warmwasserbereitung ersetzt. Die neue Heizungsanlage versorgt nun ein Doppelhaus mit sechs Personen sowie das angrenzende Gewerbe. Dabei umfassen die beheizbaren Wohn- und Gewerbefläche rund 400 m².

Beispiel V



Abbildung 31: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel V

Das sanierte Mehrfamilienhaus aus dem Baujahr 1964 wird von einer Brennwerttherme mit Wärme versorgt. Im Rahmen des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ wurde das bestehende Heizungssystem um eine Brennstoffzelle mit einer elektrischen Leistung von 1,5 kW ergänzt. Dabei wird die von der Brennstoffzelle bereitgestellte Wärme in den Warmwasserpufferspeicher des 8-Parteienhauses eingespeist.

Beispiel VI



Abbildung 32: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel VI

Das Heizungssystem der abgebildeten Tankstelle wurde im Rahmen des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ um ein Brennstoffzellen-KWK-System erweitert. Die Brennstoffzelle stellt nun eine kontinuierliche elektrische Leistung von bis zu 1,5 kW bereit. Der Strombezug aus dem öffentlichen Netz konnte durch die Nutzung des eigen erzeugten KWK-Stroms erheblich verringert werden.

Beispiel VII



Abbildung 33: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel VII

Die 23 Jahre alte Kohleheizung des im Jahr 1923 erbauten Einfamilienhauses wurde im Rahmen des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ durch einen Gas-Stirlingmotor mit einer elektrischen Leistung von 1 kW ersetzt. Die Anlage versorgt nun einen 5-Personen-Haushalt mit einer Wohnfläche von 180 m² mit Heizwärme und Warmwasser. Das KWK-System beinhaltet neben dem Stirlingmotor ein Zusatzheizgerät und einen Pufferspeicher für die Heizung und Warmwasserbereitung. Durch die Umstellung von Kohle auf den Energieträger Erdgas konnte der Nutzerkomfort enorm gesteigert werden.

Beispiel VIII



Abbildung 34: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel VIII

In dem abgebildeten Tennisvereinsheim wurde das bestehende Heizungssystem um eine Brennstoffzelle ergänzt. Der produzierte KWK-Strom wird im Gastronomiebereich des Vereinsheims sowie für die Fluchtlichtanlagen der Platzbeleuchtung verwendet. Die anfallende Wärme der Brennstoffzelle wird in die Warmwasserversorgung des Objekts eingespeist. Auch hier konnte der Strombezug aus dem öffentlichen Netz durch die Nutzung des eigen erzeugten KWK-Stroms deutlich verringert werden.

3 Ergebnisse und Auswertung

Im Rahmen der Auswertung wurde das Betriebsverhalten in ausgewählten Referenzgebäuden deskriptiv untersucht. Diverse Zeiträumen wurden analysiert, um Charakteristika unterschiedlicher Jahres- und Tageszeiten detailliert zu beschreiben. Ergänzend wurde eine kumulierte Gesamtauswertung aller untersuchten Anlagen durchgeführt.

Zur Bewertung der KWK-Systeme wurde eine Methodik zur ökologischen und ökonomischen Bilanzierung entwickelt. Dabei wurden die KWK-Systeme der zuvor genutzten Energieversorgung gegenübergestellt. Für die konventionelle Stromversorgung wurde sowohl der Strommix auf Bundes- als auch auf Landesebene NRW bewertet. Erforderliche Messdaten zur Bilanzierung der KWK-Systeme sind der Brennstoffeinsatz für KWK-Modul und Zusatzheizgerät sowie die generierte Wärme und elektrische Energie. Die Bilanz der Anlagen basiert auf deren Jahresnutzungsgraden, welche mit einem theoretischen Ansatzes ermittelt wurden. Auf Basis der verfügbaren Daten konnten die CO₂-Emissionen für Strom- und Wärmebereitstellung im Projektzeitraum bezogen auf NRW um 40 % reduziert werden. Die Primärenergieeinsparung beträgt im Projektzeitraum 26 % bezüglich des Strommixes NRW.

Die wirtschaftliche Bewertung erfolgte in Anlehnung an die Richtlinie VDI 2067. Das Berechnungsverfahren, welches im Rahmen des Projekts angepasst wurde, basiert auf der Annuitätenmethode und stellt ein dynamisches Verfahren dar. Fazit der Analyse ist, dass alle auswertbaren KWK-Anlagen auf der Projektebene wirtschaftlich für den Betreiber sind. Dies gilt ebenfalls für die ermittelten CO₂-Einsparungskosten.

Des Weiteren wurde die Modellbildung und Simulation des energetischen Verhaltens der Gebäude inklusive KWK-Anlagen, Hydraulik und Warmwasserspeicher durchgeführt. Die entwickelten Mehrzonen- und Einzonenmodelle wurden anhand der Messdaten validiert und in einer Jahressimulation genutzt. Das thermische Verhalten der abgebildeten Gebäude entspricht sehr gut der Theorie. Sowohl die kumulierten bilanziellen Ergebnisse als auch regelungstechnische Ereignisse weisen eine gute Übereinstimmung auf. Für die thermische Gebäudehülle und das Versorgungssystem war die Validierung erfolgreich.

In den erweiterten Analysen wurde der Netzeinfluss der KWK-Anlagen auf bilanzieller und elektrotechnisch spezifizierter Ebene untersucht. Ergänzend wurden Optionen zur Integration von E-Mobility und Home-Automation-Systemen beschrieben und bewertet. Hinsichtlich der Optimierung des KWK-Betriebs zeigt der Einsatz von Stromspeichern hohe Potenziale auf. Deren Konkretisierung und Bewertung erfordert aufgrund der Komplexität jedoch weiterführende messtechnische Prüfstands- und Demonstrationsuntersuchung.

3.1 Auswertung der Objektverteilung

3.1.1 Statistische Auswertung der 100 Objekte

Für das Projekt war es maßgebend eine Gebäudeauswahl zu treffen, die es ermöglicht allgemeine Aussagen über die Eignung bestimmter Gebäudetypen zu treffen. Die Übertragbarkeit von abgeleiteten Erkenntnissen auf vergleichbare Strukturen stellte somit eine Zielgröße dar. Dementsprechend wurden repräsentative Gebäude mit unterschiedlichen Wärme- und Dämmstandards ausgewählt. In folgendem Kapitel wird die Objektauswahl auf Basis von statistischen Auswertungen vorwiegend deskriptiv untersucht.

In Abbildung 35 ist die Verteilung der Baujahre der im Projekt mit KWK-Systemen ausgerüsteten Gebäude dargestellt. Die in Jahrzehnte aufgeteilten Baujahre erstrecken sich über einen Zeitraum von 1900 bis 2010.

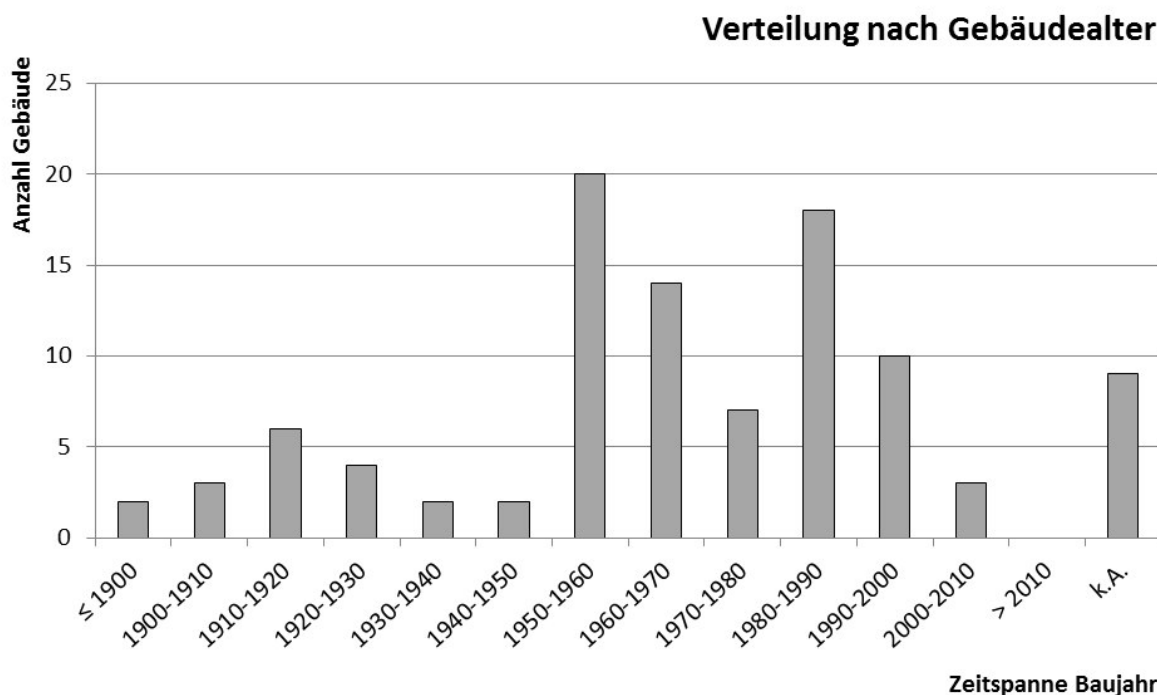


Abbildung 35: Verteilung der Objekte nach Gebäudealter im Projekt

Über 50 % der Gebäude innerhalb des Projekts wurden im Zeitraum von 1950 bis 2000 erbaut. Betrachtet man die Verteilung der Gebäude im Projekt – wie auch in nachfolgendem Kapitel 3.1.2 beschrieben – liegt die maximale Objekthäufigkeit im Zeitraums zwischen 1950 und 1960 vor. Die erhöhte Häufigkeit im Projekt kann auf zwei konsekutive Faktoren zurückgeführt werden. Auf der einen Seite beschreibt der Zeitraum jene Zeit, in der ein hohes Bevölkerungswachstum zu einem schlagartigen Bedarf nach günstigen Wohnraum für Familien führte, wodurch diese stark repräsentiert sind. Durch die vorwiegend geringfügig eingebrachte Wärmedämmung der Gebäude dieser Baujahre, zeichnen sich diese durch einen vergleichsweise hohen spezifischen Wärmebedarf aus. Dieser führt zum zweiten, projektabhängigen Faktor, der eine Zuordnung nur in jene Objekt ermöglicht, in denen das KWK-System

eine sinnvolle Betriebszeit erhält. Je höher der Objektwärmebedarf ist, desto höher ist die Zuordnungswahrscheinlichkeit eines Systems im Rahmen dieses Projekts.

In Abbildung 36 ist die Verteilung der Gebäudetypen innerhalb des Projekts dargestellt. Die Differenzierung der Gebäudetypen erfolgt innerhalb der Kategorien: Einfamilienhaus, Doppel-/Reihenendhaus, Mehrfamilienhaus, Reihenmittelhaus, GHD sowie kombinierten Objektentypen aus GHD und Wohnen.

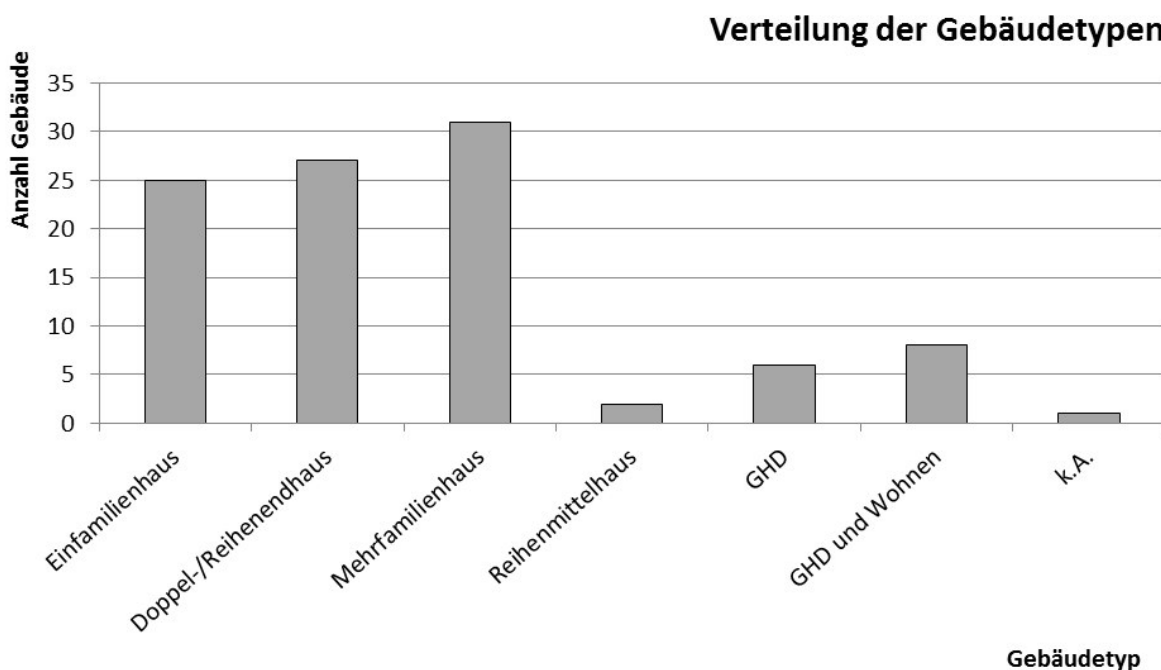


Abbildung 36: Verteilung der Gebäudetypen im Projekt

Im Projekt sind über 50 % der Gebäude Einfamilien-, Doppel- oder Reihenendhäuser sowie 32 % Mehrfamilienhäuser, die im Bereich „Wohnen“ zu verorten sind. 17 % der Gebäude stammen aus dem GHD-Sektor, wovon 5 % der Gebäude jedoch eine Kombination aus GHD und Wohnen darstellen. Die Verteilung ist zum Teil darin begründet, dass rund drei Viertel der Anlagen aus dem Projektanlagenportfolio für den Einsatz in Gebäuden mit einem durchschnittlichen Wärmebedarf von Ein- oder Zweifamilienhäusern konzipiert sind und die Gebäude nach der Eignung der zu Verfügung stehenden KWK-Systeme ausgewählt wurden.

Zur Sicherstellung von aussagekräftigen Eignungsvergleichen wurden beispielsweise im Bereich der Einfamilienhäuser zwei, hinsichtlich der Gebäudestruktur und Bewohneranzahl identische Objekte aus einer Häuserreihe ausgewählt. Dabei wurde dem Reihenmittelhaus aufgrund des geringeren Wärmebedarfs im Vergleich zum Reihenendhaus ein Ottomotorisches KWK-System und dem Reihenendhaus ein Stirling-Motor mit einer höheren thermischen Nennleistung zugeordnet. Im Rahmen des Projekts wurden im Bereich der Mehrfamilienhäuser baugleiche Objekte hinsichtlich Wohnfläche, Objektzustand und Standort mit identischen KWK-Systemen ausgestattet. Diese Gebäude eignen sich somit sehr gut für die Darstellung und Bewertung der Einflüsse der Bewohnerstruktur. Bei der Gebäudezuordnung ist der Sanierungsstatus von besonderem Interesse, da dieser erhebliche Auswirkungen auf

den Wärmebedarf eines Objekts hat. Beispielsweise wurde ein kleines Otto-motorisches KWK-System in ein saniertes Mehrfamilienhaus installiert, dessen Wärmebedarf dem eines nicht gedämmten älteren Einfamilienhauses entsprach. Durch diese zielgerichteten Zuordnungsvariation wurden im Rahmen des Projekts Objekte mit unterschiedlichen Eigenschaften unter vergleichbaren sowie variieren Rahmenbedingungen in den Bewertungsprozess eingebracht.

Unter den 32 % der Mehrfamilienhäuser sind unterschiedliche Objektgrößen enthalten, die von zwei bis drei im Bereich der kleinen MFH bis hin zu vier bis neun Wohnparteien in größeren MFH reichen. Je nach Wärmebedarf des Objekts wurden Stirling-motorische KWK-Systeme auch in unterschiedlich große Mehrfamilienhäuser installiert. Im Rahmen des Projekts wurden die größeren Otto-motorischen KWK-Systeme in MFH mit acht bis neun Mietparteien sowie zum Teil in Gebäuden mit einer Kombination aus Wohnen und GHD eingesetzt.

Für die Zuordnung der Brennstoffzellen-Systeme stand der Strombedarf des Objekts, zu der im Vergleich eher geringen thermischen Leistung der Brennstoffzelle im Vordergrund. Von Bedeutung ist neben der Einbindung der anfallenden Wärme der möglichst zu einem hohen Anteil genutzte selbst erzeugte KWK-Strom. Die betreffenden Gebäude sollten infolgedessen über eine systemspezifische kontinuierliche Grundlast verfügen. Die Brennstoffzellen - Systeme wurden daher vorwiegend im GHD-Sektor, unter anderem in einem Hotel, in einer Tankstelle und in einem Autohaus installiert.

Unter Fokussierung auf den Wohngebäudebereich, werden nachfolgend Bewertungsgrößen für eine weiterführende Klassifizierung der Objekte und Endnutzer zur statischen Evaluierung der Objektauswahl dargestellt. Als Einflussgrößen werden die Anzahl an Bewohnern, die Wohnfläche, der spezifische Wärmebedarf sowie Strombedarf nähergehend betrachtet. Durch die Fokussierung auf den Wohngebäudebereich wurden die reinen GHD Objekte in den folgenden Auswertungen der Kategorie „k.A.“ zugeordnet. Insofern eine Trennung der Angaben in den Objekten mit einer gemischten Funktion aus Wohnen und GHD möglich war, wurden diese hinsichtlich der Funktion Wohnen ausgewertet. Anderenfalls wurden diese auch unter der Kategorie „k.A.“ eingruppiert.

Die Verteilung der Objekte ist in Abhängigkeit von der Bewohneranzahl in Abbildung 37 für die gesamte Anzahl von 100 Objekten im Projekt aufgetragen.

Rund die Hälfte der Gebäude im Projekt werden von 2 bis 4 Personen bewohnt. Der Anteil an 5 bis 6 Personen pro Gebäude liegt mit 21 % bei rund einem Viertel der Verteilung, wobei sich diese Kategorie häufig durch Großfamilien mit mehreren Generationen darstellt. In Summe konnte die Verteilung der Bewohneranzahl jedoch nicht in allen Wohngebäuden korrekt erfasst werden, da die Angaben zur Bewohneranzahl in einigen Mehrfamilienhäusern nicht verfügbar waren. Die aufgezeigte Verteilung der Objektbelegung unterstreicht die Variabilität der Objektbasis, sodass Analysen und Auswertungen auf einer breiten Grundlage für mögliche Transformations- und Übertragungsprozesse beruhen.

Verteilung Anzahl Bewohner

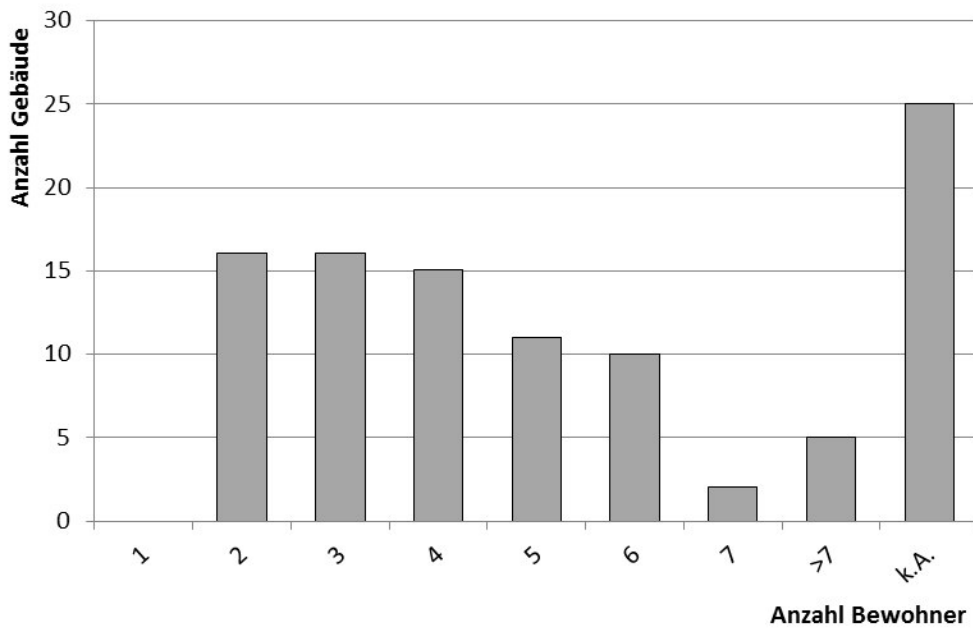


Abbildung 37: Verteilung der Anzahl an Bewohner je Objekt

In der Abbildung 38 ist die Wohnflächenverteilung der Gebäude innerhalb des Projekts dargestellt. Die Differenzierung der Wohnflächenverteilung erfolgt in 50 m²-Schritten und erstreckt sich über einen Wohnflächenbereich von < 100 m² bis > 300 m².

Verteilung Wohnfläche

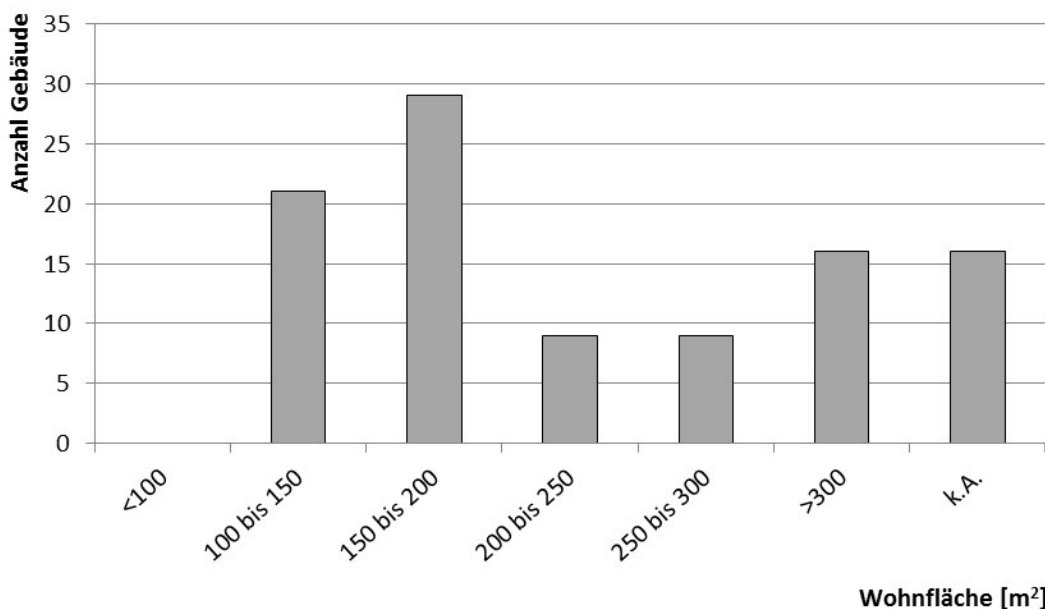


Abbildung 38: Wohnflächenverteilung der Gebäude im Projekt

Rund ein Drittel der Gebäude im Projekt verfügt über eine Wohnfläche von 150 bis 200 m². Darunter sind vermehrt kleinere Mehrfamilienhäuser, jedoch auch größere Einfamilienhäuser. Es folgen mit einem Anteil von 21 % Gebäude mit einer Wohnfläche von 100 bis 150 m².

Objekte mit einer Wohnfläche von mehr als 300 m² besitzen einen Anteil von 16 %. Dabei sind die Objekte mit 100 bis 150 m² überwiegend Einfamilienhäuser und über 300 m² weitestgehend Mehrfamilienhäuser. Der Anteil von Gebäuden mit einer Wohnfläche zwischen 200 und 300 m² beträgt im Projektrahmen 18 %.

Die sehr heterogene Verteilung der spezifischen Wohnflächen ist in der Vielzahl an unterschiedlichen Gebäudetypen sowie Bewohnerstrukturen begründet. Im Schnitt liegt der personenpezipische Wohnbedarf bei größeren Haushalten unterhalb jener spezifischen Fläche bei kleineren Wohnungen.

Die Ermittlung des Jahreswärmebedarfs erfolgt auf Basis der zuvor beschriebenen Wohnfläche in Kombination mit dem wohnflächenspezifischen Jahreswärmebedarf. Hierzu ist in Abbildung 39 die Häufigkeitsverteilung des Wärmebedarfs im Bereich von ≤ 75 kWh/(m²·a) bis > 225 kWh/(m²·a) mit einem äquidistanten Intervallabstand von 25 kWh aufgetragen.

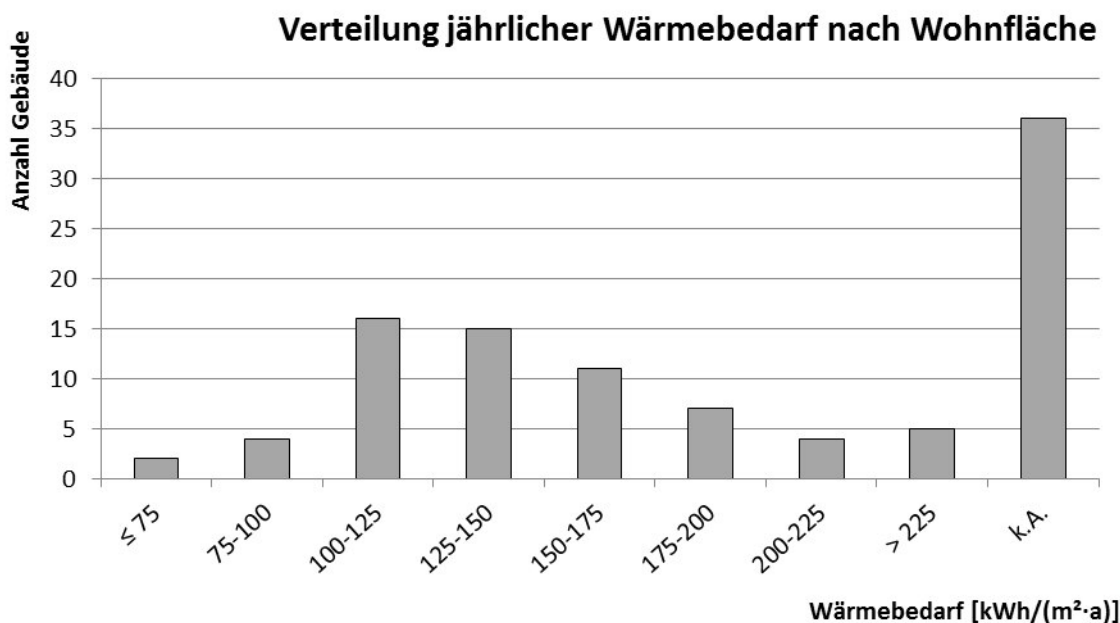


Abbildung 39: Durchschnittlicher Wärmebedarf pro Quadratmeter der Projektgebäude

Im Rahmen des Projekts liegt der Wärmebedarf bei 42 % der Gebäude zwischen 100 und 175 kWh/(m²·a). Innerhalb dieses Bereichs beläuft sich der Wärmebedarf bei 16 % auf 100 bis 125 kWh/(m²·a), bei 15 % auf 125 bis 150 kWh/(m²·a) und bei 11 % auf 150 bis 175 kWh/(m²·a). Bei den verbleibenden Gebäuden weisen 6 % einen Wärmebedarf ≤ 100 kWh/(m²·a) und 16 % > 175 kWh/(m²·a) auf. In Summe konnte der spezifische Wärmebedarf bei über einem Drittel der Objekte nicht korrekt erfasst werden, da eine Wohnflächendefinition bei GHD-Objekten sowie bei einigen MFH-Objekten nicht möglich war. Eine tiefergehende Auswertung der Objektverteilung erfolgt in Kapitel 3.1.2.

Neben den Wärmebedarfen stellen die Strombedarfe eine zentrale Kenngröße für die Einsatzbewertung von KWK-Systemen dar. Der mittlere personenspezifische Strombedarf der betrachteten Objekte ist in Abbildung 40 hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung in einem auswertbaren Bereich von ≤ 500 bis > 5.000 kWh/(Pers·a) dargestellt. Es wird ein äquidistanter Abstand der Häufigkeitsgruppen von 500 kWh gewählt.

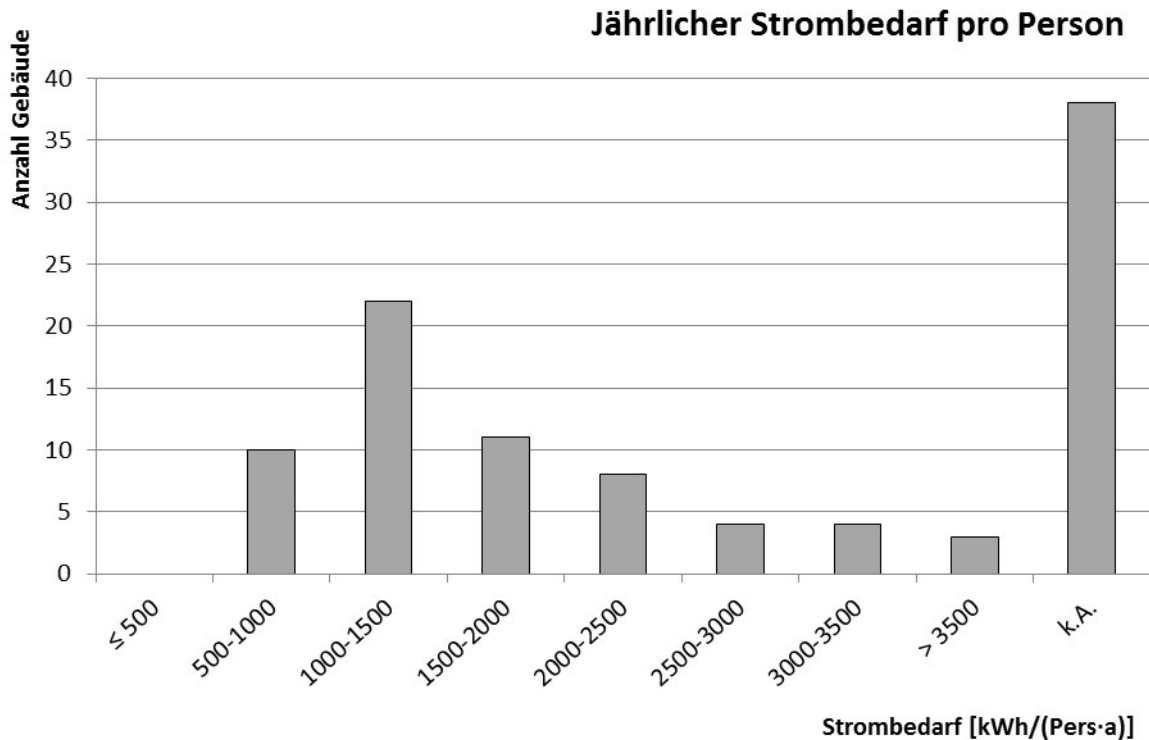


Abbildung 40: Verteilung des jährlichen Strombedarfs pro Person und Haushalt

Eine Datenerhebung der EnergieAgentur.NRW [11] zeigt hinsichtlich der personenspezifischen jährlichen Stromverbräuche in Privathaushalten⁶ einen Strombedarf zwischen 1.800 kWh/(Pers·a) für 1-Personen-Haushalte und 970 kWh/(Pers·a) für 6-Personen-Haushalte auf. Der spezifische Jahresstrombedarf nimmt demnach stetig mit steigender Anzahl an Bewohnern ab. Innerhalb des Projekts sind keine 1-Personen-Haushalte vertreten, jedoch liegt der jährliche personenspezifische Strombedarf in mehreren Objekten deutlich über den ermittelten Angaben der Studie. Der Anteil von Objekten mit einem Strombedarf > 2.000 kWh/(Pers·a) liegt bei 19 %. Bei 11 % ergibt sich ein Strombedarf von 1.500 bis 2.000 kWh/(Pers·a), bei 22 % von 1.000 bis 1.500 kWh/(Pers·a) und bei 10 % von 500 bis 1.000 kWh/(Pers·a).

⁶ Da im Rahmen des Projekts vor der Heizungsmodernisierung in nur zwei Objekten eine dezentrale Warmwasserbereitung erfolgte, wurden die Angaben zum Stromverbrauch ohne elektrische Warmwasserbereitung zum Vergleich herangezogen.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt im Projekt ist die Bewertung der CO₂-Einsparungen. Diese besteht zum einen in der Bewertung der eingesetzten KWK-Systeme und der Substitution ineffizienter Altanlagen. Zum anderen kamen in den Altanlagen verschiedene Energieträgerformen als Brennstoff zum Einsatz. Voraussetzung zur Teilnahme am Projekt war die Bereitschaft auf den Energieträger Erdgas umzustellen. Die Verteilung der Energieträger zur Wärmebereitstellung der Altsysteme ist in Abbildung 41 dargestellt.

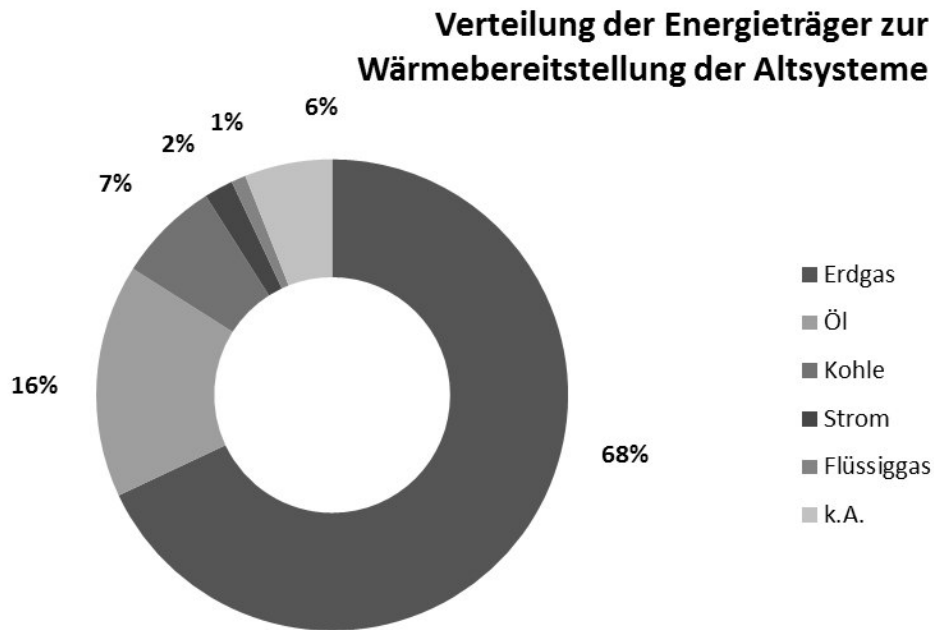


Abbildung 41: Verteilung der Energieträger zur Wärmebereitstellung der Altsysteme

Unter den im Projekt teilnehmenden Gebäuden bezogen bereits 68 % Erdgas als Energieträger zur Wärmebereitstellung. Eine zuvor mit Flüssiggas betriebene Heizungsanlage wurde durch eine KWK-Anlage ersetzt, die ebenfalls mit Flüssiggas betrieben werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Betrieb mit Flüssiggas herstellerabhängig ist und zuvor in Erfahrung gebracht werden muss. Nicht alle Mikro-KWK-Anlagen in diesem Leistungsklassenbereich verfügen über eine Zulassung für den Betrieb mit Flüssiggas.

Insgesamt 25 % der Teilnehmer verwendeten andere Energieträger zur Wärmebereitstellung, darunter nutzten 16 % Öl und 7 % Kohle als Energieträger. Die Umrüstung dieser Heizungs-systeme gestaltete sich in den meisten Fällen aufwendiger, als die Umrüstung schon erdgas-basierter Systeme, da zunächst ein Gasanschluss gelegt werden musste. Die entstandenen Zu-satzkosten hierfür mussten die Betreiber selbst tragen. Ein weiterer wesentlicher Aspekt bestand im etwaigen Rückbau von Öl- oder Kohlespeicherstätten, die sich teilweise als sehr aufwändig herausstellten. Jedoch entstand dem Kunden hierdurch alternativ nutzbarer Keller-raum. Zudem konnte der Nutzerkomfort durch die Umrüstung auf ein erdgasbasiertes System, gerade im Bereich der Objekte die zuvor Kohle als Energieträger verwendeten, enorm gesteigert werden.

Bei zwei weiteren Objekten erfolgte eine komplette Umrüstung des Wärmesystems von einer dezentralen Warmwasserbereitstellung über Strom hin zur einer zentralen Warmwasser- und Heizungsversorgung. Der Installationsaufwand lag hierbei aufgrund des neu zu verlegenden Wärmeverteilungssystem für Warmwasser am höchsten. Im Rahmen des Projekts konnten letztendlich durch den alleinigen Energieträgerwechsel bei 25 Objekten zusätzliche CO₂-Einsparungen erzielt werden.

Zusammenfassend wird anhand der deskriptiven Untersuchungen der statistischen Auswertung verdeutlicht, dass repräsentative Gebäude mit unterschiedlichen Wärme- und Dämmstandard sowie Bewohner- und Nutzerstrukturen ausgewählt wurden. Die beschriebenen statistischen Auswertungen zeigen eine hohe Variabilität der Objektbasis auf, sodass Analysen und Auswertungen auf einer breiten Grundlage für mögliche Transformations- und Übertragungsprozesse durchgeführt werden können.

3.1.2 Übertragung und Vergleich von Dämmstandards

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit und die Möglichkeit die Ergebnisse des Projekts auf andere Gebiete übertragen zu können, müssen die im Projekt ausgerüsteten Gebäude einem allgemeinen Schlüssel zugeordnet werden. Grundlage für die vorgenommene Einordnung ist die vom Institut Wohnen und Umwelt entwickelte Typologie des deutschen Wohngebäudebestandes [12]. Wie in Tabelle 8 zu erkennen ist, wird der Gebäudebestand in zehn Altersklassen und vier Gebäudekategorien eingeteilt. Die Gebäudekategorien sind in absteigender Reihenfolge: Einfamilienhaus, Reihenhaus, Mehrfamilienhaus und großes Mehrfamilienhaus. Aus der Kombination der Altersklasse und der Gebäudekategorie ergibt sich der jeweilige Schlüssel für das zu betrachtende Gebäude.

Tabelle 8: Baualtersklasse und Gebäudetyp nach IWU (Institut Wohnen und Umwelt) mit resultierendem Gebäudeschlüssel [12]

	Baualtersklassen									
	bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
EFH	EFH_A	EFH_B	EFH_C	EFH_D	EFH_E	EFH_F	EFH_G	EFH_H	EFH_I	EFH_J
RH	RH_A	RH_B	RH_C	RH_D	RH_E	RH_F	RH_G	RH_H	RH_I	RH_J
MFH	MFH_A	MFH_B	MFH_C	MFH_D	MFH_E	MFH_F	MFH_G	MFH_H	MFH_I	MFH_J
GMH	GMH_A	GMH_B	GMH_C	GMH_D	GMH_E	GMH_F	GMH_G	GMH_H	GMH_I	GMH_J

Mittels dieses Schlüssels ist es möglich weitere Daten aus der IWU-Typologisierung abzugleichen. Hierbei sind im Besonderen der gemittelte Wärmebedarf pro Quadratmeter und die materialspezifischen Daten zur Wärmedurchgangsberechnung zu nennen.

Im Folgenden soll die generelle Zusammensetzung des Baubestandes in Deutschland, im InnovationCity-Gebiet und im Kontingent des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ gegenübergestellt werden. Diese vereinfachte Darstellung ermöglicht es bereits die generellen Unterschiede zwischen den betrachteten Mengen herauszustellen.

Wie in Tabelle 9 anhand der integrierten Farbskala zu erkennen ist, liegt das Maximum für die gesamtdeutsche Verteilung bei Einfamilienhäusern und einem Baujahr zwischen 1958 und 1978.

Tabelle 9: Prozentuale Baualtersklassenverteilung in Deutschland [12]

	Baualtersklassen									
	bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009
EFH	1,8	5,3	6,2	4,7	8,3	8,3	3,9	6,4	5,7	4,2
RH	0,8	2,7	3,9	2,5	3,5	3,3	1,8	3,6	3,4	2,1
MFH	0,3	2,4	2,1	2,0	3,2	2,3	0,8	1,7	1,3	0,5
GMH	0,0	0,2	0,0	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,1	0,0

Im Gegensatz dazu hat die Verteilung im InnovationCity-Gebiet, nicht unüblich für das Ruhrgebiet, ihre Maxima bei Mehrfamilienhäusern erbaut vor 1918 und Reihenhäusern erbaut in der Nachkriegszeit zwischen 1949 und 1968.

Tabelle 10: Prozentuale Baualtersklassenverteilung im InnovationCity-Gebiet in Bottrop

	Baualtersklassen									
	bis 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	nach 2001	
EFH	7,3	2,1	3,0	1,7	0,6	0,4	1,0	0,5	0,7	
RH	8,5	6,4	10,1	8,3	2,7	1,5	3,9	2,1	1,4	
MFH	12,7	5,2	6,4	1,1	1,1	0,9	4,7	2,9	2,7	
GMH	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Ähnlich der Verteilung im InnovationCity-Gebiet hat die Verteilung der 100 Objekte im Projekt ihr absolutes Maximum bei Reihenhäusern von 1958 bis 1968. Zum einen liegt dies an der Tatsache, dass hauptsächlich Objekte ausgewählt wurden, welche aufgrund der zur Verfügung stehenden KWK-Systeme geeignet waren. Zum anderen kann die Verteilung als direkte Auswirkung der hohen Geburtenrate in den 1950er bis 1960er Jahre angenommen werden. Speziell die im Ruhrgebiet übliche Bauweise von Reihenhäusern dieser Zeit spiegelt den schlagartigen Bedarf von günstigem Wohnraum für Familien wieder. Dies ist auch der Grund für die generell schlechteren Wärmedämmungseigenschaften der Gebäude dieser Periode.

Tabelle 11: Prozentuale Baualtersklassenverteilung im Kontingent „100 KWK-Anlagen in Bottrop“

	Baualtersklassen									
	bis 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	nach 2001	
EFH	3,7	2,4	2,4	3,7	3,7	4,9	6,1	2,4	0,0	
RH	1,2	3,7	4,9	18,3	1,2	2,4	13,4	1,2	1,2	
MFH	3,7	2,4	4,9	6,1	1,2	2,4	0,0	0,0	2,4	
GMH	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Es ist somit abschließend festzustellen, dass die Verteilung im Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ von der bundesdeutschen Verteilung abweicht. Eine 1:1-Übertragung der Resultate ist somit nicht direkt möglich, sondern muss auf Grundlage der oben dargestellten Verteilungen umgerechnet werden. Um Ergebnisse auf andere Regionen, Städte oder Stadtteile übertragen zu können, müssen die Ergebnisse entsprechend der Verteilungsschlüssel neu zusammengestellt werden. Dies kann zum einen dadurch geschehen, dass aus der Gesamtheit der Ergebnisse des Projekts nach einem gewünschten Schlüssel entsprechende Objekte herausgesucht und zusammenfasst werden. Die zweite Möglichkeit besteht darin die Gesamtheit des betrachteten Gebiets ins Verhältnis zum gewünschten Betrachtungsraum zu setzen.

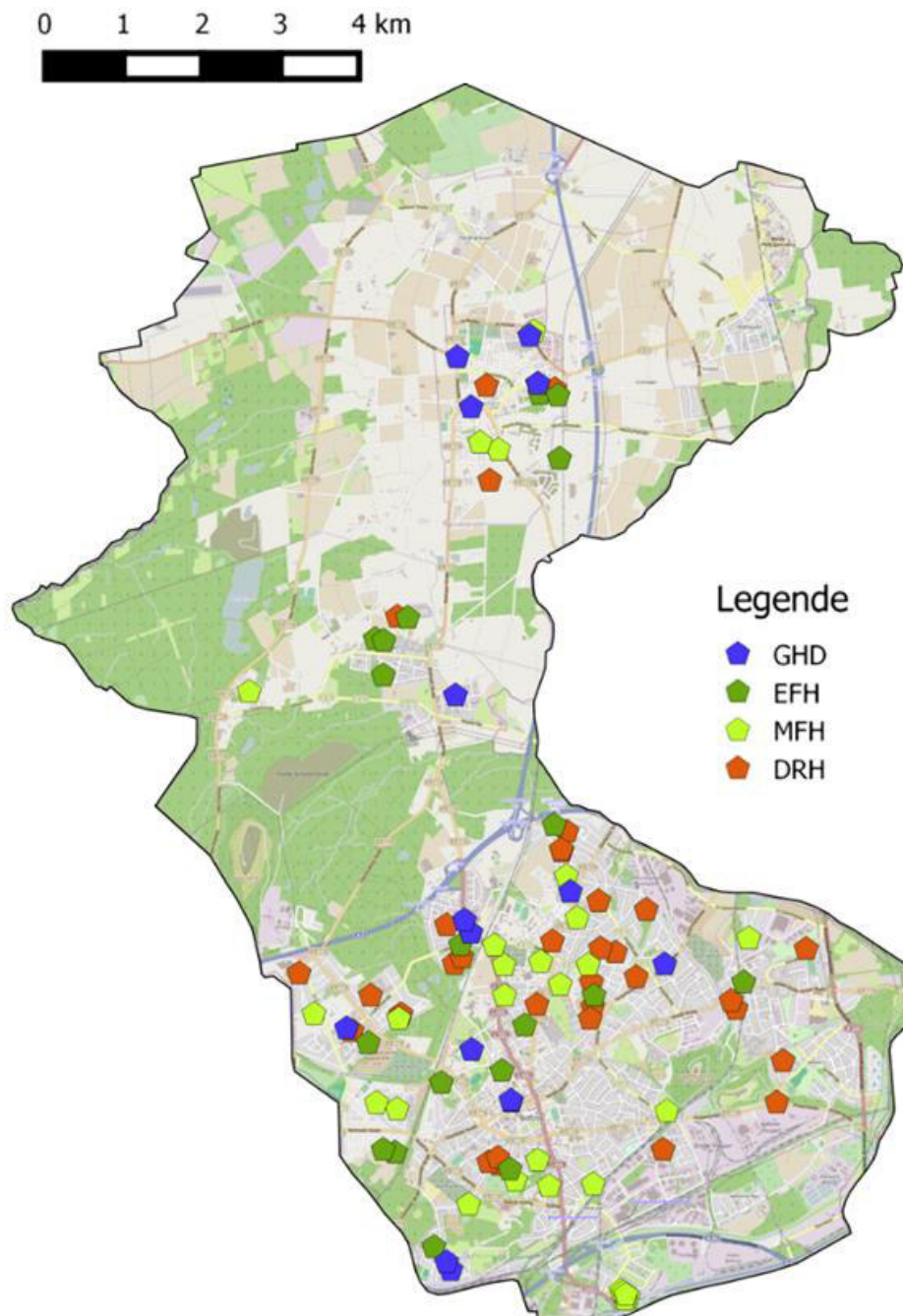


Abbildung 42: Räumliche Verteilung der 100 Gebäude und Zuordnung zu den Gebäudeklassen

3.1.3 Auswahl von 10 Referenzgebäuden

Im Rahmen des Projekts wurden 10 Referenzobjekte ausgewählt. Diese Gebäude sollten im Detail untersucht werden, um einen tieferen Einblick in die Interaktion zwischen Gebäude, Technologie und Bewohner zu erhalten und gleichzeitig einen Ergebnistransfer und die Validierung der entwickelten Simulationsmodelle zu ermöglichen. Um dies zu erreichen, erhielten die ausgewählten Gebäude zusätzliche Mess- und Regelungstechnik. Eine Beschränkung auf 10 Gebäude wurde bereits im Antrag aus zeitlichen und monetären Gründen vorgenommen.

Die Auswahl der Gebäude erfolgte dabei im Hinblick auf die Austauschbarkeit der Ergebnisse mit dem InnovationCity-Gebiet. Wie im vorangegangenen Kapitel erklärt, gibt es Unterschiede in der Gebäudetypologie des InnovationCity-Gebietes und der im Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ ausgewählten Objekte. Zum einen beruht dies auf der Tatsache, dass im Projekt Objekte aus ganz Bottrop einbezogen wurden. Zum anderen führte der Objektauswahlprozess zu einer tendenziellen Verschiebung in der Verteilung. Abbildung 43 stellt das InnovationCity_Gebiet und die darüber hinausgehende Verteilung der 100 KWK-Anlagen in Bottrop da.

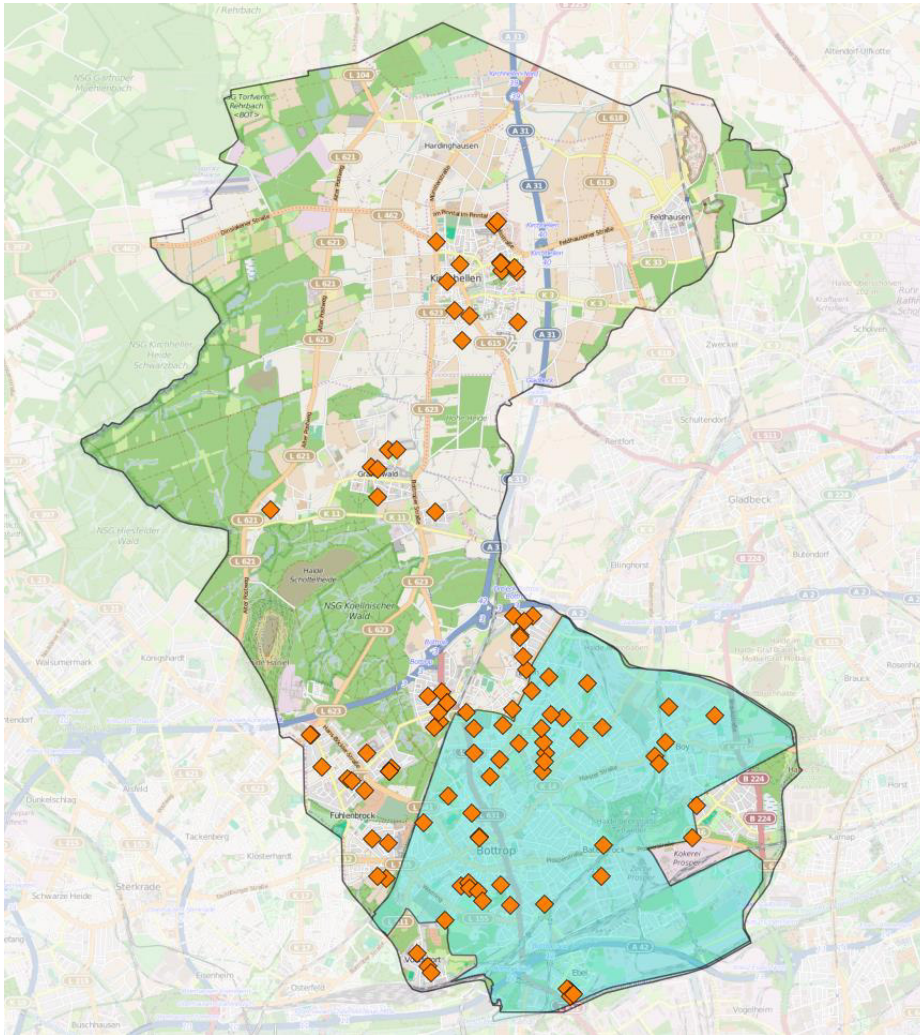


Abbildung 43: Bottrop (InnovationCity-Gebiet und Projektgebiet „100 KWK-Anlagen in Bottrop“)

Im Folgenden soll der Auswahlprozess anhand der angesprochenen Verteilungen dargestellt werden. In den ersten Schritten wurde mittels der InnovationCity und der 100 Objekte im Projektgebiet jeweils eine vereinfachte Typologie erstellt. Diese Reduktion wurde durchgeführt, da die Verteilung auf nur 10 Objekte übertragen werden sollte.

Anhand der Daten aus dem Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ und der von der Stadt Bottrop und der ICM bereitgestellten Informationen, wurde jeweils eine prozentuale Gebäudetypologie erstellt (siehe Tabelle 12 und Tabelle 13).

Tabelle 12: Vereinfachte prozentuale Baualtersklassenverteilung im InnovationCity-Gebiet

	Baualtersklassen				
	<1949	1949-1968	1969-1983	1984-2001	>2002
EFH	9,4	4,8	1,0	1,5	0,7
RH	14,9	18,4	4,2	6,0	1,4
MFH	17,9	7,5	2,0	7,6	2,7
GMH	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Tabelle 13: Vereinfachte prozentuale Verteilung im Projektgebiet „100 KWK-Anlagen in Bottrop“

	Baualtersklassen				
	<1949	1949-1968	1969-1983	1984-2001	>2002
EFH	8,6	7,9	6,4	5,7	0,7
RH	6,4	14,3	3,6	21,4	0,7
MFH	4,3	12,1	2,1	5,0	0,7
GMH	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Diese Typologien wurden verglichen und jeweils anhand der prozentualen Verteilungen auf 10 Gebäude übertragen. Die sich ergebenden Verteilungen auf die 10 Referenzobjekte sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt. Wie bereits beschrieben sind die Verteilungen nicht identisch, weshalb eine Anpassung der Auswahl vorgenommen werden musste.

Tabelle 14: Verteilung InnovationCity auf 10 Referenzgebäude übertragen

	Baualtersklassen				
	<1949	1949-1968	1969-1983	1984-2001	>2002
EFH	1	0	0	0	0
RH	1	2	0	1	0
MFH	2	1	0	1	0
GMH	0	0	0	0	0

Tabelle 15: Verteilung „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ auf 10 Referenzgebäude übertragen

	Baualtersklassen				
	<1949	1949-1968	1969-1983	1984-2001	>2002
EFH	1	1	1	1	0
RH	1	1	0	2	0
MFH	0	1	0	1	0
GMH	0	0	0	0	0

Ziel war es mit den 10 Objekten sowohl die Gebäudeklassenverteilung als auch die Altersstruktur im InnovationCity-Gebiet möglichst genau abbilden zu können. Dies geschah, um den Informationsaustausch mit anderen Projekten des InnovationCity-Projekts zu ermöglichen. Darüber hinaus sollten signifikante Gebäudetypen, welche besondere Details aufwiesen, mit einbezogen werden. Auf der technologischen Seite wurde darauf geachtet, dass möglichst alle KWK-Systeme Teil der betrachteten Gruppe waren. Diese verschiedenen Betrachtungen flossen schließlich in die in der Tabelle 16 aufgeführte Verteilung ein.

Tabelle 16: Genäherte Übertragung auf die 10 Referenzgebäude

	Baualtersklassen				
	<1949	1949-1968	1969-1983	1984-2001	>2002
EFH	1	0	0	0	0
RH	2	1	0	2	1
MFH	1	2	0	0	0
GMH	0	0	0	0	0

Anhand dieses Schlüssels wurden Gebäude aus dem Bestand des Projektes „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ ausgewählt. Diese Auswahl wurde in Absprache mit den Bewohnern und der Hochschule Ruhr West getroffen.

Referenzgebäude

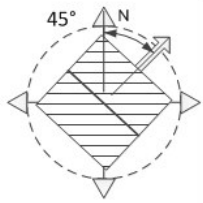
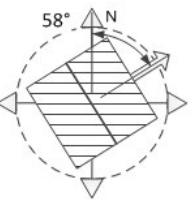
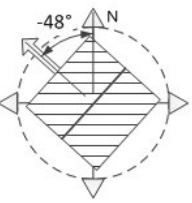
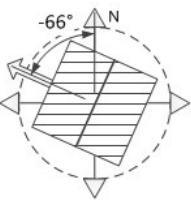
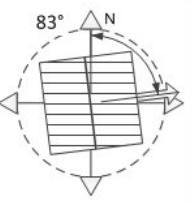
Die anhand des dargelegten Verfahrens ausgewählten 10 Referenzgebäude, sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 mit ihren jeweiligen objektspezifischen Parametern charakterisiert. Die grafische Darstellung in der obersten Zeile stellt die Ausrichtung der definierten Gebäude-Nordseite gegen den geografischen Nordpol dar. Diese Informationen hinsichtlich der Ausrichtung der einzelnen Gebäude wurden mittels Geoinformationssystemen ausgewertet und sind notwendig zur Berechnung der konvektiven Verluste an den einzelnen Gebäudeflächen. Die Angaben zu etwaigen Renovierungen beziehen sich dabei von links nach rechts auf das Jahr der Renovierung der oberen Geschossdecke, des Dachs, der Außenwände und der Fenster.

Tabelle 17: Tabellarische Auflistung der wichtigsten Objektparameter der Referenzgebäude, Teil 1

ID	004			007			010			013			176			
Ausrichtung																
Gebäudetyp	REH			REH			REH			REH			MFH			
Baujahr	1988			1919			1956			1914			1950			
Bewohner	3			2			4			5			11			
Renovierung OGD/D/AW/F	-/-/-			-/2003/-/-			-/-/-/2012			-/2007/-/2005			-/2013/-/90-00			
Wohnfläche	120 m ²			160 m ²			145 m ²			180 m ²			515 m ²			
KWK	Stirling			Stirling			Stirling			Stirling			Otto			
Speicher-Vol.	774 Liter			750 Liter			774 Liter			750 Liter			1000 Liter			
Leistung e _{kww} /th _{kww} /ZHG [kW]	1,0	5,0	22	1,0	5,3	22	1,0	5,0	22	1,0	5,3	22	4,7	12,5	35	
gem. Strom-/Heizenergie*-bedarf pro Jahr [MWh]	7,4		15,9		4,1		36,2		4,0		14,8		7,9		35,1	
													15,8		95,9	

*witterungsbereinigt

Tabelle 18: Tabellarische Auflistung der wichtigsten Objektparameter der Referenzgebäude, Teil 2

ID	178	208	221	224	227
Ausrichtung					
Gebäudetyp	REH	REH	EFH	MFH	MFH
Baujahr	1988	1903	2002	1914	1960
Bewohner	3	2	2-4	6	15
Renovierung OGD/D/AW/F	-/-/-	-/1981/1981/1981	-/-/-	2014/-/-/-	-/2013/-/2003
Wohnfläche	176 m ²	168 m ²	180 m ²	300 m ²	400 m ²
KWK	Stirling	Otto	Stirling	Stirling	Otto
Speicher-Vol.	774 Liter	300 Liter	175 Liter	400 Liter	800 Liter
Leistung e _{k_{KWK}} /th _{k_{KWK}} /ZHG [kW]	1 | 5,0 | 22	1 | 2,5 | 16	1 | 5,3 | 22	1 | 5,3 | 22	4,7 | 12,5 | 35
gem. Strom- /Heizenergie*- bedarf pro Jahr [MWh]	10,2 | 28,5	- | 26,3	7,7 | -	3,6 | 46,1	20 | 84,3

*witterungsbereinigt

3.2 Darstellung und Untersuchung der Messergebnisse

Der Fokus dieses Kapitels liegt in der Darstellung der im Rahmen des Projekts erfassten Messdaten. Hierbei werden die erfassten Messdaten in der Form aufbereitet, dass erste Analysen für den gesamten Projektzeitraum sowie für die Zeitintervalle von einer Woche und eines Tages durchgeführt werden. Die hier dargestellten Daten bilden die Grundlage für die im Bericht folgenden Auswertungen zur ökologischen und ökonomischen Bilanzierung der im Projekt installierten KWK-Anlagen (siehe Kapitel 3.3). Des Weiteren werden die hier angefügten Daten zur Validierung der dynamischen Simulationen in Kapitel 3.4 herangezogen.

Die in diesem Kapitel dargestellten Daten beschränken sich auf die Energieflüsse innerhalb der betrachteten Objekte sowie der vorherrschenden Lufttemperatur, mit der es möglich ist Rückschlüsse auf die temperaturabhängige Betriebsweise der KWK-Systeme zu ziehen. Bei den hier berücksichtigten Energieflüssen handelt es sich um den Brennstoffbezug (Erdgas) der betrachteten KWK-Systeme sowie der hieraus generierten Wärme und elektrischen Energie. Die messtechnische Datenerfassung erlaubt es weiterhin den vom KWK-System generierten Strom hinsichtlich der Eigennutzung und Einspeisung ins öffentliche Netz zu analysieren. Des Weiteren geht in die Betrachtungen der Energieflüsse noch der Strombezug aus dem öffentlichen Netz ein.

3.2.1 Kumulierte Gesamtauswertung

Für eine Analyse aller messtechnisch erfassten KWK-Systeme werden die Daten der installierten kumulierten Messzähler herangezogen. Zum Zeitpunkt der Auswertung konnte hierbei auf die messtechnische Erfassung von 52 KWK-Anlagen zurückgegriffen werden. Für diese 52 Anlagen war während des Projektverlaufs eine kontinuierliche Datenerfassung der kumulierten Messzähler ohne gravierende Störungen möglich. Für die restlichen Systeme sind die in Kapitel 2.4.2 erläuterten Störungen aufgetreten, die eine fundierte Analyse dieser Systeme über den gesamten Projektzeitraum nicht zu lassen.

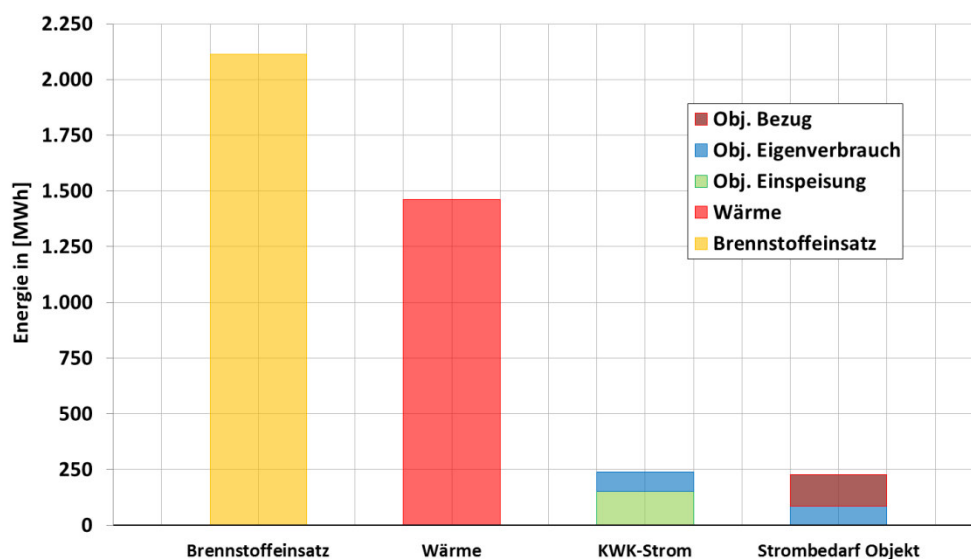


Abbildung 44: Bereitgestellte und bezogene Energiemengen von 52 KWK-Systemen sowie von den Gebäuden während des Projektzeitraumes (IBN der jeweiligen Anlage und Bilanzende 01.10.15)

In Abbildung 44 sind die innerhalb des Projekts umgesetzten Energiemengen zusammengefasst. Hierfür wurden die oben genannten Energieflüsse aller Anlagen seit dem Zeitpunkt der jeweiligen Inbetriebnahme bis zum Stichtag der Messdatenerfassung am 01.10.2015 aufsummiert. Innerhalb des Projektzeitraums haben die untersuchten KWK-Anlagen 2.114 MWh Erdgas bezogen und hierbei die Wärme von 1.462 MWh sowie die Strommenge von 238 MWh bereitgestellt. Von der bereitgestellten elektrischen Energie wurden 36 % für die Eigenbedarfsdeckung genutzt und die restlichen 152 MWh ins öffentliche Netz eingespeist. Der zusätzliche Strombezug aus dem öffentlichen Netz zur Deckung des Gebäudebedarfs lag bei 141 MWh und liegt somit in der Größenordnung vom eingespeisten KWK-Strom.

3.2.2 Kumulierte Objektanalyse

Um die Betriebsweise der KWK-Systeme in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen darstellen zu können, soll im Folgenden auf die erfassten Daten eines einzelnen Systems eingegangen werden. Die Grundlage soll hierbei das Referenzgebäude mit der ID 221 bilden, das in den dynamischen Simulationen in Kapitel 3.4 detailliert analysiert wird. Das Referenzobjekt 221 stellt eine Doppelhaushälfte dar und beinhaltet einen vier Personen-Haushalt. Das Gebäude wurde im Jahr 2002 errichtet und verfügt über eine Wohnfläche von ca. 180 m². In dem Referenzobjekt wurde ein Stirling-Motor betriebenes KWK-System mit integriertem Zusatzheizgerät installiert.

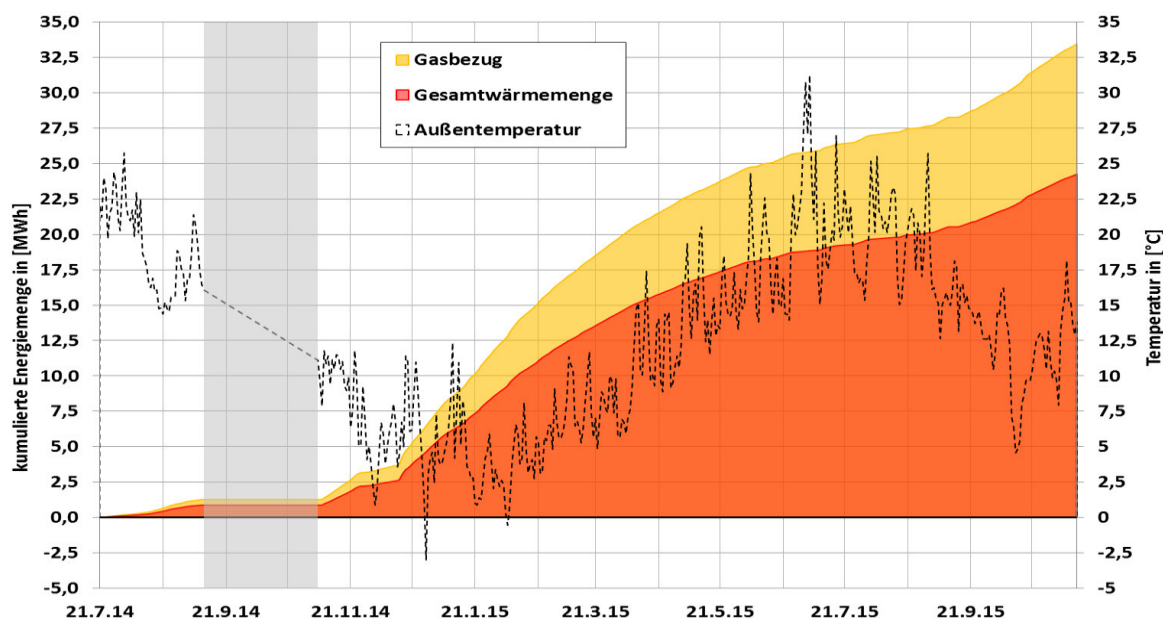


Abbildung 45: Kumulierte Messdaten der Erdgas- und Wärmemengenzähler des Referenzobjekts 221

In Abbildung 45 sind die Daten der kumulierten Messdatenzähler zum bezogenen Brennstoff des gesamten KWK-Systems und der hieraus generierten Wärme dargestellt. Die bereitgestellte Wärmemenge setzt sich hierbei aus den generierten Wärmemengen der KWK-Anlage und des integrierten Zusatzheizgeräts zusammen. Des Weiteren ist in der Abbildung die am Objekt vorherrschende Außentemperatur angefügt. Die dargestellten Messdaten zeigen hierbei den erfassten Datenverlauf von der Inbetriebnahme des KWK-Systems im Juli 2014 bis zum festgelegten Bilanzende am 01.10.2015.

Die Darstellung der Messdaten in Abbildung 45 lässt erkennen, dass die Daten nicht immer kontinuierlich auflaufen und es zu Ausfällen in der Datenerfassung kommen kann. So weisen die Verläufe der Messdaten (Gasbezug und Gesamtwärmemenge) im grau unterlegten Bereich keine Steigung auf. Dies würde bei der vorliegenden Auftragung der kumulierten Messzähler bedeuten, dass in diesem Zeitraum kein Erdgas bezogen und auch keine Wärme vom System bereitgestellt wurde.

Generell spiegeln die Steigungen der Graphen die Höhe des im Objekt vorliegenden Wärmebedarfs wider. So weisen die Graphen bei niedrigen Außentemperaturen starke Steigungen auf, die mit einem erhöhten Gasbezug und entsprechend mit einer erhöhten Wärmebereitstellung korrelieren.

Unter Vernachlässigung des Ausfalls bei der Datenerfassung wurden seit der Inbetriebnahme des KWK-Systems ca. 33 MWh Erdgas bezogen und hierbei die Wärme von ca. 24 MWh bereitgestellt. Diese Wärmemenge dient hierbei zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser und Heizwärme.

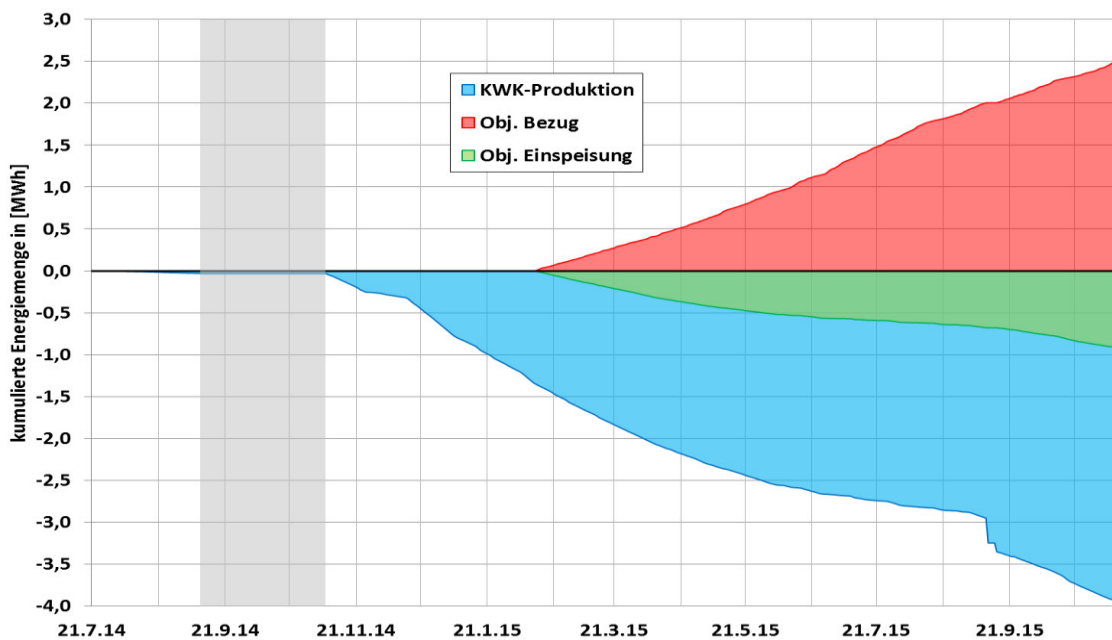


Abbildung 46: Kumulierte Messdaten der Strommengen zähler des Referenzobjekts 221

In Abbildung 46 sind die kumulierten Messdaten zu den bezogenen und bereitgestellten Strommengen innerhalb des Objekts dargestellt. Erkennbar ist, dass die Datenerfassung zu Beginn der Versuchsreihe nicht voll funktionsfähig war. Im grau unterlegten Bereich ist der Ausfall der Messdatenerfassung im September und Oktober 2014 analog zu Abbildung 45 zu erkennen. Anschließend laufen zunächst nur die Messwerte für die vom KWK-System generierte Strommenge auf. Seit Februar 2015 werden jedoch alle Messwerte zuverlässig erfasst. Das Referenzobjekt 221 hat seitdem ca. 2,5 MWh Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen und ca. 1 MWh des vom KWK-System generierten Stroms eingespeist. Insgesamt hat die KWK-Anlage im betrachteten Zeitintervall die Strommenge von ca. 4 MWh bereitgestellt, sodass ca. 3 MWh für den Eigenbedarf im Referenzgebäude aufgewendet wurden.

3.2.3 Wochenanalyse

Für eine detaillierte Analyse des Betriebsverhaltens der im Projekt eingesetzten KWK-Systeme ist es von Interesse, die installierten Systeme in Abhängigkeit von verschiedenen Witterungsverhältnissen zu untersuchen. In den im Bericht angefügten dynamischen Simulationen (siehe Kapitel 3.4) wurden Wochenanalysen für drei verschiedene Witterungsverhältnisse durchgeführt. Hierbei wurden für die Untersuchungen die im Laufe des Projekts aufgetretene kälteste und wärmste Woche herangezogen. Des Weiteren wurde das Betriebsverhalten in einer sogenannten Übergangswoche analysiert, in welcher die Lufttemperatur um die Heizgrenztemperatur von 15 °C (VDI 2067 Blatt1) schwankt. Dies ermöglicht eine Untersuchung des Betriebsverhaltens der KWK-Systeme in einem Grenzbereich, der durch einen Wechsel zwischen Heizbetrieb und einem Betrieb der reinen Aufbereitung des Trinkwarmwassers gekennzeichnet ist. Im Folgenden werden für das Referenzgebäude mit der ID 221 Wochenverläufe für die oben genannten Witterungsverhältnisse dargestellt. Diese Daten bilden die Basis für die Validierung der dynamischen Simulationen aus Kapitel 3.4.

Winterwoche

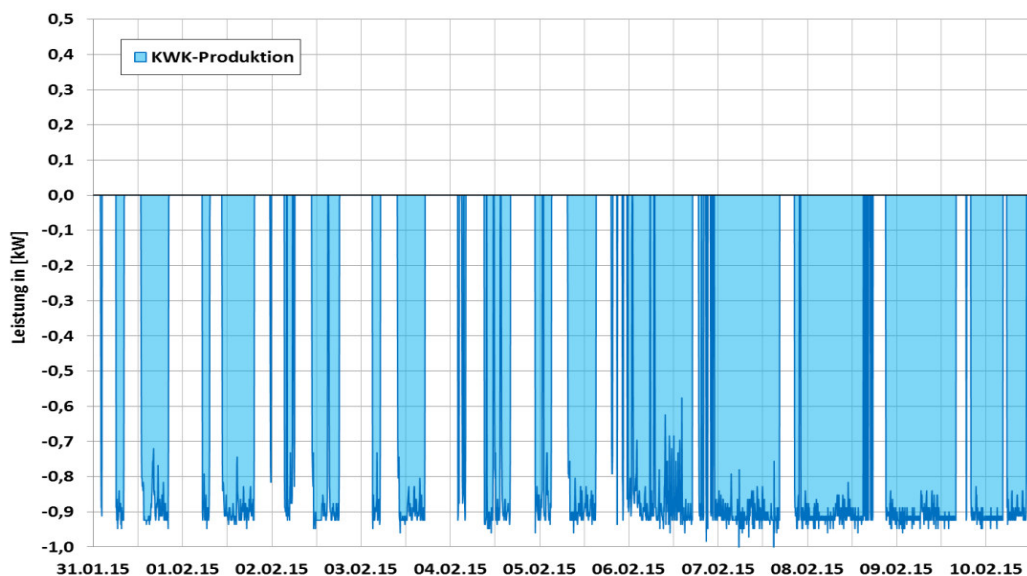


Abbildung 47: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die betrachtete Winterwoche

In Abbildung 47 sind die Messdaten der im Objekt erfassten Strommengen für die kälteste Woche des betrachteten Projektzeitraums dargestellt. Aufgrund eines Fehlers in der Datenerfassung liegen für diesen Zeitraum jedoch nur die Messwerte für den bereitgestellten KWK-Strom vor. Angaben über die Einspeisung und damit über den Eigenverbrauch sowie über den Bezug aus dem öffentlichen Netz können nicht gegeben werden. Allerdings geben die Messdaten Aufschluss über Betriebszeiten des KWK-Systems. Die Anlage läuft zunächst mit einer Nacht- und Tagabschaltung. Ab Februar 2015 wird der Betrieb des Systems hingegen in der Form geändert, dass dieses nur noch über Nacht abgeschaltet wird. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die elektrische Leistung des Stirling-KWK-Systems annähernd konstant bei ca. 1 kW liegt und somit die Leistung des Systems nicht moduliert wird.

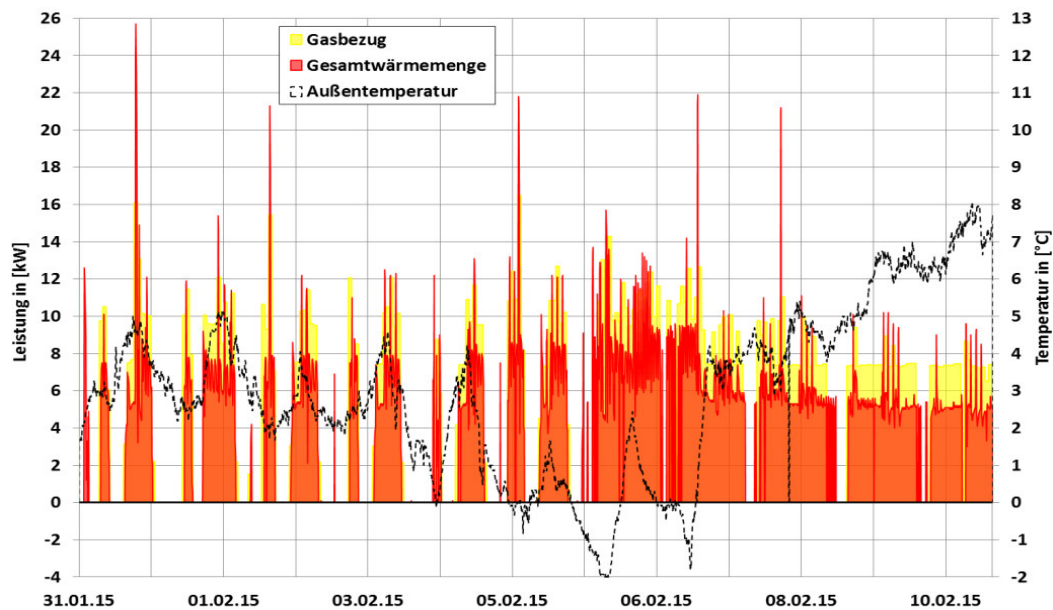


Abbildung 48: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Winterwoche sowie die vorherrschende Außentemperatur

Die Betriebszeiten der Anlage können weiterhin aus der Darstellung des Gasbezugs und der bereitgestellten thermischen Leistung in Abbildung 48 abgeleitet werden. Auch an dieser Stelle gilt es zu beachten, dass der Brennstoffeinsatz und die generierte thermische Leistung des Gesamtsystems dargestellt sind und diese sich aus KWK-Anlage und Zusatzheizgerät zusammensetzen. Es lässt sich teilweise erkennen, zu welchen Zeiten das Zusatzheizgerät unterstützend eingesetzt hat. So verfügt das KWK-Modul über eine thermische Leistung von 5,3 kW. Demzufolge kann man davon ausgehen, dass bei thermischen Leistungen oberhalb dieses Wertes das Zusatzheizgerät in Betrieb ist. Das Zusatzheizgerät verfügt über eine thermische Leistung von bis zu 22 kW, die entsprechend des Wärmebedarfs moduliert.

Winterwoche 2

Zusätzlich zur angefügten kältesten Woche, die für die Betrachtungen in Kapitel 3.4 herangezogen wird, soll an dieser Stelle eine weitere Woche mit relativ niedrigen Lufttemperaturen angeführt werden. In der gewählten Woche sind die Lufttemperaturen in der Regel höher als in der zuvor dargestellten kältesten Woche, jedoch ist für diese Woche die Messdatenerfassung vollständig und ermöglicht somit eine Analyse des Betriebsverhaltens für kalte Perioden.

In Abbildung 49 sind die erfassten Messdaten der im Objekt bezogenen und bereitgestellten Strommengen zusammengefasst. Es zeigt sich, dass das KWK-System in definierten Zeitintervallen in Betrieb ist und hierbei die elektrische Leistung von ca. 1 kW bereitstellt. Nur vom 27.02.2015 auf den 28.02.2015 weicht die Betriebsweise des KWK-Systems in der Form ab, dass es durchgehend in Betrieb ist. Diese Abweichung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das Nutzerverhalten zurückzuführen und damit zu erklären, dass in der Nacht von Freitag auf Samstag die Nachtabenkung deaktiviert wurde.

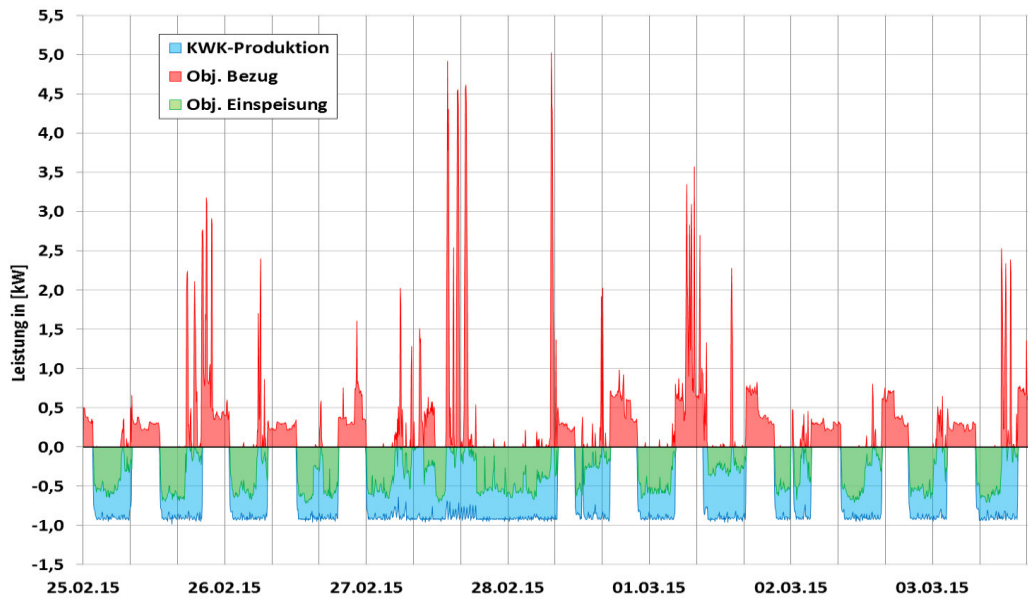


Abbildung 49: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die zweite betrachtete Winterwoche

Des Weiteren ist aus den Messdaten abzuleiten, dass ca. zwei Drittel des vom KWK-System generierten Stroms in das öffentliche Netz eingespeist werden und der restliche Strom zur Eigendeckung aufgewendet wird. Zieht man in diese Betrachtung den aus dem öffentlichen Netz bezogenen Strom hinzu, lässt sich daraus schließen, dass das Objekt in der Regel eine Last von ca. 500 W vorweist. Hierbei können jedoch Spitzenlasten von bis zu 5 kW auftreten.

In Abbildung 50 ist der Gasbezug sowie die vom KWK-System generierte thermische Leistung zur zugehörigen kalten Woche dargestellt. Der Wochenverlauf weist einen identischen zeitlichen Verlauf auf, wie der der KWK-Strombereitstellung.

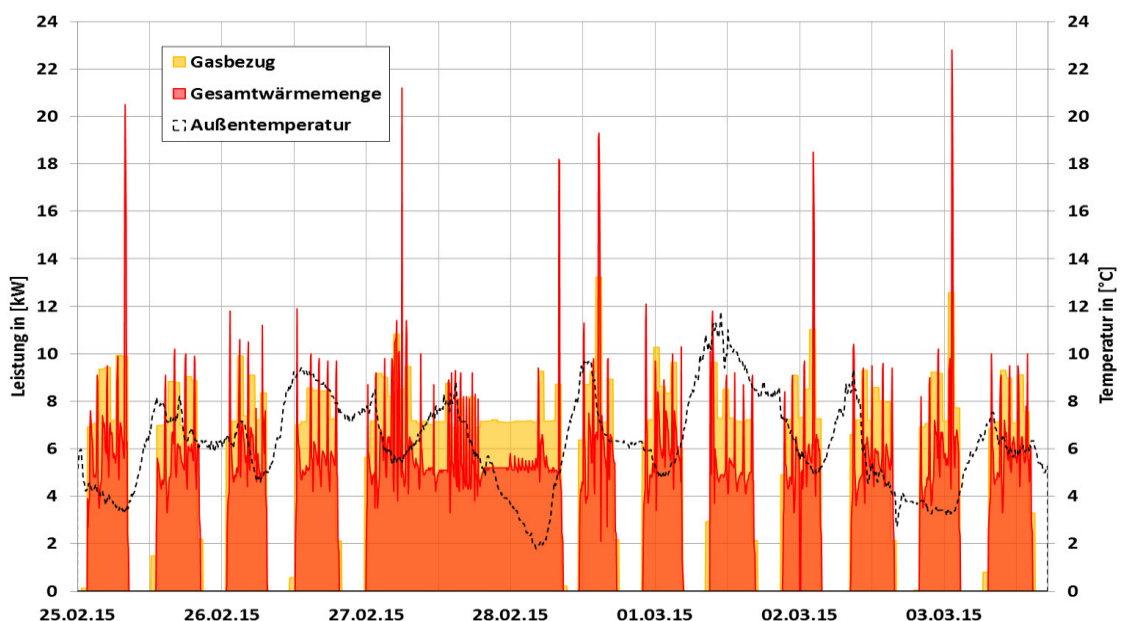


Abbildung 50: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Winterwoche sowie die vorherrschende Außentemperatur

Da die angefügte Wärmebereitstellung sowie der Brennstoffeinsatz die Summe über die KWK-Anlage und das Zusatzheizgerät darstellen, kann hieraus geschlossen werden, dass das Zusatzheizgerät immer simultan zur KWK-Anlage betrieben wird. Dies bedeutet wiederum, dass das Zusatzheizgerät nur unterstützend in den Prozess der Wärmebereitstellung eingreift und nur zur Deckung der auftretenden thermischen Spitzenlasten eingesetzt wird. Die Analyse der bereitgestellten thermischen Leistung zeigt, dass diese in der Regel über der Nennleistung der KWK-Anlage von 5,3 kW liegt. Hieraus lässt sich ableiten, dass in kalten Perioden die Leistung der KWK-Anlage nicht ausreicht, um den Wärmebedarf zu decken und das Zusatzheizgerät größtenteils unterstützend in den Prozess der Wärmebereitstellung eingreift.

Übergangswoche

Die Übergangszeit definiert sich dadurch, dass die Lufttemperatur um die Heizgrenztemperatur schwankt. Die Heizgrenztemperatur wird nach VDI 2067 Blatt 1 mit 15 °C angesetzt und stellt eine Grenztemperatur dar, ab welcher das Beheizen der Wohnräume erforderlich ist, um eine Raumtemperatur von 20 °C zu gewährleisten. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass die Heizgrenztemperatur in der Praxis von der Gebäudesubstanz und des Nutzerverhaltens abhängt. Dennoch bietet die VDI-Richtlinie einen guten Anhaltspunkt zur Auswahl einer zu analysierenden Übergangswoche.

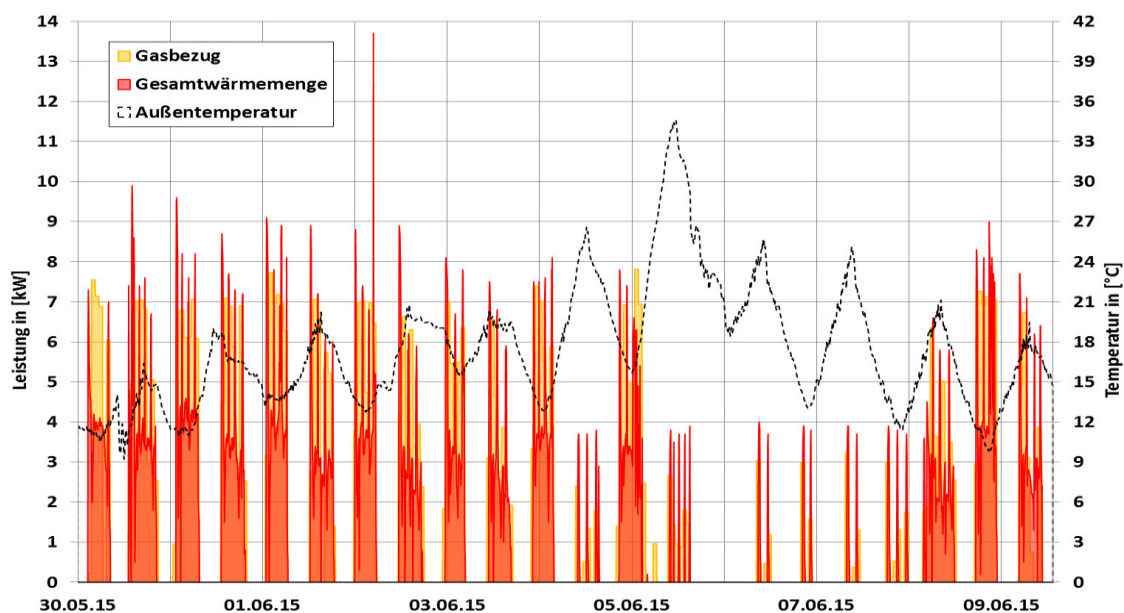


Abbildung 51: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Übergangswoche sowie die vorherrschende Außentemperatur

Die Betrachtung des Brennstoffeinsatzes und der bereitgestellten thermischen Leistung in Abbildung 51 spiegelt das Betriebsverhalten des KWK-Systems in Abhängigkeit von der Außentemperatur sehr gut wider. Es zeigt sich, dass zu Beginn und Ende der Woche das KWK-System aufgrund niedriger Außentemperaturen in Betrieb ist und Wärme bereitstellt. Im Intervall vom 05.06.2015 bis zum 08.06.2015 nehmen die Temperaturen hingegen in der Form zu, dass das KWK-System im Wesentlichen nicht im Betrieb ist. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Wärmebereitstellung in diesem Intervall mit stark abfallenden Außentempera-

ren korreliert. Eine erste Analyse der bereitgestellten thermischen Leistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur lässt die Vermutung zu, dass die Heizgrenztemperatur für das betrachtete Objekt bei ca. 18 °C liegt.

Für die Betriebsweise des KWK-Systems in der betrachteten Woche kann somit festgehalten werden, dass das KWK-System zu Beginn des Betrachtungszeitraums tagsüber relativ gleichmäßig läuft und es Nachts nicht in Betrieb ist. In dem Intervall der erhöhten Temperatur ist der Betrieb des KWK-Systems unregelmäßig und auch nur von kurzer Dauer. Durch die kurzen Laufzeiten des KWK-Geräts in diesem Intervall fällt die Strombereitstellung der KWK-Anlage gering aus, sodass der Strombedarf des Objekts im Wesentlichen aus dem öffentlichen Netz gedeckt wird (siehe Abbildung 52). Auffällig ist, dass in dem Intervall vom 05.06.2015 bis zum 08.06.2015 keine merklichen Spitzenlasten auftreten, sodass die Vermutung nahe liegt, dass die geringen Laufzeiten des KWK-Systems in diesem Intervall auch auf eine Abwesenheit der Bewohner zurückzuführen ist. Die elektrische Last in diesem Intervall beträgt ca. 500 W und liegt unterhalb der Nennleistung von ca. 1 kW. An diesem Beispiel zeigt sich, dass eine effektive bzw. flexible Auslegung der KWK-Systeme (+ Speicher) das Potenzial besitzt die auftretende Grundlast im eingesetzten Objekt zu decken.

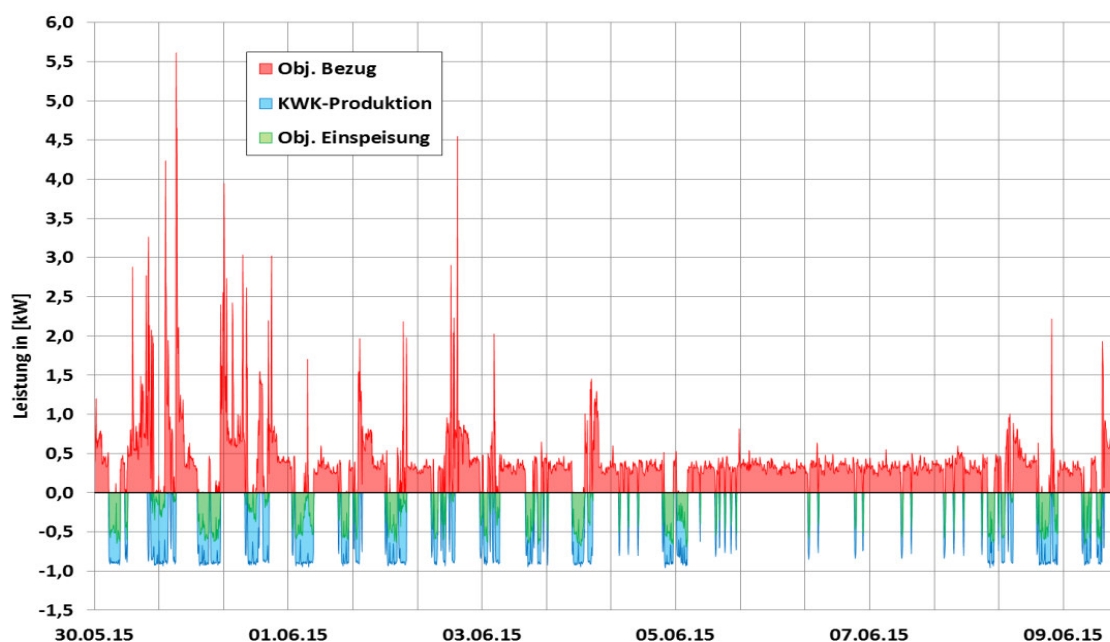


Abbildung 52: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die betrachtete Übergangswoche

Sommerwoche

In den Sommermonaten liegen die Lufttemperaturen in der Regel oberhalb der Heizgrenztemperatur, sodass der Bedarf an Raumwärme gering ist. Demzufolge wird die Betriebsweise des KWK-Systems im Wesentlichen durch den Bedarf an Trinkwarmwasser bestimmt. In Abbildung 53 ist der Temperaturverlauf der ausgewählten Sommerwoche gemeinsam mit dem Gasbezug und der bereitgestellten thermischen Leistung des KWK-Systems dargestellt.

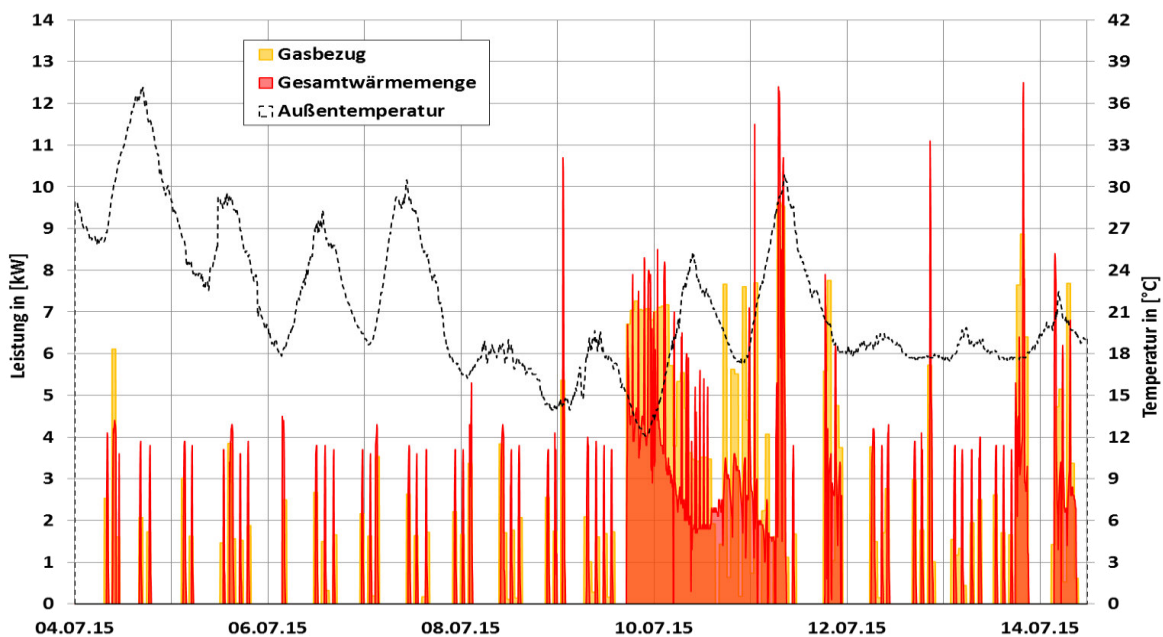


Abbildung 53: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Sommerwoche sowie die vorherrschende Außentemperatur

Es handelt sich dabei um die Woche mit der höchsten Durchschnittstemperatur innerhalb des betrachteten Projektzeitraums. Aus dem Verlauf der bereitgestellten thermischen Leistungen ist ersichtlich, dass das KWK-System überwiegend in kurzen Intervallen in Betrieb ist. Dieses Verhalten spiegelt gerade die kurzfristige Bereitstellung von Wärme für die Warmwasseraufbereitung wider. Die thermische Leistung bleibt in den Intervallen der diskreten Wärmebereitstellung unterhalb der thermischen Nennleistung des KWK-Systems von 5,3 kW, sodass diese in warmen Perioden im Wesentlichen den Wärmebedarf deckt. Ein Abweichen von dieser diskreten Betriebsweise besteht im Zeitraum vom 10.07.2015 bis zum 12.07.2015 ein kontinuierlicher Wärmebedarf. Dieser Anstieg des Wärmebedarfs ist zunächst auf einen Lufttemperaturabfall am 10.07.2015 auf bis zu 12 °C zurückzuführen, sodass ein Bedarf an Raumwärme bestand, da die Heizgrenztemperatur unterschritten wurde. Die Lufttemperatur nimmt dann im weiteren Verlauf stetig auf ca. 25 °C zu, wobei ein kontinuierlicher Wärmebedarf bestehen bleibt. Der bestehende Wärmebedarf erscheint auf den ersten Blick unüblich, kann jedoch damit erklärt werden, dass es sich bei dem 11.07.2015 um einen Samstag handelt. So kann das Nutzerverhalten am Wochenende stark gegenüber dem an Werktagen abweichen. In diesem Intervall fallen des Weiteren thermische Lastspitzen auf die oberhalb der thermischen Leistung des KWK-Systems liegen. Hieraus folgt, dass es auch in warmen Perioden zu Spitzenlasten kommen kann, die vom Zusatzheizgerät gedeckt werden müssen.

Dieses Betriebsverhalten spiegelt sich auch in der Strombilanz des Objekts in Abbildung 54 wider. So wird der Strombedarf im Wesentlichen durch einen Bezug aus dem öffentlichen Netz gedeckt. Die diskrete Betriebsweise des KWK-Systems und die damit verbundene Strombereitstellung trägt nicht wirklich zur Deckung des Strombedarfs bei. Lediglich im Intervall des kontinuierlichen Betriebs wird der Strombedarf vom KWK-System gedeckt.

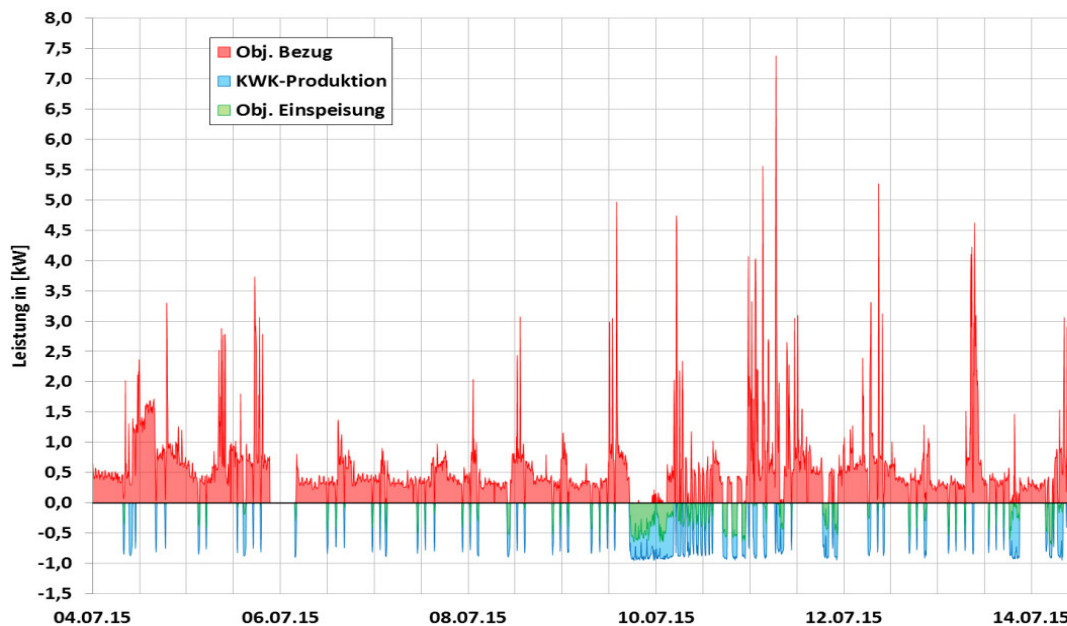


Abbildung 54: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die betrachtete Sommerwoche

3.2.4 Tagesanalyse

Die Darstellung der erfassten Messdaten für das Intervall eines Tages ermöglicht einen detaillierten Einblick in das Betriebsverhalten der KWK-Systeme in Abhängigkeit von der Außentemperatur und des Nutzerverhaltens. Aufgrund des unterschiedlichen Betriebsverhaltens bei verschiedenen Außentemperaturen wurde die Tagesanalyse der wärmegeführten KWK-Anlage für einen Sommer- und einen Wintertag durchgeführt. Im Folgenden wird das Messintervall von 24 Stunden betrachtet, sodass ein gesamter Tag abgebildet wird. Um das Betriebsverhalten in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen analysieren zu können und hierbei die Einflüsse des Nutzerverhaltens so gering wie möglich zu halten, wurde für die Auswertungen jeweils ein Mittwoch gewählt.

Tagesverlauf Wintertag

In Abbildung 55 ist die Strombilanz des betrachteten Objekts für einen kalten Tag dargestellt. Die Analyse des Tagesverlaufs zeigt, dass die KWK-Anlage an diesem Tag für zwei längere Intervalle in Betrieb war. In diesen Intervallen hat das System annähernd konstant die elektrische Leistung von 1 kW bereitgestellt, was der Nennleistung der betrachteten Anlage entspricht. Das erste Intervall liegt zwischen 2:00 Uhr und 8:00 Uhr und das zweite zwischen 14:00 Uhr und 21:00 Uhr. Innerhalb dieser Zeitspannen wird der Strombedarf des Gebäudes zum größten Teil von der KWK-Anlage gedeckt, sodass aus dem öffentlichen Netz kein Strom bezogen wird. Im Zeitraum zwischen 18 Uhr und 20 Uhr steigt der Strombedarf über die Eigenproduktion hinaus an, sodass ein Strombezug aus dem öffentlichen Netz stattfindet, obwohl die KWK-Anlage in Betrieb ist. Hierbei werden Spitzenlasten von ca. 3.200 W durch das öffentliche Netz gedeckt. Ferner zeigt der Tagesverlauf, dass ein kontinuierlicher Strombezug aus dem öffentlichen Netz außerhalb der Betriebszeit der KWK-Anlage besteht.

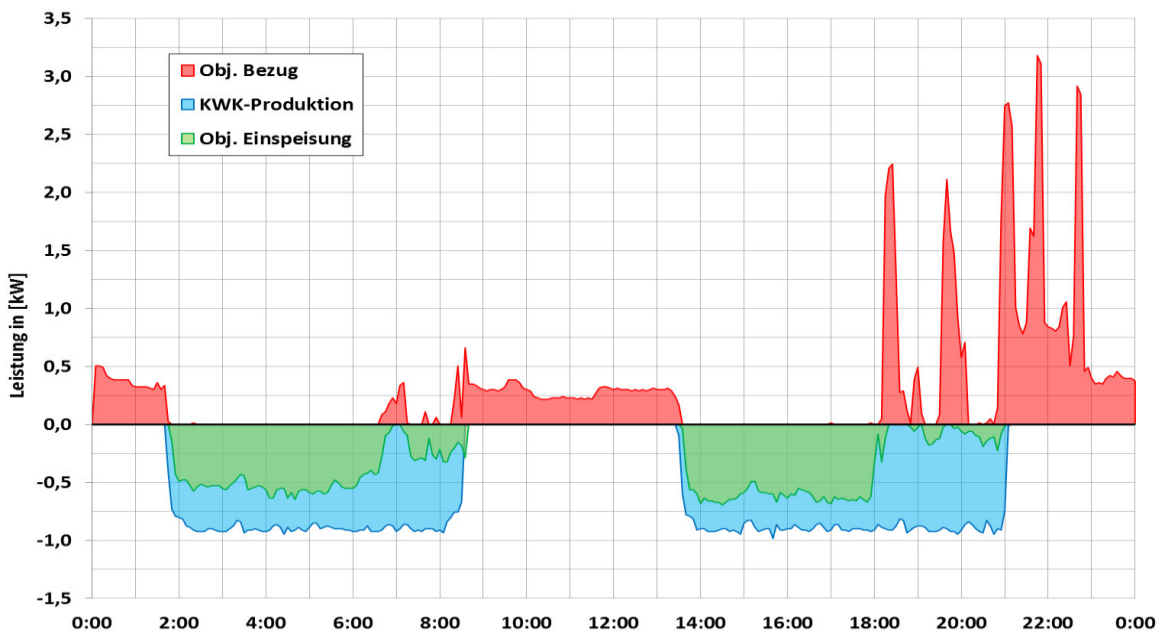


Abbildung 55: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für den betrachteten Wintertag

Die vom KWK-System bereitgestellte thermische Leistung und der zugehörige Brennstoffeinsatz sind in Abbildung 56 gemeinsam mit der vorherrschenden Außentemperatur dargestellt. Für den gezeigten Verlauf des Brennstoffeinsatzes gilt es zu berücksichtigen, dass die Messdaten im Gegensatz zu den anderen Daten nur stündlich und nicht alle fünf Minuten erfasst werden. Die Stundenwerte wurden für diese Darstellung auf 5-Minutenwerte umgelegt, sodass der Verlauf im Vergleich zu den anderen Messwerten über das Intervall der gemittelten Stunde konstant ist.

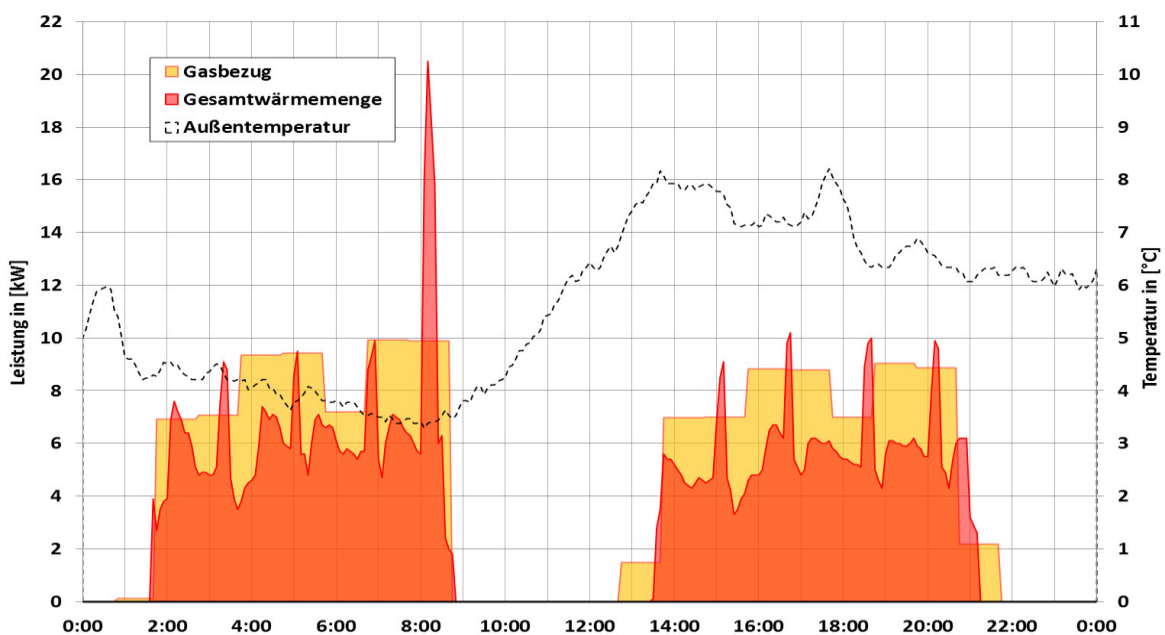


Abbildung 56: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems am betrachteten Wintertag sowie die vorherrschende Außentemperatur

Unter Berücksichtigung der wärmegeführten Fahrweise ist in Abbildung 56 erkennbar, dass das Objekt eine Temperaturabsenkung über den Tag hinweg besitzt und es sich somit bei dem betrachteten Tag um einen Werktag handelt. So stellt das KWK-System in dem Intervall von 8 Uhr bis 14 Uhr keine Wärme bereit, obwohl die Lufttemperatur niedriger ist als in der darauf folgenden Heizperiode (14 Uhr bis 21 Uhr). Generell zeigt sich, dass die bereitgestellte thermische Leistung maßgeblich über der Nennleistung der KWK-Anlage von 5,3 kW liegt. Demzufolge setzt in kalten Perioden das Zusatzheizgerät unterstützend ein, um die Deckung des Wärmebedarfs sicherzustellen.

Tagesverlauf Sommertag

Zur Veranschaulichung des temperaturabhängigen Betriebsverhaltens in warmen Perioden soll im Folgenden die Strombilanz des Objekts sowie die Wärmebereitstellung durch das KWK-System an einem Sommertag betrachtet werden.

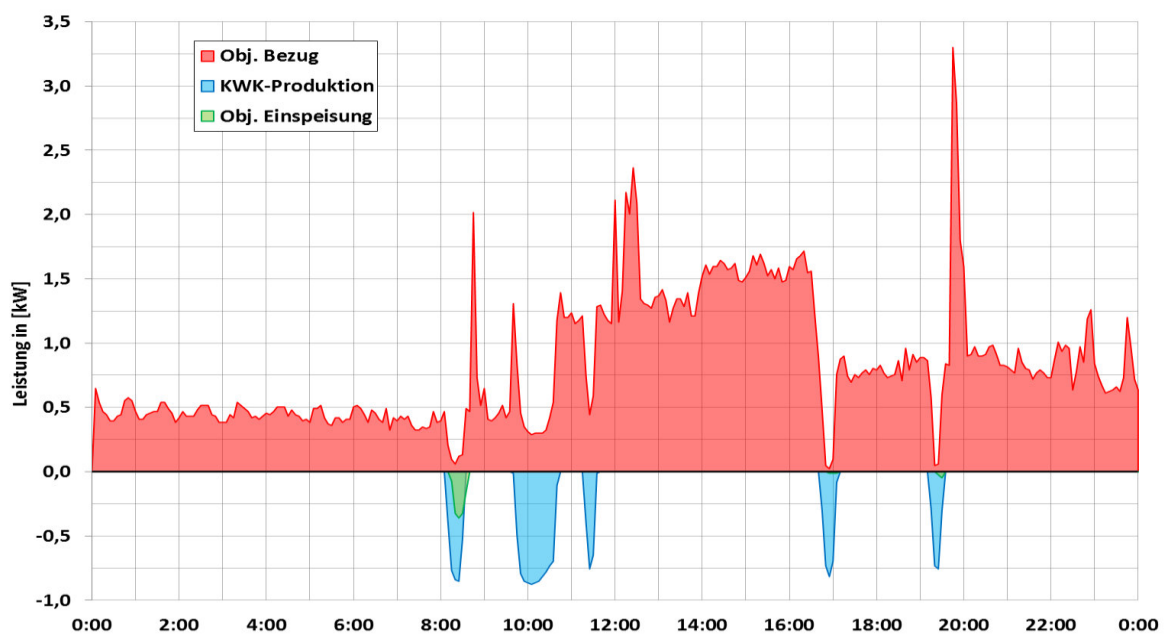


Abbildung 57: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für den betrachteten Wintertag

Aus der Strombilanz des Objekts in Abbildung 57 wird ersichtlich, dass die KWK-Anlage nur für wenige kurze Intervalle in Betrieb ist und elektrische Leistung bereitstellt. Hieraus folgt, dass der Strombedarf im Wesentlichen durch den Strombezug aus dem öffentlichen Netz gedeckt wird.

Die Hinzunahme der Außentemperaturen (siehe Abbildung 58) in die Analysen zeigen auf, dass die vorherrschenden Lufttemperaturen mit Werten zwischen ca. 25 °C und ca. 37 °C weit über der Heizgrenztemperatur liegen. Die bereitgestellte Wärme dient somit ausschließlich zur Erwärmung des Trinkwarmwassers und wird nicht für die Deckung von Raumwärme genutzt.

Die Zeitpunkte der Wärmebereitstellung (siehe Abbildung 58) werden am vorliegenden Werktag durch die Entnahme von Trinkwarmwasser am Morgen und am späten Abend bestimmt. Die hierfür benötigte thermische Leistung liegt unterhalb der Nennleistung der KWK-Anlage, sodass in warmen Perioden der Wärmebedarf vollständig von der KWK-Anlage gedeckt wird.

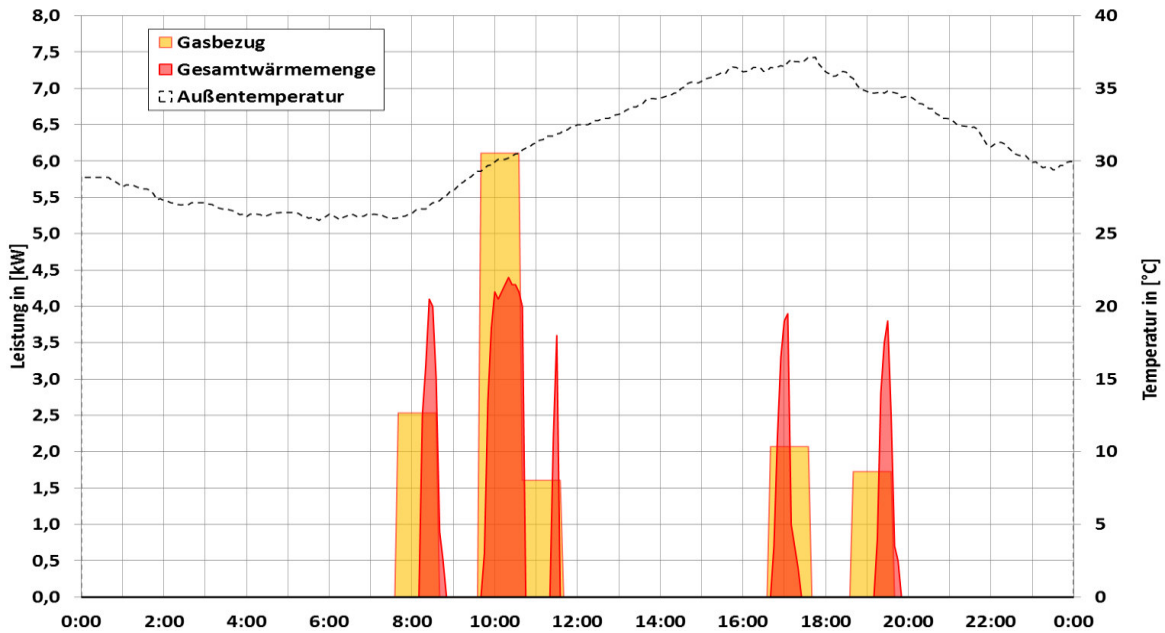


Abbildung 58: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems am betrachteten Sommertag sowie die vorherrschende Außentemperatur

3.3 Ganzheitliche Betrachtung

In dem vorliegenden Bericht werden in der Bilanzierung die eingesetzten KWK-Systeme den zuvor genutzten konventionellen Energieversorgungssystemen gegenübergestellt. Hierbei wird in der Bilanzierung bewusst auf den Vergleich mit aktuell verfügbaren Versorgungstechnologien verzichtet. Dies liegt darin begründet, dass der Schwerpunkt des Projekts in der Analyse von experimentell ermittelten Daten aus dem Feldversuch im Gebiet InnovationCity besteht. Ein Vergleich mit derzeit am Markt verfügbaren Technologien würde zur Folge haben, dass Annahmen bezüglich ihres Betriebsverhaltens in den jeweils betrachteten Objekten getroffen werden müssten. So müssten z. B. Jahresnutzungsgrade aus angegebenen Herstellerdaten abgeleitet werden. Für einen Vergleich mit Hybridsystemen, die z. B. auf Photovoltaikanlagen basieren, müssten für das betrachtete Messintervall eine Approximation für die Strombereitstellung sowie den hiervon genutzten Eigenverbrauch angestellt werden. Die zutreffenden Annahmen würden dazu führen, dass der Schwerpunkt von einer Demonstration zu einer theoretischen Studie verschoben wird. Des Weiteren besteht die Gefahr durch nicht korrekte Approximationen die jeweiligen Versorgungstechnologien nicht adäquat zu bewerten. Dies kann zu einer Überbewertung von Technologien führen, sodass falsche Impulse gesetzt werden.

3.3.1 Methodik zur ökologischen Bilanzierung

Eine wesentliche Zielsetzung des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ besteht in der Einsparung von CO₂-Emissionen und der Reduktion des Primärenergieeinsatzes durch den Einsatz von KWK-Systemen in dem Projektgebiet InnovationCity. Für die ökologische Auswertung der im Feld eingesetzten KWK-Systeme bedarf es einer definierten Methodik, da sie die Analyse und Interpretation der Ergebnisse bestimmt. Folglich ist die Darstellung der Bilanzierungsmethodik für die Transparenz der erzielten Ergebnisse entscheidend. Aufgrund dessen wird zunächst die in diesem Bericht zugrundeliegende Methodik zur ökologischen Bilanzierung der KWK-Systeme beschrieben. Anschließend werden die erzielten Einsparungen bezüglich CO₂-Emissionen und Primärenergieverbrauch dargestellt und diskutiert.

In diesem Projekt ist nicht die ökologische Nachhaltigkeit einzelner Haushalte von Interesse, sondern vielmehr die der jeweiligen KWK-Systeme gegenüber den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen für die Größen Strom und Wärme. Aus diesem Grund wird für die Auswertung der CO₂- und Primärenergieeinsparungen die Bilanzgrenze nicht um das Gebäude der jeweiligen KWK-Anlagen gelegt, sondern „direkt“ um das KWK-System (siehe Abbildung 59). Die Bilanzgrenze wird in dieser Form gewählt, da nur so die gesamte bereitgestellte elektrische Energie der KWK-Anlagen in der Bilanzierung berücksichtigt werden kann. Bei einer Bilanzierung des Gebäudebedarfs entfällt hingegen der in das öffentliche Netz eingespeiste KWK-Strom. Dieser muss allerdings berücksichtigt werden, da die Stromproduktion des deutschen Kraftwerksparks durch den eingespeisten KWK-Strom entsprechend ersetzt wird. Des Weiteren geht bei der Bilanzierung des Gebäudebedarfs der Strombezug aus dem öffentlichen Netz ein, der jedoch für die Ermittlung der CO₂- und Primärenergieeinsparungen des jeweiligen KWK-Systems irrelevant ist.

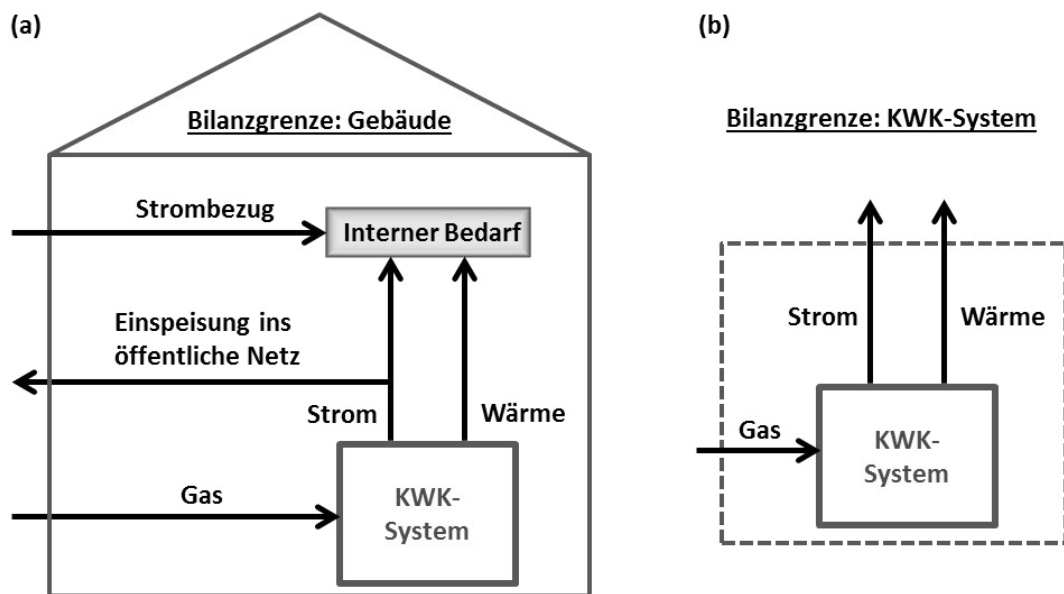


Abbildung 59: Schematischer Vergleich der Bilanzgrenzen (a) Gebäudehülle und (b) KWK-System. Bei einer Bilanzierung des KWK-Systems mittels der Gebäudehülle als Bilanzgrenze wird der ins öffentliche Netz eingespeiste KWK-Strom nicht berücksichtigt. Dieser substituiert jedoch die Strombereitstellung des deutschen Kraftwerksparks. Weiterhin geht in dieser Bilanzgrenze der Strombezug aus dem öffentlichen Netz ein, der jedoch für die CO₂- und Primärenergieeinsparungen des KWK-Systems irrelevant ist. Wird die Bilanzgrenze hingegen direkt um das KWK-System gelegt, werden nur Größen berücksichtigt, die für die Bestimmung der CO₂- und Primärenergieeinsparungen des KWK-Systems wesentlich sind.

Für die gewählte Bilanzgrenze reduzieren sich, wie Abbildung 59 (b) entnommen werden kann, die für die Bilanzierung herangezogenen Messdaten auf drei Größen. In die Auswertung geht der vom KWK-System aufgewendete Brennstoffeinsatz W_{Br} (Messgröße Gasvolumenstrom V_{Gas}) sowie die hieraus generierte Wärme Q_{th} und die elektrische Energie $E_{el,KWK}$ ein. An dieser Stelle gilt es zu beachten, dass das gesamte KWK-System, bestehend aus KWK-Anlage und Zusatzheizgerät (ZHG) bilanziert wird. Folglich bezieht sich der eingesetzte Brennstoff und die generierte Wärme auf beide Anlagenkomponenten.

$$W_{Br} = W_{Br,KWK} + W_{Br,ZHG} \quad (3-1)$$

$$Q_{th} = Q_{th,KWK} + Q_{th,ZHG} \quad (3-2)$$

Aufgrund der in Kapitel 2.4 beschriebenen Schwierigkeiten bei der Datenerfassung, dienen für die Bilanzierung als Datenbasis die Werte der kumulierten Messdatenzähler. Hierbei werden die Anfangs- und Endzählerstände der drei Messgrößen verwendet. Der Endzählerstand ergibt sich aus dem Ende des Projekts und wurde wegen der zeitigen Fertigstellung des Berichts auf den 30.09.2015 gesetzt. Die Erfassung der Anfangszählerstände definiert sich hingegen über den Zeitpunkt, an dem alle drei Messgrößen simultan plausibel detektiert wurden. Dieser Zeitpunkt variiert für die im Projekt eingesetzten KWK-Systeme, da diese zu verschiedenen Zeitpunkten in Betrieb genommen wurden. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass der Zeitpunkt der Inbetriebnahme nicht zwingend mit dem Erfassungszeitpunkt des Anfangszählerstands identisch ist. Dies liegt darin begründet, dass die Messdatenerfassung mittels der zu installierenden Messtechnik nicht immer zeitgleich mit der Inbetriebnahme der KWK-

Anlagen erfolgt ist (siehe Kapitel 2.4). Für die ökologische Bilanzierung wurden die fehlenden Zeiträume zwischen der Messdatenerfassung und der Inbetriebnahme durch eine lineare Hochrechnung der vorhanden Messdaten approximiert, sodass für den gesamten Projektzeitraum eine Aussage über die CO₂- und Primärenergieeinsparungen getroffen werden kann.

In Abbildung 60 ist schematisch skizziert, wie mit Hilfe der erfassten Messdaten aus dem Feldversuch die eingesetzten KWK-Systeme gegen die zuvor genutzten konventionellen Energiebereitstellungssysteme bilanziert werden. Auf der KWK-Seite wird mittels des regionalen Heizwertes H_i ⁷ und dem gemessenen Gasvolumen der Brennstoffeinsatz des KWK-Systems ermittelt. Um die CO₂-Emission des Systems zu bestimmen, wird der berechnete Brennstoffeinsatz mit den spezifischen CO₂-Emissionen von Erdgas $e_{CO_2, Erdgas}$ multipliziert. Bei der Berechnung des Primärenergieeinsatzes wird analog verfahren, indem der Brennstoffeinsatz mit dem Primärenergiefaktor von Erdgas PEF_{Erdgas} multipliziert wird.

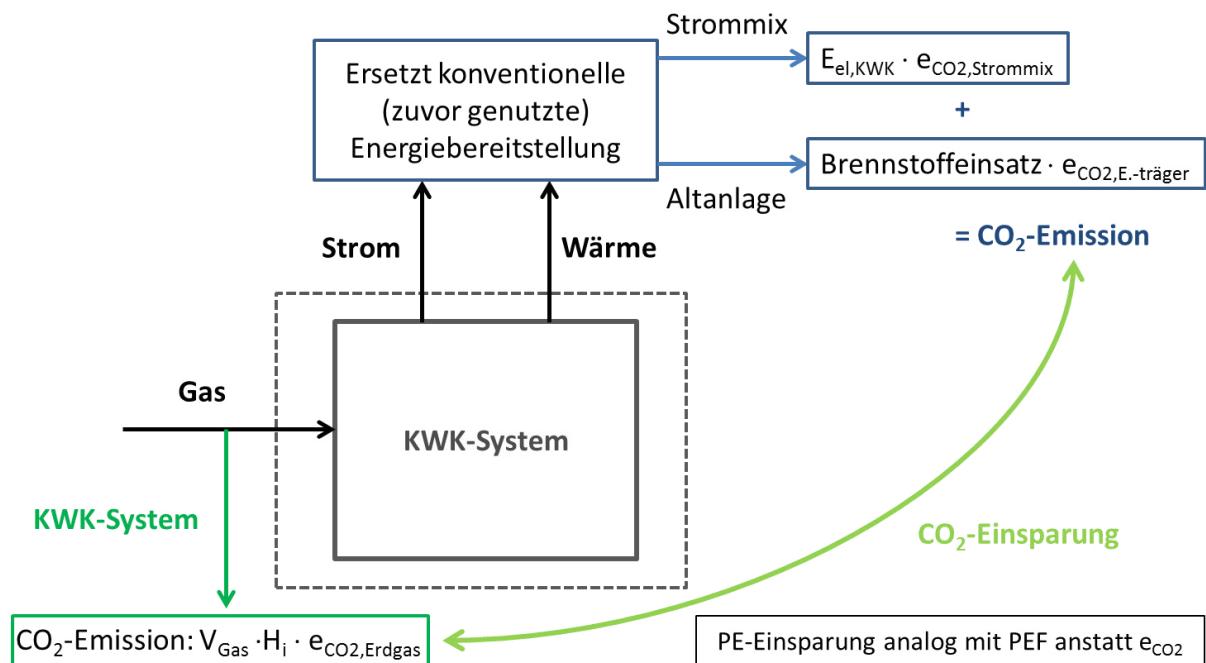


Abbildung 60: Schematische Darstellung der ökologischen Bilanzierungsmethodik. Die CO₂-Emissionen sowie der Primärenergieeinsatz werden für das KWK-System ohne Allokationsverfahren aus dem benötigten Erdgasbezug (Messgröße Gasvolumenstrom) bestimmt. Um die Einsparungen gegenüber den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen zu ermitteln, werden die generierten Erzeugungsprodukte Strom und Wärme auf die entsprechenden konventionellen Versorgungssysteme projiziert. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass in der vorliegenden Analyse bewusst auf ein Allokationsverfahren verzichtet wird, das eine Zuordnung des Brennstoffeinsatzes (bzw. CO₂-Emission, Primärenergieeinsatz) bezüglich der gekoppelten Erzeugungsprodukte Strom und Wärme erlaubt. Dieses Vorgehen basiert auf dem Hintergrund einer neutralen Analyse der CO₂- und Primärenergie-Einsparungspotenziale von KWK-System im häuslichen Betrieb. So

⁷ Im Gebiet der InnovationCity wird L-Gas eingesetzt, das nach Angaben der Ele GmbH einen Heizwert von 9,1 kWh/m³ [13]

bestehen bei anerkannten Allokationsmethoden thermodynamische, ökologische oder ökonomische Interessen im Vordergrund, sodass eines der generierten Energieprodukte stärker gewichtet wird und eine Überbewertung dieses Produkts stattfindet [14, p. 46], [15].

Auf der anderen Seite der Bilanzierung stehen die zuvor genutzten Energieversorgungssysteme, bestehend aus dem öffentlichen Netz und der Altanlage zur Erzeugung der benötigten Nutzwärme. Für die Betrachtung der ökologischen Einsparungen ist stromseitig nur die vom KWK-System generierte elektrische Energie $E_{el,KWK}$ von Bedeutung, da diese die Strombereitstellung des deutschen Kraftwerksparks substituiert. Die zugehörige CO_2 -Emission ergibt sich durch die Multiplikation von $E_{el,KWK}$ mit den spezifischen CO_2 -Emissionen des betrachteten Kraftwerksparks (z. B. deutscher Strommix). Gleiches gilt für den Primärenergieeinsatz durch Multiplikation mit dem entsprechenden Primärenergiefaktor.

In Bezug auf die ausgestoßenen Emissionen durch die zuvor installierte Heizungsanlage ist zunächst der theoretisch benötigte Brennstoffeinsatz zu ermitteln. Hierfür wurde die vom jeweiligen KWK-System generierte Wärme auf die im Gebäude zuvor installierten Heizungsanlagen projiziert. Unter Verwendung des Jahresnutzungsgrades $\eta_{Altanlage}$ der jeweiligen Altanlage (siehe Seite 76) und der Relation

$$W_{Br} = \frac{Q_{th,KWK} + Q_{th,ZHG}}{\eta_{Altanlage}} \quad (3-3)$$

konnte der Brennstoffeinsatz berechnet werden, den die zuvor installierte Heizungsanlage benötigt hätte, um den gemessenen Wärmebedarf des Objekts zu decken. Die hierzu proportionale CO_2 -Emission bzw. Primärenergie ergibt sich in Abhängigkeit von dem eingesetzten Energieträger der Altanlage.

Die CO_2 - und Primärenergieeinsparung des jeweiligen KWK-Systems gegenüber den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen errechnet sich, wie in Abbildung 60 schematisch dargestellt, aus der Gegenüberstellung der ermittelten CO_2 -Emissionen bzw. Primärenergien für den Gasbezug des KWK-Systems und der Addition der Berechnungen für die konventionelle Strom- und Wärmebereitstellung.

Bestimmung des Jahresnutzungsgrades der Altanlagen

Für die Berechnung des theoretischen Brennstoffeinsatzes der Altanlagen mittels Gleichung (3-3) wird der Jahresnutzungsgrad $\eta_{Altanlage}$ der jeweiligen Heizungsanlage benötigt. Die exakte Ermittlung von $\eta_{Altanlage}$ setzt die Vermessung der Altanlagen für ein Zeitintervall von mindestens einem Jahr voraus. Da dieses sehr aufwendig ist und keinen Schwerpunkt des Projekts darstellt, wird zur Bestimmung von $\eta_{Altanlage}$ ein theoretischer Ansatz gewählt.

Die Grundlage für diesen Ansatz bildet Gleichung (3-3), die hierfür nach $\eta_{Altanlage}$ umgestellt wird. In diese Gleichung geht die Wärme ein, die vom jeweiligen KWK-System innerhalb eines Jahres generiert wurde. Des Weiteren wird der mittlere jährliche Brennstoffbezug des jeweiligen Objekts (Altanlage) eingesetzt. Der mittlere jährliche Brennstoffbezug wurde durch eine Befragung der Mitmacher ermittelt und setzt sich aus bis zu drei Abrechnungsperi-

oden zusammen (siehe Kapitel 2.2). Da beide Größen eine Witterungsabhängigkeit besitzen, würde eine Nutzung der „Rohdaten“ die Berechnung von $\eta_{\text{Altanlage}}$ verfälschen. Aus diesem Grund werden die angegebenen Brennstoffbezüge sowie die gemessenen Wärmemengen nach Richtlinie VDI 3807 Blatt 1 witterungsbereinigt. Die Berechnung der Gradtagzahlen GTZ beruht hierbei mit einer Rauminnentemperatur von 20 °C und einer Heizgrenztemperatur von 15 °C auf VDI 2067 Blatt 1. Die für die Auswertung benötigten GTZ sind gemeinsam mit den zugehörigen Heiztagen in Tabelle 19 angeführt. Die Daten beziehen sich auf die Wetterstation Düsseldorf und wurden einer vom Institut Wohnen und Umwelt (IWU) zur Verfügung gestellten Datenbasis [16] entnommen. Das zehnjährige Mittel der Gradtagzahl \overline{GTZ} bezieht sich auf den Zeitraum zwischen dem Jahr 2005 und 2014. Die angegebenen Daten für den Zeitraum von August 2014 bis Juli 2015 dienen der Witterungsbereinigung der in diesem Intervall gemessenen Wärmemengen.

Tabelle 19: Gradtagzahlen und Heiztage nach VDI 2067 Blatt 1 für den Standort Düsseldorf. Die Daten sind der IWU-Datenbank [16] entnommen. Das zehnjährige Mittel bezieht sich auf den Zeitraum zwischen dem Jahr 2005 und 2014.

Jahr	2009	2010	2011	2012	2013	2014	08/2014 - 07/2015	10-jähriges Mittel
GTZ	3142	3668	2867	3201	3425	2711	3081	3.116
Heiztage	249	256	239	251	259	248	258	248

In Abbildung 61 sind die Ergebnisse der berechneten Jahresnutzungsgrade der Altanlagen in Abhängigkeit von ihrem Alter dargestellt. Die Analyse der Heizungsanlagen ist hierbei nicht in Abhängigkeit von der Technologie erfolgt, sondern nach Energieträgerform des benötigten Brennstoffs. Teilabbildung (a) zeigt hierbei die Auswertung der Heizungsanlagen, die mit Erdgas betrieben wurden. Die bestimmten Jahresnutzungsgrade (blaue Punkte) wurden mit einer exponentiell abfallenden Fitfunktion angenähert. Die Fitfunktion dient der Bestimmung des altersabhängigen Jahresnutzungsgrads von Altanlagen, die keine plausible Datengrundlage aufweisen. Eine nicht plausible Datengrundlage ergibt sich, wenn z. B. die gemessene Wärmemenge nicht für ein Jahr vorliegt oder der berechnete Jahresnutzungsgrad durch eine Veränderung in der Wohnstruktur (z. B. Anzahl der Bewohner) verfälscht wird. Die Analyse der Nutzungsgrade für die Energieträgerformen Kohle und Öl sind in Abbildung 61 (b) zusammengefasst. Die Anzahl von substituierten Kohle und Öl Anlagen ist deutlich geringer als die von Erdgas betriebenen Anlagen, sodass die Datenlage entsprechend geringer ausfällt. Die Auswertung der plausiblen Daten für die Energieträgerformen Kohle und Öl zeigt, dass die berechneten Jahresnutzungsgrade innerhalb der jeweiligen Energieformen geringfügig voneinander abweichen. Folglich sind die Nutzungsgrade der Kohle- und Öl-basierten Heizsysteme für die jeweilige Energieträgerform annähernd konstant und es besteht keine Altersabhängigkeit des Jahresnutzungsgrads. Dies liegt darin begründet, dass die im Projekt ersetzten Kohle- und Öl-basierten Heizsysteme eine Altersstruktur vorweisen, in der die technologischen Veränderungen (im Vergleich zu Erdgas betriebenen Anlagen) minimal sind. Für die weiteren Analysen werden für die Jahresnutzungsgrade von Öl- und Kohle-Heizungsanlagen die jeweiligen ermittelten Mittelwerte angesetzt. Für Kohle-Anlagen ergibt sich somit ein

Jahresnutzungsgrad von 41 % und für Öl-Anlagen ein Wert von 78 %. Die Mittelung über die bestimmten Nutzungsgrade besitzt den Vorteil, dass sich mögliche Schwankungen bei den Angaben des jährlichen Brennstoffbedarfs ausgleichen. So können die Bezugsangaben für die Energieträgerformen Öl und Kohle nicht annähernd so exakt sein, wie es bei einer jährlichen Erdgas-Abrechnung der Fall ist.

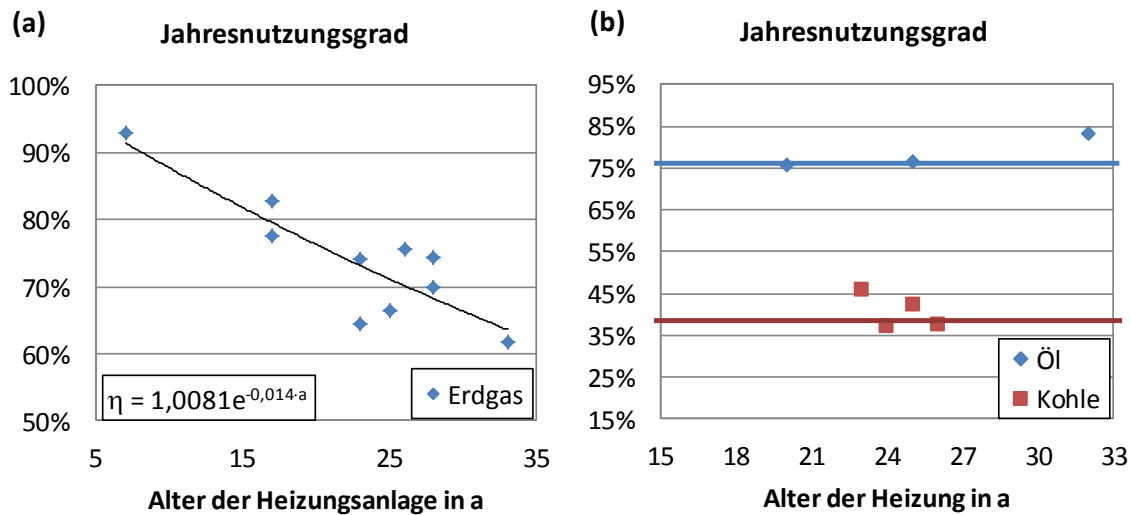


Abbildung 61: Ermittlung der Jahresnutzungsgrade der zuvor installierten Heizungsanlagen in Abhängigkeit von dem Alter. Die Analyse der Heizungsanlagen ist nicht in Abhängigkeit von der Technologie erfolgt, sondern nach Energieträgerform des benötigten Brennstoffs. (a) für Erdgas betriebene Anlagen weisen die ausgewerteten Daten (blaue Punkte) eine Alters-Abhängigkeit des Nutzungsgrads auf, die für die folgenden Analysen mit der dargestellten Exponentialfunktion beschrieben wird. (b) zeigt die Analyse der (blau) Öl- und (rot) Kohle-Anlagen. Beide Auswertungen lassen auf eine Alters-Unabhängigkeit der Jahresnutzungsgrade schließen, sodass für weitere Berechnungen die Mittelwerte genutzt werden. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Messtechnische Erfassung des KWK-Stroms

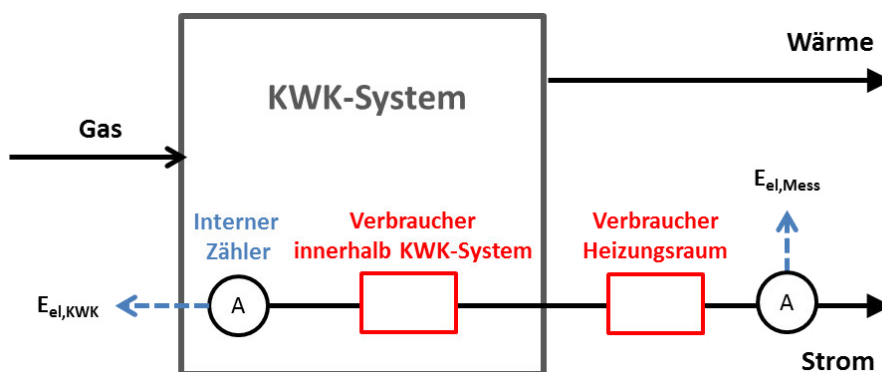


Abbildung 62: Schematische Darstellung der Messtechnik zur Erfassung der vom KWK-System generierten elektrischen Energie. Die Messung der elektrischen Energie $E_{el,Mess}$ ist so ausgelegt, dass sie alle elektrischen Verbraucher des Heizungsraumes beinhaltet. Die Messanordnung wurde so gewählt, um die elektrische Energie unabhängig von den variierenden Verbrauchern innerhalb des jeweiligen KWK-Systems zu erfassen. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Die vom KWK-System generierte elektrische Energie $E_{el,KWK}$ wird messtechnisch nicht direkt erfasst. Die Messtechnik ist, wie in Abbildung 62 schematisch dargestellt, in der Form installiert, dass die gemessene elektrische Energie $E_{el,Mess}$ gegenüber der vom KWK-System generierten Energie $E_{el,KWK}$ um interne Verbraucher im Heizungsraum reduziert wird. Hierbei umfassen die sogenannten internen Verbraucher alle elektrischen Verbraucher im jeweiligen Raum, die für den Betrieb des Heizungssystems benötigt werden (Pumpen, Mischer, etc.). Zu den internen Verbrauchern gehören auch elektrische Verbraucher innerhalb des KWK-Systems (interne Pumpen, etc.), die sich für die verschiedenen KWK-Modelle im Projekt unterscheiden. Um die Messung der generierten elektrischen Energie unabhängig von den angeschlossenen Verbrauchern innerhalb des jeweiligen KWK-Systems zu erfassen, wurden in die messtechnische Erfassung von $E_{el,Mess}$ die elektrischen Verbraucher des gesamten Heizungsraumes integriert.

Für die ökologische sowie ökonomische Bilanzierung der Systeme ist die vom jeweiligen KWK-System generierte elektrische Energie $E_{el,KWK}$ entscheidend. Um diese zu ermitteln, werden die im Projekt gemessenen elektrischen Energien bzw. Leistungen den Nennleistungen der jeweiligen KWK-Anlage gegenübergestellt. Es ist zu berücksichtigen, dass einige KWK-Modelle in der Lage sind die bereitgestellte Leistung an den Bezugsbedarf anzupassen⁸. Um die Leistungsmodulation der Systeme in die Ermittlung von $E_{el,KWK}$ miteinbeziehen zu können, haben die jeweiligen Hersteller unter der Bedingung einer Geheimhaltungsklausel Kennlinien zu Ihren System zur Verfügung gestellt. Mittels dieser Kennlinien ist es möglich aus einer anderen Messgröße (z. B. thermische Leistung) die vom KWK-System generierte elektrische Leistung abzuleiten. Für diese Analyse wird auf die Messdaten der instantanen Zähler zurückgegriffen, um das dynamische Verhalten der internen Verbraucher zu erfassen.

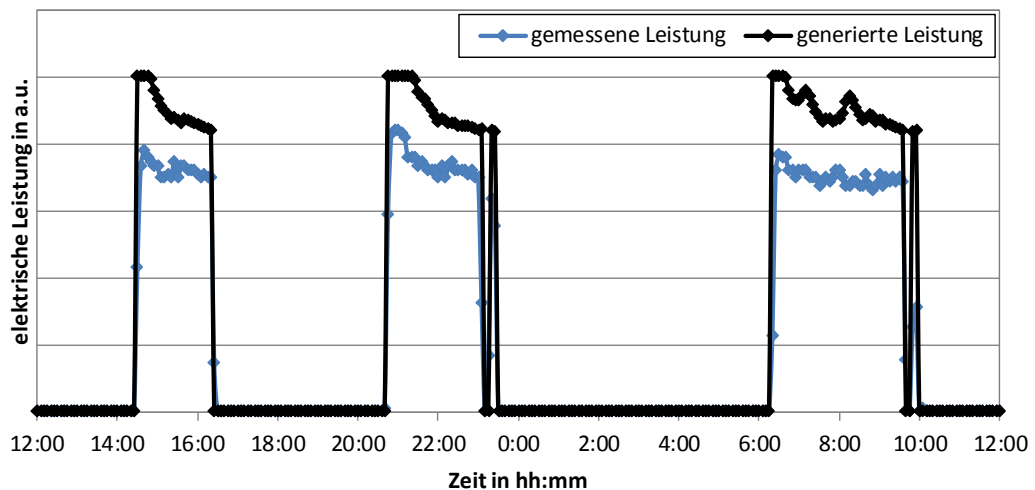


Abbildung 63: Anpassung der (blau) gemessenen elektrischen Leistung an die vom KWK-System (schwarz) generierten Leistung. Um keine Rückschlüsse auf das KWK-System bzw. den Hersteller zu zulassen, ist auf der Ordinatensachse die elektrische Leistung ohne explizite Werte und in willkürlicher Einheit aufgetragen. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

⁸ Die Auslegung der KWK-Systeme basiert auf einen wärmegeführten Betrieb. Da die Bereitstellung der elektrischen Leistung und der Wärme gekoppelt sind, modulieren beide Größen in Abhängigkeit von dem Wärmebedarf.

In Abbildung 63 ist beispielhaft für ein KWK-System der Vergleich zwischen der gemessenen und generierten elektrischen Leistung dargestellt. Um keine Rückschlüsse auf das KWK-System bzw. den Hersteller zu zulassen, ist auf der Ordinatennachse die elektrische Leistung ohne explizite Werte und in willkürlicher Einheit aufgetragen. Der Vergleich zwischen den beiden Graphen zeigt, dass die mittels der Kennlinie ermittelte generierte Leistung dem Verlauf der gemessenen Leistung folgt. Die Verläufe sind hierbei nicht identisch, da die Leistungsaufnahme der internen elektrischen Verbraucher⁹ betriebsbedingt variiert. Weiterhin verdeutlicht der Graph, dass die Leistungsbereitstellung des dargestellten KWK-Systems moduliert, um sich den Bezugsbedarf des Objekts anzupassen.

3.3.2 Ergebnisse der primärenergetischen Betrachtung

Die im Projekt erfassten Daten lassen zurzeit die Auswertung von 52 KWK-Systemen zu. Um die CO₂- und Primärenergieeinsparungen der 52 installierten Anlagen zu ermitteln, wurden die jeweiligen KWK-Systeme den zuvor installierten Heizungsanlagen sowie einer Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz gegenübergestellt. In der vorliegenden Analyse gilt es zu beachten, dass sich alle energiebezogenen Daten auf den Heizwert des jeweiligen Energieträgers beziehen. Dies liegt darin begründet, dass sich die Primärenergiefaktoren sowie die Angaben zu den spezifischen CO₂-Emissionen in der Literatur stets auf den Heizwert beziehen.

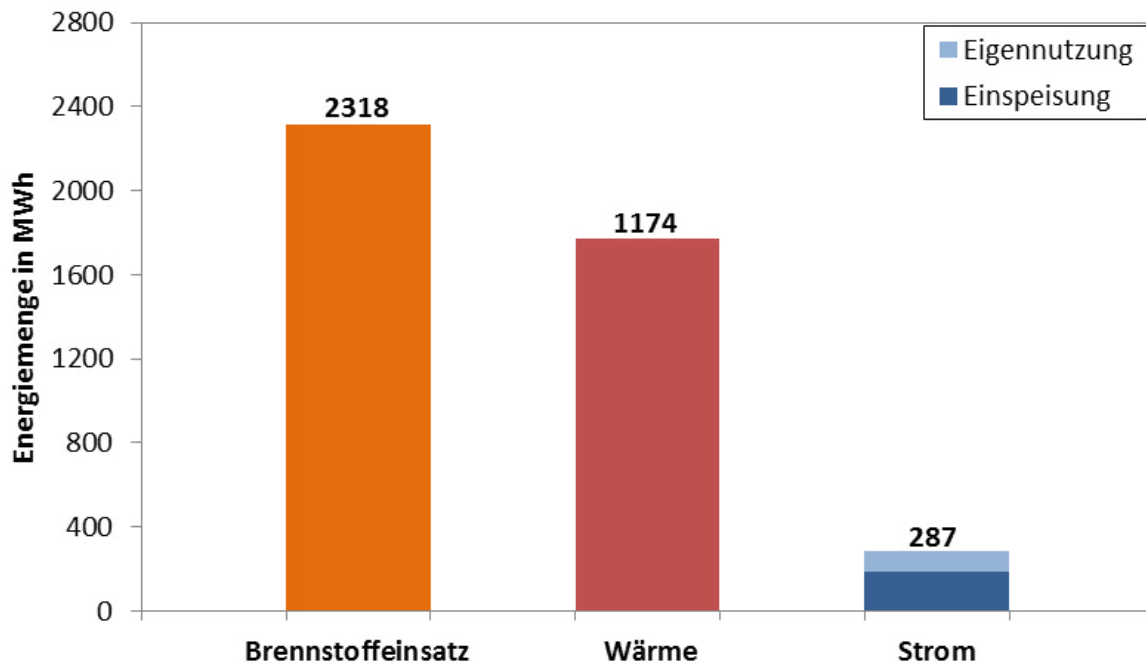


Abbildung 64: Bereitgestellte und bezogene Energiemengen der analysierten 52 KWK-Systeme während des Projektzeitraums (Inbetriebnahme der jeweiligen KWK-Anlage bis Bilanzende 30.09.15). Die KWK-Systeme haben insgesamt 2.318 MWh Erdgas (Heizwert) bezogen und die Wärme von 1.174 MWh sowie die Strommenge von 287 MWh bereitgestellt. Von der bereitgestellten elektrischen Energie wurden 37 % für die Eigenbedarfsdeckung verwendet und die restlichen 182 MWh ins öffentliche Netz eingespeist.

⁹ Die Leistungsaufnahme der internen Verbraucher entspricht der Differenz der beiden Graphen.

Die im Rahmen des Projekts installierten KWK-Anlagen haben Heizungsanlagen ersetzt, die mit Erdgas, Flüssiggas, Kohle, Heizöl und Strom betrieben wurden. Die Verteilung der 52 analysierten Altanlagen teilt sich in 38 Erdgas-, 10 Öl- und 4 Kohle-Heizungsanlagen auf. Bezüglich der eingesetzten KWK-Systeme sind bis auf Brennstoffzellen betriebene KWK-Systeme alle im Projekt vertretenen Technologien enthalten. Hierbei handelt es sich um 22 Otto- und 25 Stirling-Motor betriebene KWK-Systeme mit einer elektrischen Nennleistung von 1 kW sowie 5 Ottomotor betriebene KWK-Anlagen mit 4,7 kW.

In Abbildung 64 sind die Energiemengen dargestellt, die die 52 KWK-Systeme im Rahmen des untersuchten Projektzeitraums bezogen und bereitgestellt haben. Der Bilanzierungszeitraum bezieht sich, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, auf das Zeitintervall zwischen der Inbetriebnahme der jeweiligen KWK-Anlage und dem Bilanzierungsende vom 30.09.2015. Dies bedeutet, dass die hier angeführten Energiemengen sich nicht auf das übliche Intervall von einem Jahr beziehen, sondern auf die erfassten Mengen während des gesamten Projektzeitraums. Eine Analyse bezüglich erfasster Jahresdaten folgt im Kapitel 3.3.7, sodass die Potenziale bezüglich der CO₂- und Primärenergieeinsparung durch den Einsatz von KWK-Systemen auf verschiedenen Betrachtungsebenen (Bund, NRW, etc.) übertragen und ermittelt werden können.

Innerhalb des Projektzeitraums haben die untersuchten KWK-Anlagen 2318 MWh Erdgas bezogen und hierbei die Wärme von 1.174 MWh sowie die Strommenge von 287 MWh bereitgestellt. Von der bereitgestellten elektrischen Energie wurden 37 % für die Eigenbedarfsdeckung genutzt und die restlichen 182 MWh ins öffentliche Netz eingespeist.

Die bereitgestellten und bezogenen Energiemengen der KWK-Anlagen bestimmen die erzielten CO₂- und Primärenergieeinsparungen, sodass in der vorliegenden Analyse die Bilanzgrenze direkt um das jeweilige betrachtete KWK-System gezogen wurde und nicht um die jeweilige Gebäudehülle (siehe Kapitel 3.3.1). Die CO₂-Emissionen bzw. eingesetzten Primärenergien für die zuvor genutzten konventionellen Energieversorgungssysteme ergeben sich somit durch die Projektion der bereitgestellten KWK-Energiemengen aus Abbildung 64 auf die jeweils ersetzte Heizungsanlage und der Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz (siehe Abbildung 60). Für die eingesetzten KWK-Systeme sind hingegen die CO₂-Emissionen sowie der Primärenergieeinsatz direkt durch den Erdgasbezug aus Abbildung 64 gegeben.

Die Ergebnisse zur Bilanzierung der eingesetzten KWK-Systeme und der zuvor konventionell genutzten Energieversorgungssysteme bezüglich der aufgebrachten Primärenergien sind in Abbildung 65 zusammengefasst. Für die Berechnung wurden die Primärenergiefaktoren aus Tabelle 20 angesetzt [17].

Tabelle 20: Primärenergiefaktoren für die eingesetzten Energieträgerformen im Projekt [4]

Energieträgerform	Primärenergiefaktor
Strommix - Bund	2,67
Erdgas	1,13
Kohle	1,06
Öl	1,16

In der dargestellten Analyse ist der Primärenergieeinsatz der KWK-Systeme und der zuvor genutzten konventionellen Versorgungssysteme in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform zur Wärmebereitstellung angefügt. Die erzielten Primärenergieeinsparungen für alle 52 Systeme sind im linken Säulendiagramm zusammengefasst. Für die konventionellen Versorgungssysteme ist in den jeweiligen Diagrammen der Primärenergieeinsatz farblich dekodiert, der für die Strom- und Wärmebereitstellung aufgewendet wurde. Die angefügte Stromkorrektur in den Diagrammen bezieht sich auf die Korrektur bezüglich der messtechnischen Erfassung des generierten KWK-Stroms und ist detailliert in Kapitel 3.3.1 beschrieben.

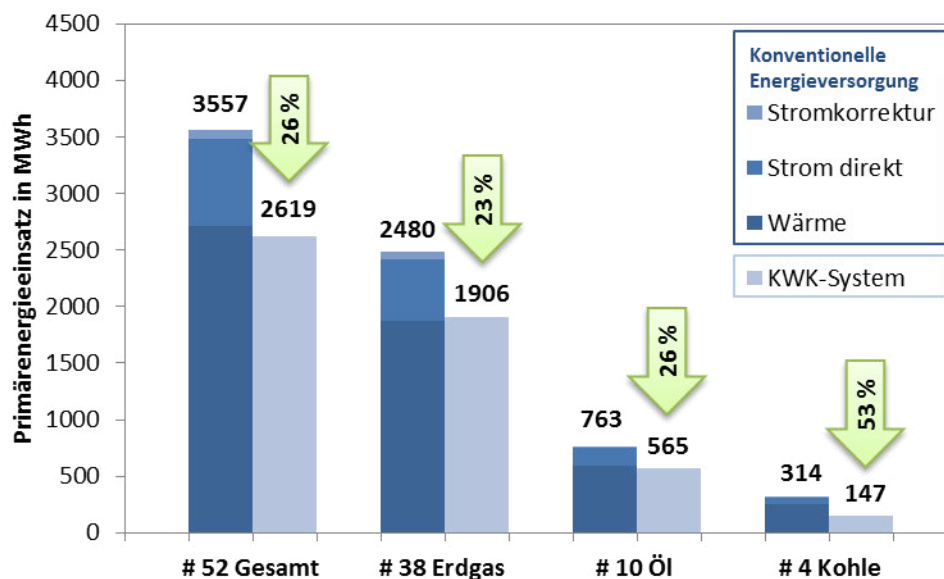


Abbildung 65: Gegenüberstellung der eingesetzten Primärenergien der KWK-Systeme und der ersetzten konventionellen Strom- und Wärmeversorgungssysteme. Für die Bilanzierung der konventionellen Stromversorgung wurde der deutsche Strommix als Brechungsgrundlage angesetzt. Die Daten beziehen sich auf die eingesetzte Primärenergie von insgesamt 52 KWK-Systemen, die die Systeme seit ihrer Inbetriebnahme bezogen haben. Die bilanzierten KWK-Systeme haben in diesem Projekt 38 Erdgas-, 10 Öl- und 4 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt.

Die Analyse zeigt, dass der Primärenergieeinsatz zur Wärmebereitstellung bei der konventionellen Energieversorgung für alle Energieträgerformen dominiert. Dies ist bei der Betrachtung der bereitgestellten Energiemengen der 52 KWK-Systeme aus Abbildung 64 nicht verwunderlich. So werden bei der gekoppelten Energiebereitstellung der 52 KWK-Anlagen ca. 86 % der gesamten generierten Energie in Form von Wärme bereitgestellt und nur 14 % in Form von elektrischer Energie.

Der Vergleich der KWK-Systeme mit der zuvor genutzten konventionellen Energiebereitstellung zeigt, dass durch die Installation der 52 KWK-Anlagen insgesamt eine Primärenergieeinsparung von 26 % erzielt werden konnte. Die höchste Einsparung mit 53 % wird für die Energieträgerform Kohle erreicht. Dieses hohe Ersparnis resultiert einerseits durch den Wechsel der Energieform (Kohle zu Erdgas) und andererseits durch den Austausch von Altanlagen mit geringen Nutzungsgraden (siehe Abbildung 61) durch hocheffiziente KWK-Systeme. In Bezug auf die Energieträger Erdgas und Heizöl liegen die Einsparungen bei 23 % bzw. 26 %. Es zeigt sich somit, dass selbst innerhalb der Energieträgerform Erdgas durch den Einsatz hoch-

effizienter KWK-Systeme ein hohes Einsparungspotenzial von rund einem Viertel besteht. Insgesamt zeigt die Analyse, dass gerade durch die Substitution von alten Kohlekesseln enorme Primärenergieeinsparungen erzielt werden.

3.3.3 Ergebnisse der CO₂-emissionsbilanzierenden Bewertung

Die Bestimmung der emittierten CO₂-Emissionen der 52 KWK-Anlagen und der zuvor genutzten konventionellen Energieversorgungssysteme beruht, wie die Ermittlung der Primärenergie, auf den bezogenen und bereitgestellten Endenergiemengen der KWK-Anlagen aus Abbildung 64. Für die vorliegenden Berechnungen wurden die spezifischen CO₂-Emissionen aus Tabelle 21 [17] angewendet.

Tabelle 21: Spezifische CO₂-Emissionen für die eingesetzten Energieträgerformen im Projekt [17]

Energieträgerform	Spezifische CO ₂ -Emission
Strommix - Bund	617 g/kWh
Erdgas	241 g/kWh
Kohle	427 g/kWh
Öl	313 g/kWh

In Abbildung 66 sind die Ergebnisse der CO₂-Bilanzierung für die 52 analysierten KWK-Systeme und die zuvor genutzten konventionellen Energieversorgungssysteme zusammengefasst. Analog zur Darstellung der Primärenergieeinsparungen aus Abbildung 65 sind für die konventionelle Energiebereitstellung die Anteile der Wärme, Strombereitstellung und der Stromkorrektur an den CO₂-Emissionen farblich in den Säulendiagrammen dekodiert.

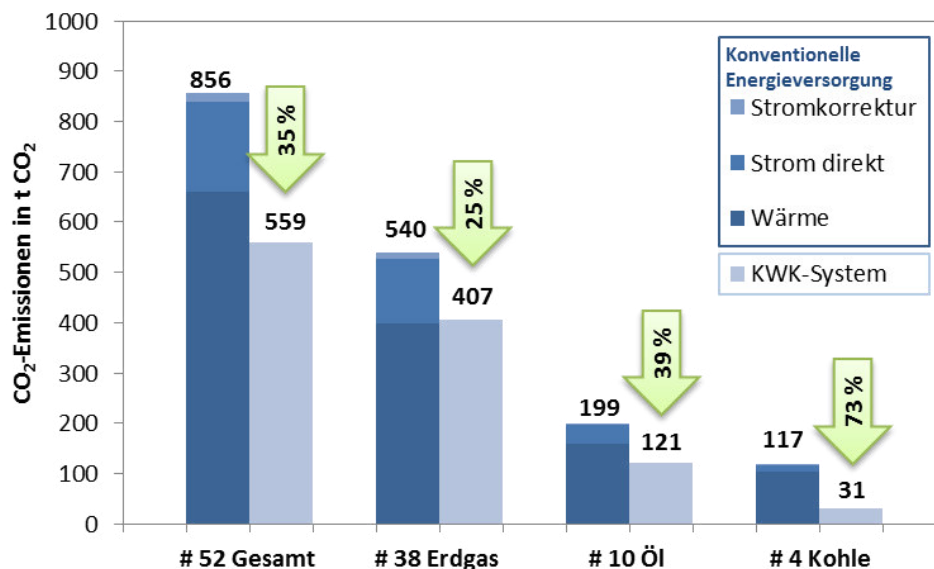


Abbildung 66: Gegenüberstellung der ausgestoßenen CO₂-Emissionen der KWK-Systeme und der ersetzten konventionellen Strom- und Wärmeversorgungssysteme. Für die Bilanzierung der konventionellen Stromversorgung wurde der deutsche Strommix als Brechungsgrundlage angesetzt. Die Daten beziehen sich auf die eingesetzte Endenergie von insgesamt 52 KWK-Systemen, die die Systeme seit ihrer Inbetriebnahme ausgestoßen haben. Die bilanzierten KWK-Systeme haben in diesem Projekt 38 Erdgas-, 10 Öl- und 4 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt.

Die Analyse zeigt, dass im Rahmen des Projekts durch die Installation der ausgewerteten KWK-Anlagen ca. 300 t CO₂ eingespart wurden. Dies entspricht in der um das KWK-System gezogenen Bilanzgrenze (siehe Abbildung 59) einer Ersparnis von 35 %. Die höchsten prozentualen Einsparungen werden durch das Ersetzen von Kohle-Heizkessel erreicht. In diesem Fall liegen die Einsparungen bei 73 %. Der Vergleich der spezifischen CO₂-Emissionen für die Energieträger Erdgas (241 g/kWh) und Kohle (427 g/kWh) aus Tabelle 21 zeigt, dass die Einsparungen einerseits auf den Wechsel der Energieträgerform zurückzuführen sind. Andererseits wird aus Tabelle 21 auch ersichtlich, dass die gekoppelte KWK-Bereitstellung von Wärme und Strom einen zusätzlichen und wesentlichen Anteil an den Einsparungen besitzt. So ist die spezifische CO₂-Emission des deutschen Strommix mit einer Ausstoßrate von 617 g/kWh um das 2,5-fache größer als die von Erdgas. Das Einsparungspotenzial durch die gekoppelte Energiebereitstellung von hocheffizienten KWK-Systemen lässt sich direkt aus der Bilanzierung des Energieträgers Erdgas aus Abbildung 66 ableiten. Die Analyse zeigt, dass die CO₂-Emissionen der KWK-Systeme im Vergleich zur Wärmebereitstellung mittels der zuvor installierten Erdgas-Heizkessel geringfügig höher ist. Durch die Hinzunahme der Strombereitstellung in der Bilanz und somit des Prozesses der gekoppelten Energiebereitstellung von KWK-Systemen wird aus der geringfügig erhöhten Emission eine wesentliche CO₂-Einsparung von 25 %. Weiterhin zeigt die CO₂-Bilanzierung auf, dass nicht nur die Substitution von alten Kohle-Heizkesseln ein besonderes Einsparungspotenzial darstellt, sondern auch die von Heizöl-Kesseln. So weist die Bilanzierung dieser Energieform eine Einsparung von 39 % auf.

Für die Bilanzierung der beiden Systeme ist die Betrachtungsebene entscheidend. Zu Verdeutlichung dieser Gegebenheit ist in Abbildung 67 der Einfluss der Betrachtungsebene auf die Berechnung der CO₂-Emissionen in einer georeferenzierten Darstellung grafisch veranschaulicht [18]. Der georeferenzierte Datensatz zeigt auf Landesebene die Verteilung der elektrischen Netto-Nennleistung (farblich kodiert von Weiß 0 MW bis Magenta 50.000 MW). Des Weiteren wird durch die eingefügten Kreisdiagramme die Gewichtung der jeweiligen Netto-Leistungen bezüglich der Bereitstellung durch erneuerbare und konventionelle Energien dargestellt. Bezogen auf das Projektgebiet InnovationCity Ruhr wird deutlich, dass in NRW die größte elektrische Netto-Leistung zur Verfügung steht. Allerdings wird diese Leistung zum größten Teil durch fossile Kraftwerke, wie z. B. Kohlekraftwerke, bereitgestellt. Dies hat zur Folge, dass der Strommix auf der Betrachtungsebene NRW mit wesentlich höheren CO₂-Emissionen verbunden ist als auf Bundesebene (Strommix Bund). So beträgt die spezifische CO₂-Emission für den deutschen Strommix 617 gCO₂/kWh [17] und für den Strommix in NRW 857 gCO₂/kWh [19].

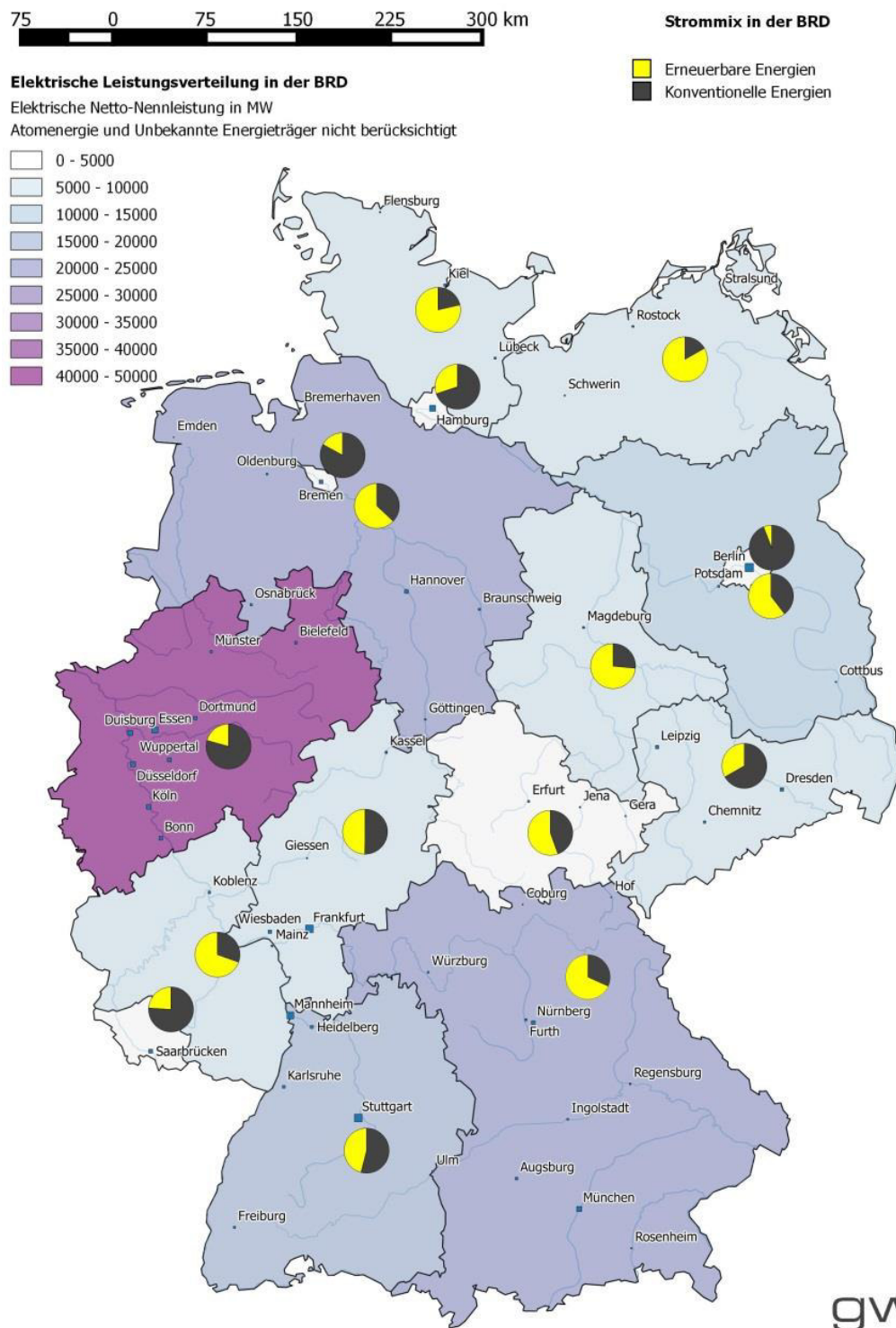


Abbildung 67: Georeferenzierte elektrische Netto-Nennleistungsverteilung in BRD [18].

Nimmt man in der Bilanzierung an, dass die im Projektgebiet installierten Anlagen den Strommix in NRW verdrängen, ergibt sich für das ersetzte konventionelle Energieversorgungssystem eine neue Berechnungsgrundlage. Der Einfluss der erhöhten spezifischen CO₂-Emissionen für den Strommix im Projektgebiet ist in Abbildung 68 dargestellt. In den Säulendiagrammen sind die im Projektzeitraum erzielten CO₂-Einsparungen für die Betrachtungsebene NRW und Gesamtdeutschland zusammengefasst.

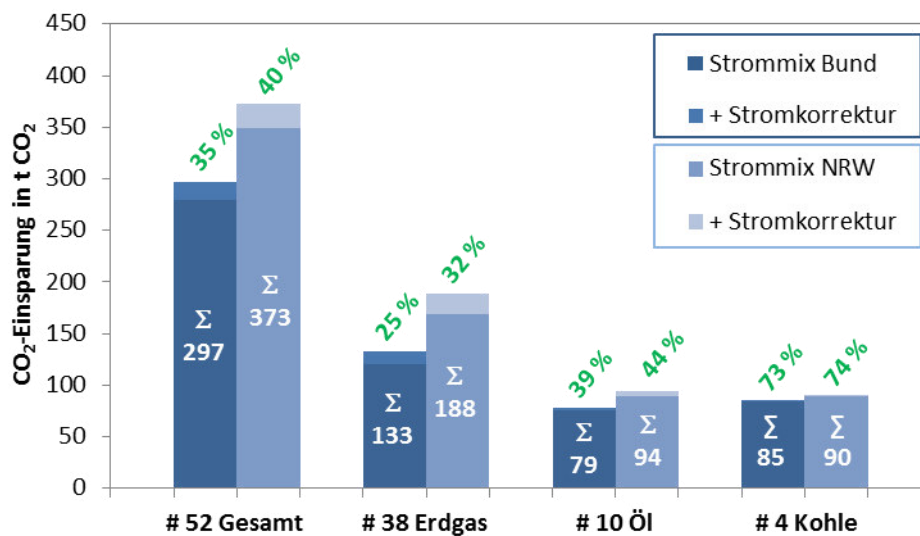


Abbildung 68: CO₂-Einsparung der 52 analysierten KWK-Anlagen gegenüber der zuvor installierten konventionellen Energieversorgung während des Projektzeitraums. In dem Diagramm ist der deutsche Strommix dem in NRW gegenübergestellt.

Der Vergleich zwischen den Betrachtungsebenen zeigt, dass eine Verdrängung des Strommix in NRW durch generierten KWK-Strom mit deutlich höheren CO₂-Einsparungen verknüpft ist als auf Bundesebene. Bezogen auf alle 52 ersetzte Systeme erhöht sich die CO₂-Einsparung von 35 % auf 40 %. Dies bedeutet in absoluten Zahlen, dass die 52 KWK-Systeme im Projektzeitraum bezogen auf den Strommix in NRW 373 t CO₂ einsparen konnten.

3.3.4 Berechnungsverfahren zur ökonomischen Bilanzierung

Für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit von gebäudetechnischen Anlagen existiert mit der Richtlinie VDI 2067 [7] eine anerkannte Berechnungsgrundlage, die in der zugrundeliegenden Auswertung angewendet wird. Das Berechnungsverfahren in dieser Richtlinie basiert auf die Annuitätenmethode und stellt ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung dar.

An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der Begriff Investition bei einer Betrachtung der häuslichen Energiebedarfsdeckung nicht mit gewinnbringenden Rückflüssen verknüpft ist. So ist die Eigenbedarfsdeckung im häuslichen Sektor stets mit Kosten verbunden. Folglich ist bei einer Gegenüberstellung von verschiedenen Energieversorgungssystemen zur Eigenbedarfsdeckung das System von wirtschaftlichem Vorteil, dass die geringsten Kosten hervorruft. Die anfallenden Kosten werden bei der Annuitätsmethode in der sogenannten Gesamtannuität A_N zusammengefasst. Sie setzt sich aus den erzielten Erlösen $A_{N,E}$ sowie den kapitalgebundenen $A_{N,K}$, bedarfsgebundenen $A_{N,V}$, betriebsgebundenen $A_{N,B}$ und sonstigen Kosten $A_{N,S}$ zusammen:

$$A_N = A_{N,E} - (A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S}) \quad (3-4)$$

Die Gesamtannuität teilt im betrachteten Fall die entstehenden Kosten für einen gewählten Betrachtungszeitraum T in jährliche Zahlungen konstanter Höhe auf und berücksichtigt hierbei die Zeitpunkte der Zahlungen in Form von Zinsen und Inflation.

Kapitalgebundene Kosten

Die kapitalgebundenen Kosten berücksichtigen alle Investitionen, die getätigt werden müssen, um die betrachteten Energieversorgungssysteme (Heizungsanlage, Stromversorgung, etc.) in das jeweilige Objekt zu integrieren [7, Sec. 7.1]. Hierbei ist zu beachten, ob es sich bei dem betrachteten Objekt um einen Neubau oder ein bestehendes Gebäude handelt. So entfallen bei bestehenden Objekten z. B. die Kosten für eine Reihe von baulichen Anlagenteilen wie dem Warmwasser- oder Wärmeverteilungssystem.

In dem vorliegenden Fall wurden im Projektgebiet InnovationCity bestehende Heizungsanlagen durch KWK-Systeme ersetzt, sodass die benötigte Gebäudestruktur in Form eines Heizraums mit entsprechenden Verteilungsnetzen in einem Großteil aller Objekte – zwei Objekte wurden von strombasierten Heizungssystemen auf wassergeführte Heizsysteme umgerüstet – bereits bestand. Aufgrund dessen gehen in der vorliegenden Analyse nur die Installations- und Anschaffungskosten des jeweiligen Versorgungssystems als Investitionsbetrag A_0 in die Berechnung der kapitalgebundenen Kosten ein. Dieser Betrag erhöht sich jedoch um die Kosten für die Errichtung eines Erdgas-Hausanschlusses, falls die zuvor installierte Heizungsanlage eine abweichende Energieträgerform als Brennstoff genutzt hat.

Das Berechnungsverfahren nach VDI 2067 berücksichtigt in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer T_N der betrachteten Anlagenkomponenten¹⁰ und dem gewählten Betrachtungszeitraum T die erforderlichen Ersatzbeschaffungen sowie den Restwert dieser Komponenten. Die Annuität der kapitalgebundenen Kosten $A_{N,K}$ ergibt sich zu:

$$A_{N,K} = (A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_N - R_W) \cdot a \quad (3-5)$$

mit	A_0	Investitionsbetrag in €
	A_i mit $i = 1, 2, \dots, N$	Barwert der i -ten Ersatzbeschaffung in €
	R_W	Restwert in €
	a	Annuitätsfaktor

Ersatzbeschaffungen sind erforderlich, wenn der Betrachtungszeitraum größer ist als die Nutzungsdauer der jeweiligen Anlagenkomponenten. Ihr Barwert ist abhängig von der Nutzungsdauer T_N , dem angesetzten Zinsfaktor q und dem Preisänderungsfaktor r . Für den Barwert der i -ten Ersatzbeschaffung gilt:

$$A_i = A_0 \cdot \frac{r^{(i \cdot T_N)}}{q^{(i \cdot T_N)}} \quad (3-6)$$

$$\text{mit } r = 1 + \frac{s}{100}; \quad s: \text{Preisänderungssatz in \%}$$

$$q = 1 + \frac{p}{100}; \quad p: \text{Zinssatz in \%}$$

Der Restwert der Anlagen wird durch lineare Abschreibung des Investitionsbetrages bis zum Ende des Betrachtungszeitraums T und der Abzinsung auf Beginn dieses Zeitraumes bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass bei einer Überschreitung der Nutzungsdauer T_N der be-

¹⁰ Das KWK-System bestehend aus KWK-Anlage, Zusatzheizgerät und Wärmespeicher wird als komplettes Modul angeboten und geht in die Berechnung als zusammengefasste Einzelkomponente ein.

trachteten Anlagenkomponente nicht der Investitionsbetrag A_0 abgeschrieben wird, sondern die jeweilige Ersatzbeschaffung i . Für den Restwert der Anlagenkomponente gilt:

$$R_W = A_0 \cdot r^{(i \cdot T_N)} \cdot \frac{(n+1) \cdot T_N - T}{T_N} \cdot \frac{1}{q^T} \quad (3-7)$$

In Gleichung (3-5) werden die berechneten Barwerte mittels des Annuitätsfaktors a für den gewählten Betrachtungszeitraum T in jährliche Zahlungen konstanter Höhe aufgeteilt. Der Annuitätsfaktor ergibt sich zu:

$$a = \frac{q - 1}{1 - q^{-T}} \quad (3-8)$$

Bedarfsgebundene Kosten

Bedarfsgebundene Kosten beinhalten nach VDI 2067 die jährlichen Energiekosten, die durch das betrachtete System entstehen. Umfasst die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nur Anlagenkomponenten zur reinen Wärmeerzeugung, ist es ausreichend nur die Wärmegestehungskosten in die Bilanzierung eingehen zu lassen. Im vorliegenden Projekt wurden alte Heizkessel durch innovative KWK-Systeme ersetzt. Folglich wird durch die Umstellung der Technologien nicht nur Wärme bereitgestellt, sondern auch elektrische Energie. Aufgrund dessen werden in der ökonomischen Analyse neben den Wärmegestehungskosten auch die Stromgestehungskosten des betrachteten Objekts berücksichtigt.

Nach VDI 2067 werden die Gestehungskosten für das erste Betriebsjahr bestimmt. Änderungen der Energiepreise im Laufe des Betrachtungszeitraumes werden in der Berechnung mittels des sogenannten preisdynamischen Annuitätsfaktors angepasst. Im vorliegenden Fall ergibt sich die Annuität der bedarfsgebundenen Kosten $A_{N,V}$ zu:

$$A_{N,V} = Q_{Wärme} \cdot K_{Wärme} \cdot ba_{Wärme} + Q_{Strom} \cdot K_{Strom} \cdot ba_{Strom} \quad (3-9)$$

mit	$Q_{Wärme}$	Energieaufwand der Wärmebereitstellung in kWh/a
	Q_{Strom}	Stromaufwand in kWh/a
	$K_{Wärme}$	Preis für Energieträgerform zur Wärmebereitstellung in €/kWh
	K_{Strom}	Preis für Strombereitstellung in €/kWh
	$ba_{Wärme}$	dynamischer Annuitätsfaktor für die Wärmebereitstellung
	ba_{Strom}	dynamischer Annuitätsfaktor für die Strombereitstellung

Der preisdynamische Annuitätsfaktor wird in der Annuitätenmethode immer dann angewendet, wenn davon ausgegangen wird, dass sich die betrachteten Kosten während des Betrachtungszeitraums durch Preisänderungen des jeweiligen Produktes bzw. Dienstleistung ändern. Der preisdynamische Annuitätsfaktor ba ergibt sich allgemein, indem die Annuität des Barwertfaktors b bestimmt wird wobei der Index j für den jeweils betrachteten Kostenpunkt steht.

$$ba_j = b_j \cdot a = \begin{cases} \frac{T}{q_j} \cdot a, & \text{für } r_j = q_j \\ \frac{1 - \left(\frac{r_j}{q_j}\right)^T}{q_j - r_j} \cdot a, & \text{sonst} \end{cases} \quad (3-10)$$

Betriebsgebundene Kosten

Unter den betriebsgebundenen Kosten fallen nach VDI 2067 die Kosten für Instandhaltung und Bedienung der Anlage. Für die Leistungsklasse der hier betrachteten Systeme reduzieren sich die betriebsgebundenen Kosten auf die Instandhaltung. Unter die Instandhaltung der Anlage fallen im Wesentlichen die Kosten für die jährliche Wartung sowie Instandsetzung. Unter Vernachlässigung der Kosten für die Bedienung der Anlage, ergibt sich die Annuität der betriebsgebundenen Kosten $A_{N,B}$ zu:

$$A_{N,B} = A_0 \cdot (f_{Inst} \cdot ba_{Inst} + f_{W+Insp} \cdot ba_{W+Insp}), \quad (3-11)$$

wobei f_{Inst} und f_{W+Insp} die Faktoren für den Aufwand bei der Instandsetzung bzw. Wartung und Inspektion sind. Sollten die exakten Kosten für die Instandsetzung bzw. Wartung nicht bekannt sein, können die entsprechenden Faktoren genutzt werden um aus dem Investitionsbeitrag A_0 die Kosten abzuleiten. Die benötigten Faktoren für den entsprechenden Aufwand können dem Anhang der Richtlinie VDI 2067 Blatt 1 entnommen werden.

Sonstige Kosten

Zu den sonstigen Kosten werden alle zusätzlichen Kosten gerechnet, die bezüglich der betrachteten Anlage anfallen. Hierunter fallen z. B. die Kosten für Versicherungen, Steuern oder auch allgemeine Abgaben. Für KWK-Systeme können z. B. zusätzliche Kosten durch die Erhebung der EEG-Umlage für den selbstgenutzten Strom entstehen. Die Annuität der sonstigen Kosten $A_{N,S}$ werden für das erste Betriebsjahr zusammengefasst (A_{S1}) und Preisänderungen werden mittels des dynamischen Annuitätsfaktors ba_s berücksichtigt.

$$A_{N,S} = A_{S1} \cdot ba_s \quad (3-12)$$

Erlöse

In der Regel fallen bei der Eigenbedarfsdeckung bezüglich der Größen Wärme und Strom im privaten Sektor keine Erlöse an. Für KWK-System existieren jedoch Einnahmen durch staatliche Förderprogramme sowie der Einspeisung des generierten KWK-Stroms ins öffentliche Netz. Die Erlöse können sich in ihrer Zahlungsart in der Form unterscheiden, dass sie kontinuierlich anfallen oder nur einmalig ausgezahlt werden. Dieses ist in der Berechnung der Gesamtannuität zu berücksichtigen, indem die zuvor beschriebenen Berechnungsformeln entsprechend auf die jeweiligen Erlöse angewendet werden.

Bei einmaligen Einnahmen $A_{E,e}$, wie z. B. Investitionszuschüsse, berechnen sich die Annuität der Erlöse $A_{N,E}$ nach folgender Gleichung.

$$A_{N,E} = A_{E,e} \cdot a \quad (3-13)$$

Fallen hingegen kontinuierliche Einnahmen $A_{E,k}$ an, die sich im Laufe des Betrachtungszeitraumes ändern, gilt:

$$A_{N,E} = A_{E,k} \cdot ba_E \quad (3-14)$$

3.3.5 Übertragung des Berechnungsverfahrens

Werden KWK-Systeme in Wohngebäuden eingesetzt, ergeben sich bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu konventionellen Versorgungssystemen (Heizkessel und öffentliches Netz) zusätzliche Terme in der Berechnung. Die unterschiedlichen Zahlungsflüsse, die sich für beide Versorgungssysteme ergeben, sind in Abbildung 69 skizziert.

Für das konventionelle System existieren keine Zahlungen in Form von Erlösen. Bei allen Zahlungen handelt es sich um Kosten. Einerseits treten kapital- und betriebsgebundene Kosten für den eingesetzten Heizkessel auf. Auf der anderen Seite bestehen bedarfsgebundene Kosten für die Energieversorgung des Objekts. Die bedarfsgebundenen Kosten setzen sich aus Energiebezugskosten für den Strombedarf aus dem öffentlichen Netz und dem Brennstoffbezug zur Wärmebereitstellung mittels des eingesetzten Heizkessels zusammen.

Die Bilanz eines KWK-Systems enthält analog zum konventionellen System kapital- und betriebsgebundene Kosten, wobei Erlöse in Form von staatlichen Investitionszuschüssen die kapitalgebundenen Kosten reduzieren. Des Weiteren fallen für den Betrieb des KWK-Systems bedarfsgebundene Kosten für den Bezug des Erdgases an. Auch an dieser Stelle treten Erlöse durch eine Rückerstattung der Energiesteuer auf. Das KWK-System deckt nicht nur den Wärmebedarf des Gebäudes, sondern generiert bei dem gekoppelten Erzeugungsprozess zusätzlich Strom. Für den vom KWK-System bereitgestellten Strom entstehen Erlöse durch staatliche Förderung sowie die Veräußerung des nicht selbstgenutzten KWK-Stroms. Obwohl ein Teil des KWK-Stroms ins öffentliche Netz eingespeist wird, existieren Intervalle, in denen der Strombedarf des Gebäudes nicht durch die KWK-Anlage gedeckt wird. Für diese Intervalle fallen weitere bedarfsgebundene Kosten durch den Strombezug aus dem Netz an.

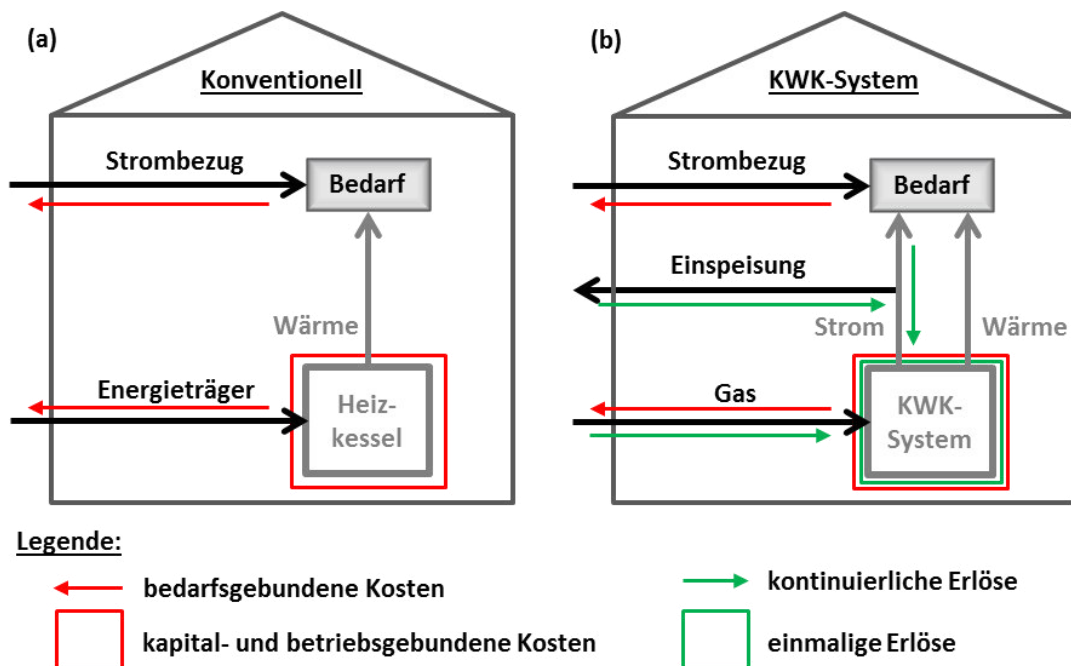


Abbildung 69: Schematische Darstellung der Zahlungsflüsse für (a) ein konventionelles Versorgungssystem und (b) für ein KWK-System. Im Gegensatz zur konventionellen Versorgung entstehen für ein KWK-System Erlöse durch staatliche Förderungen und die Veräußerung des eingespeisten KWK-Stroms. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Für eine transparente Analyse der beiden verschiedenen Versorgungssysteme nach VDI 2067 ist es entscheidend die jeweiligen Zahlungsflüsse und die hierzu gehörigen Parameter (z. B. Preisänderungssatz) im Detail darzustellen. Für Studien in Anlehnung an VDI 2067, die ihre Abweichungen und zugrunde gelegten Parameter nicht nachvollziehbar anführen, ist zu beachten, dass ihre Aussagekraft stark eingeschränkt ist. Im Folgenden werden die Berechnungsgrundlagen für die im Projekt eingesetzten KWK-Systeme und der zuvor genutzten Versorgungssysteme innerhalb der verschiedenen Kostengruppen aufgeschlüsselt. Bei allen angegebenen Preisen bzw. Kosten handelt es sich um Bruttopreise.

Kapitalgebundene Kosten

KWK-System

In diesem Projekt wurden die eingesetzten KWK-Systeme in vorhandene Gebäudestrukturen installiert, sodass in die kapitalgebundenen Kosten nur die Anschaffungs- und Installationskosten eingehen (siehe Abschnitt 3.3.4). In die ökonomische Betrachtung der KWK-Systeme fließen zusätzlich die Kosten für die Errichtung eines Erdgas-Hausanschlusses ein, falls die zuvor installierte Heizungsanlage eine abweichende Energieträgerform als Brennstoff genutzt hat. Die Kosten für den Anschluss an das Gasverteilungsnetz sind im Wesentlichen von der Entfernung zwischen dem Verteilernetz und dem anzuschließenden Objekt abhängig. Um die Bilanzierung eines Objekts nicht mit der spezifischen Entfernung zwischen dem Gasverteilungsnetz und den betrachteten Gebäude zu gewichten, wird für die Erschließungskosten ein mittlerer Preis von 2.000 € angesetzt. Hierdurch wird verhindert, dass besonders günstig liegende Objekte besser bewertet werden als ungünstig liegende Objekte.

In den Anschaffungskosten der KWK-Systeme werden die Kosten für das jeweilige KWK-Modul (KWK-Anlage und zusätzlich intergrierten Zusatzheizgerät) und den benötigten Wärmespeicher berücksichtigt. Im Rahmen des Projekts wurde die Anschaffung des KWK-Systems in der Form gefördert, dass die Kosten für die Teilnehmer unabhängig vom eingesetzten System bei 3.300 € lagen. Um die derzeitigen Marktgegebenheiten zu berücksichtigen, werden zusätzliche Berechnungen mit aktuellen Listenpreisen der eingesetzten KWK-Systeme durchgeführt. In Tabelle 22 sind die Anschaffungskosten zusammengefasst, die in die Bilanzierung eingehen.

Tabelle 22: Angesetzte Anschaffungskosten der KWK-Systeme (KWK-Anlage, Zusatzheizgerät und Wärmespeicher)

KWK-System	Anschaffungskosten
Projektpreis	3.300 €
EcoGen WGS 20.1	16.550 €
Vitotwin 300 W	16.248 €
Vitotwin 350-F	16.249 €
ecoPower 1.0	16.580 €
ecoPower 4.7	32.000 €
BlueGen Beta 2	42.364 €
BlueGen	34.986 €

Die Installationskosten wurden aus den Rechnungen der im Projekt eingesetzten KWK-Systeme abgeleitet. Es wurden alle Installateurs-Rechnungen bezüglich der Kosten für Material, Personal, Messtechnik, Demontage der Altanlage und außerordentlichen Serviceleistungen¹¹ analysiert, um projektspezifische Kosten zu filtern. In den hier angesetzten Installationskosten werden nur die Personal- und Materialkosten berücksichtigt. Die Kosten für die Demontage der zuvor installierten Heizungsanlagen werden nicht einbezogen, da diese gleichermaßen für alle Systeme bei einer Neuanschaffung anfallen. Als Berechnungsgrundlage für die Installationskosten wurden die Mittelwerte der berücksichtigten Kostenpunkte in Abhängigkeit von der Technologie und der elektrischen Leistung P_{el} ermittelt. Die Auswertung der Installationskosten sind in Tabelle 23 zusammengefasst.

Tabelle 23: Mittlere Installationskosten in Abhängigkeit von der Technologie und der elektrischen Leistung P_{el} . Für die Ermittlung der Kosten wurden alle Rechnungen der Installationen bezüglich der aufgelisteten Kostenpunkte analysiert, um projektspezifische Kosten herauszufiltern. Die angesetzten Installationskosten beinhalten nur Personal- und Materialkosten.

KWK-System	elektrische Leistung	Installationskosten
Stirling-Motor	1 kW	5.012 €
Ottomotor	1 kW	5.295 €
Ottomotor	4,7 kW	8.614 €
Brennstoffzelle	1,5 kW	4.278 €

In dem Berechnungsverfahren der kapitalgebundenen Kosten sind benötigte Ersatzbeschaffungen nach Erreichen der Nutzungsdauer sowie der Restwert der betrachteten Anlage implementiert (siehe Gleichung (3-5)). Beide Terme sind abhängig von dem angesetzten Betrachtungszeitraum und der Nutzungsdauer der jeweiligen Anlage (siehe Gleichung (3-6) und (3-7)). Für die vorliegende Bilanzierung der KWK-Systeme wird die Nutzungsdauer nach VDI 2067 auf 15 Jahre festgelegt. Des Weiteren werden Berechnungen mit einer Nutzungsdauer von 10 Jahren durchgeführt, um die Wirtschaftlichkeit der KWK-Systeme auch für kurze Lebensdauern analysieren zu können.

Altanlage – Zuvor installierter Heizkessel

Die im Projekt ersetzten Altanlagen haben zum größten Teil ihre ausgelegte Nutzungsdauer überschritten, sodass sie im wirtschaftlichen Sinne nach VDI 2067 vollständig abgeschrieben sind. Da weiterhin keine Ersatzbeschaffungen getätigt wurden, hat dies zur Folge, dass die kapitalgebundenen Kosten dieser Anlagen entfallen. Mit zunehmendem Alter der Anlagen ist jedoch davon auszugehen, dass die Anfälligkeit einzelner Anlagenkomponenten bezüglich der Instandhaltungsmaßnahmen steigt. Explizit nach Erreichen der Nutzungsdauer sollten die Kosten für die Instandhaltung der Anlage zunehmen. Aufgrund dessen wird in der Bilanzierung der Altanlagen unter der Kostengruppe betriebsgebundene Kosten ein zusätzlicher Term implementiert, der die erhöhten Kosten nach einer Überschreitung der Nutzungsdauer widerspiegelt.

¹¹ Unter diesen Aspekt fällt z. B. die gemeinsame Inbetriebnahme der Anlage mit dem GWI.

Ein anderer Fall besteht für ersetzte Altanlagen, die ausgetauscht wurden, obwohl sie ihre ausgelegte Nutzungsdauer noch nicht erreicht haben. Diese Anlagen sind noch nicht vollständig abgeschrieben, sodass in der Bilanzierung die Annuität der kapitalgebundenen Kosten berücksichtigt werden muss.

In Abbildung 70 sind beide Austauschszenarien schematisch in einem Zeitstrahl skizziert. Der erste Fall (Fall I) ist im oberen Teil des Zeitstrahls verdeutlicht. In diesem Fall wird die KWK-Anlage zu einem Zeitpunkt installiert, in dem die Altanlage ihre Nutzungsdauer bereits überschritten hat. Folglich ist die Altanlage im Betrachtungszeitraum der Bilanzierung vollständig abgeschrieben, sodass die kapitalgebundenen Kosten für das System entfallen. Um das erhöhte Risiko für Instandhaltungsmaßnahmen für den Betrieb nach dem Erreichen der Nutzungsdauer widerzuspiegeln, wird in der Berechnung ein zusätzlicher Term $A_{N,B}^T$ unter der Kostengruppe betriebsgebundene Kosten eingeführt. Die Gesamtannuität setzt sich in diesem Fall wie folgt zusammen.

$$A_N = A_{N,B}^T + A_{N,B} + A_{N,V} \quad (3-15)$$

Die Annuität der Instandhaltungskosten nach Erreichen der Nutzungsdauer $A_{N,B}^T$ basiert auf der Kostenberechnung der Instandhaltung innerhalb der Nutzungsdauer und wird innerhalb der Darstellung der betriebsgebundenen Kosten behandelt.

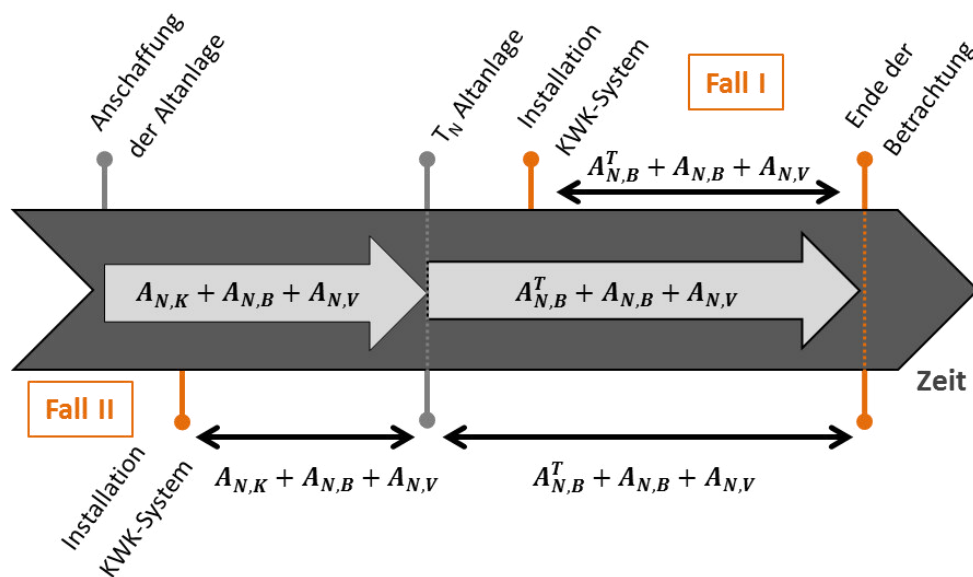


Abbildung 70: Schematische Darstellung der anfallenden Annuitäten bezüglich der Altanlage in Abhängigkeit von dem Inbetriebnahmezeitpunkt der KWK-Anlage. Es ergeben sich zwei Austauschszenarien in Abhängigkeit von dem Installationszeitpunkt. Im oberen Teil des Zeitstrahls (Fall I) findet die Installation des KWK-Systems nach dem Erreichen der Nutzungsdauer der betrachteten Altanlage statt. In diesem Fall ist die Altanlage vollständig abgeschrieben und in der Gesamtannuität entfallen die kapitalgebundenen Kosten. Um das erhöhte Risiko für Instandhaltungsmaßnahmen nach dem Erreichen der Nutzungsdauer zu berücksichtigen, wird in dem Berechnungsverfahren ein zusätzlicher Kostenpunkt $A_{N,B}^T$ implementiert. Für den zweiten Fall II (untere Bereich des Zahlenstrahls) wird die KWK-Anlage zum Zeitpunkt installiert, in dem die Nutzungsdauer der Altanlage noch nicht abgelaufen ist. Diese läuft jedoch innerhalb des Betrachtungszeitraums der Bilanzierung ab, sodass im Betrachtungszeitraum zwei Intervalle mit unterschiedlichen Gesamtannuitäten existieren. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Das zweite Austauschzenario ist in Abbildung 70 im unteren Bereich des Zeitstrahls dargestellt. In diesem Fall wird das KWK-System zum Zeitpunkt installiert, in dem die Nutzungsdauer der Altanlage noch nicht abgelaufen ist. Diese läuft jedoch innerhalb des Betrachtungszeitraums der Bilanzierung ab. Demnach existieren im Betrachtungszeitraum zwei Intervalle mit unterschiedlichen Gesamtannuitäten. Für das erste Intervall bestehen kapitalgebundene Kosten und für das zweite entfallen diese, wobei zusätzliche Instandhaltungskosten aufgrund der Überschreitung der Nutzungsdauer entstehen. Für Fall II ergibt sich die Gesamtannuität wie folgt.

$$A_N = \begin{cases} A_{N,K} + A_{N,B} + A_{N,V}, & t \leq T_N \text{ Altanlage} \\ A_{N,B}^T + A_{N,B} + A_{N,V}, & t > T_N \text{ Altanlage} \end{cases} \quad (3-16)$$

Die Nutzungsdauern T_N der Altanlagen ergeben sich in Abhängigkeit von der zugrundeliegenden Technologie und der jeweiligen Energieträgerform des eingesetzten Brennstoffs. Nach VDI 2067 Blatt 1 resultieren für die betrachteten Systeme folgende Nutzungsdauern T_N .

Tabelle 24: Nutzungsdauer der ersetzten Altanlagen in Abhängigkeit von der Energieträgerform des verwendeten Brennstoffs. Die Nutzungsdauern wurden nach VDI 2067 Blatt 1 angesetzt.

Altanlage – Energieträger	Nutzungsdauer in Jahren
Erdgas	18
Flüssiggas	20
Kohle	15
Heizöl	20
Strom	25

Für das zweite Austauschzenario im Projekt (Fall II in Abbildung 70) sind Investitionskosten für Anschaffung und Installation der betrachteten Altanlage zu bestimmen. Da die meisten Teilnehmer nicht über Rechnungen zu den genannten Kostenpunkten verfügen, werden die Kosten aus bekannten Größen abgeleitet. Für die Installationskosten des jeweiligen Altsystems wird ein Betrag von 1.500 € angesetzt. Die Anschaffungskosten der ersetzten Heizkessel werden aus einer vom GWI bestimmten Richtpreisfunktion für Brennwertgeräte abgeleitet [20], welche die Preise für den derzeitigen Technologiestand beschreibt. Durch Anwendung dieser Richtpreisfunktion ist es möglich die Altanlagen mit abweichender Technologie in der Form zu bewerten, dass in den Anschaffungskosten der Preis des damaligen innovativen Technologiestandes berücksichtigt wird. Die Anschaffungskosten A_0 ergeben sich zu

$$A_0 = 791,22 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \cdot P_{th,HL}^{0,575} \quad (3-17)$$

$P_{th,ZHG}$ ist die Heizlast in kW und ergibt sich aus folgender Gleichung [21]

$$P_{th,HL} = \frac{Q_{th,HL}}{8760 \text{ d}} \cdot 5, \quad (3-18)$$

Dabei ist $Q_{th,HL}$ die benötigte Heizenergie in kWh pro Jahr. Die Heizenergie kann wiederum durch Zunahme des Jahresnutzungsgrads der betrachteten Anlage und dem im Projekt gemessenen Wärmebedarf des Gebäudes bestimmt werden.

Betriebsgebundene Kosten

Für die untersuchten Systeme beschränken sich die betriebsgebundenen Kosten aufgrund der betrachteten Leistungsklassen auf Instandhaltungskosten (siehe Kapitel 3.3.4).

KWK-System

Nach VDI 2067 können die Instandhaltungskosten aus den Investitionskosten abgeleitet werden (siehe Gleichung (3-11)). Für die Bilanzierung der KWK-Systeme ist dieser Umweg jedoch nicht nötig, da die Instandhaltungskosten im Rahmen des Projekts direkt erfasst wurden. In Tabelle 25 sind die ermittelten¹² Instandhaltungskosten (gerundete Beträge) in Abhängigkeit von der Technologie und der elektrischen Leistung P_{el} zusammengefasst.

Tabelle 25: Im Projekt ermittelte Instandhaltungskosten (gerundete Beträge) für die eingesetzten KWK-Systeme. Die Kosten sind in Abhängigkeit von der Technologie und der elektrischen Leistung P_{el} angeführt.

KWK-System	elektrische Leistung	Instandhaltungskosten
Stirling-Motor	1 kW	180 €/a
Ottomotor	1 kW	460 €/a
Ottomotor	4,7 kW	850 €/a
Brennstoffzelle	1,5 kW	750 €/a

Für die vorliegende Bilanzierung der KWK-Systeme werden keine Preisänderungen bezüglich der Instandhaltungskosten berücksichtigt. Dies liegt darin begründet, dass keine fundierten Annahmen bezüglich der Entwicklung der anfallenden Kosten getroffen werden können. So könnten z. B. Anlagenkomponenten, die für die Instandhaltung benötigt werden, bei einer Ausbreitung der KWK-Technologie aufgrund höherer Stückzahlen günstiger werden und somit die Instandhaltungskosten abnehmen. Andererseits könnten die Kosten durch steigende Lohnkosten zunehmen.

Altanlage – Zuvor installierter Heizkessel

Für die zuvor installierten Altanlagen wird für die Bestimmung der Instandhaltungskosten auf das Berechnungsverfahren aus VDI 2067 Blatt 1 zurückgegriffen, da die Kosten im Rahmen des Projekts nicht fundiert ermittelt werden konnten¹³. Nach Gleichung (3-11) ergeben sich die Kosten in Abhängigkeit von der Investitionssumme A_0 und den entsprechenden Aufwandsfaktoren für Instandsetzung f_{Inst} und Wartung f_{W+Insp} zu

$$A_{N,B} = A_0 \cdot (f_{Inst} \cdot ba_{Inst} + f_{W+Insp} \cdot ba_{W+Insp}) \quad (3-19)$$

Die jeweiligen Faktoren der Altanlagen sind abhängig von der zugrundeliegenden Technologie und dem jeweiligen Energieträger des eingesetzten Brennstoffs. Nach VDI 2067 Blatt 1 ergeben sich für die betrachteten Anlagen folgende Faktoren.

¹² Die Instandhaltungskosten wurden aus Handwerker-Rechnungen und Vollwartungsverträgen abgeleitet.

¹³ Es lagen nicht immer Rechnungen zu den angefallenen Kosten vor, da Arbeiten an den Altanlagen teilweise selbstständig oder Wartungen auch gar nicht durchgeführt wurden.

Tabelle 26: Faktoren für den Aufwand bezüglich Instandsetzung sowie Wartung und Inspektion der betrachteten Altanlagen in Abhängigkeit von der Energieträgerform. Die angeführten Faktoren wurden der VDI 2067 Blatt 1 entnommen.

Altanlage – Energieträger	Aufwand für Instandsetzung f_{inst} in %	Aufwand für Wartung und Inspektion f_{W+Insp} in %
Erdgas	1,5	1
Flüssiggas	2	1,5
Kohle	2	2,5
Heizöl	2	1,5
Strom	1	1,5

Um die Konsistenz bezüglich der betriebsgebundenen Kosten der Altanlagen und der KWK-Systeme im Hinblick möglicher Preisänderungen sicherzustellen, werden auch für die betrachteten Altanlagen keine Preisänderungen bezüglich der Instandhaltungskosten angesetzt.

Das Risiko für Instandhaltungsmaßnahmen sollte, wie im Kapitel kapitalgebundene Kosten beschrieben (siehe Seite 93), nach dem Erreichen der Nutzungsdauer des betrachteten Systems zu nehmen. Um diesen Aspekt in dem Berechnungsverfahren zu berücksichtigen, wird in der Kostengruppe betriebsgebundenen Kosten ein zusätzlicher Term $A_{N,B}^T$ eingefügt. Die Höhe dieses zusätzlichen Kostenpunktes wird anhand der Instandsetzungskosten innerhalb der Nutzungsdauer abgeleitet. Hierfür werden die anfallenden Instandsetzungskosten im letzten Jahr der technischen Nutzungsdauer als Berechnungsgrundlage verwendet und als Startkosten für die weitere Berechnung der zusätzlich implementierten Annuität $A_{N,B}^T$ angesetzt. Für die Kosten der Instandsetzung nach dem Erreichen der Nutzungsdauer wird in der vorliegenden Arbeit eine Preisänderung von 5 % angesetzt. Diese Zunahme soll das steigende Risiko bezüglich der Instandhaltungsmaßnahmen mit zunehmendem Alter widerspiegeln.

Bedarfsgebundene Kosten

Die Berechnung der bedarfsgebundenen Kosten findet nach VDI 2067 auf Grundlage des Energiebezugs und der jeweiligen Energiepreise im ersten Betrachtungsjahr statt. Die Entwicklung der jeweiligen Energiepreise werden dann nach Gleichung (3-9) angepasst. In der vorliegenden Arbeit werden für die Bilanzierung die Messdaten des Feldversuchs für exakt ein Jahr herangezogen. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Datenerfassung (siehe Kapitel 2.4) bilden, wie für die ökologische Bilanzierung, die Werte der kumulierten Messdatenzähler die Datengrundlage. In die Bilanz gehen folgende Messdaten ein.

- 🔗 Brennstoffbezug W_{Br} bzw. die Messgröße Gasvolumenstrom V_{Gas}
- 🔗 vom KWK-System generierte Wärme Q_{th}
- 🔗 vom KWK-System generierte elektrische Energie $E_{el,KWK}$
- 🔗 in das öffentliche Netz eingespeiste elektrische Energie $E_{el,KWK,ein}$
- 🔗 aus dem öffentlichen Netz bezogene elektrische Energie $E_{el,Obj,bez}$

Um die bedarfsgebundenen Kosten des zuvor genutzten Versorgungssystems zu bestimmen, werden die erfassten Messdaten auf das jeweilige Objekt übertragen. Der Strombedarf des Gebäudes ergibt sich aus der bezogenen elektrischen Energie $E_{el,Obj,bez}$ und dem Eigennutzungsanteil der von der KWK-Anlage generierten elektrischen Energie $E_{el,KWK,nutz}$ ($E_{el,KWK,nutz} = E_{el,KWK} - E_{el,KWK,ein}$). Der Wärmebedarf des Objekts ist hingegen direkt durch die gemessene Wärme Q_{th} gegeben, die vom KWK-System bereitgestellt wird. Um die Wärmegestehungskosten des zuvor installierten Versorgungssystems zu berechnen, wird die gemessene Wärme auf den zuvor installierten Heizkessel projiziert. Unter Verwendung der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Methodik, wird aus der gemessenen Wärme der benötigte Brennstoffeinsatz der betrachteten Altanlage bestimmt. Mit dem entsprechenden Preis des eingesetzten Energieträgers ergeben sich dann die Wärmegestehungskosten.

In dem vorliegenden Projekt wurden Heizkessel ersetzt, die als Brennstoff die Energieträger Erdgas, Kohle, Heizöl, Flüssiggas und Strom verwendet haben, sodass für die Berechnung der betriebsgebundenen Kosten die Preise für diese Energieträger erforderlich sind. Hierbei muss neben dem Arbeitspreis des jeweiligen Energieträgers auch der entsprechende Grundpreis in der Kalkulation berücksichtigt werden.

Tabelle 27: Energiepreise und Preisänderungssätze in Abhängigkeit von der Energieträgerform. Die Preise beinhalten neben dem Arbeitspreis des jeweiligen Energieträgers auch den entsprechenden Grundpreis. Bis auf den Energieträger Erdgas, beziehen sich alle Preisangaben auf den Heizwert. Der Erdgas-Preis bezieht sich auf den Brennwert, da dieser für die Versorgungsunternehmen die Grundlage in ihren Abrechnungen bildet.

Energieträger	Preis in Ct/kWh	Änderung in %	Quelle | Kommentar
Erdgas	8,4 (H _s)	1,1	Ele GmbH [22] | ELE erdgasBasic Referenz
Flüssiggas	8,6 (H _i)	2,8	VZ NRW [23] | Referenz 2013
Kohle	3,6 (H _i)	1,1	BMWi [24] | Energiekosten der privaten Haushalte Referenz 2013
Heizöl	8,4 (H _i)	4,0	BMWi [24] | Energiekosten der privaten Haushalte Referenz 2013
Strom	30,6 (H _i)	4,3	Ele GmbH [22] | ELE stromPlus Referenz 2013

Für die angesetzten Strom- und Erdgaspreise werden die Energiepreise des Versorgungsunternehmens Emscher Lippe Energie GmbH herangezogen, da der größte Teil der Teilnehmer im Projekt von diesem Unternehmen beliefert wird. Für die weiteren Energieträger existieren bei den Teilnehmern keine bevorzugten Versorgungsunternehmen, sodass auf erhobene Verbraucherpreise zurückgegriffen wird. Als Datenbasis dienen die erfassten Preise des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) [24]. Für den Flüssiggas-Preis wird die Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen e.V. (VZ NRW) [23] als zusätzliche Quelle herangezogen, da dieser Preis in den Daten des BMWi nicht angeführt ist. In Tabelle 27 sind die für das Berechnungsverfahren angesetzten Energiepreise zusammengefasst. Des Weiteren sind in der Tabelle der Preisänderungssatz zu dem jeweiligen Energieträger angegeben, wobei die Änderungsraten durch Extrapolation der jeweiligen Preisverläufe abgeleitet wurden.

Sonstige Kosten

Sonstige Kosten beinhalten alle zusätzlichen Kosten, wie z. B. Versicherungen, Steuern oder auch ganz allgemeine Abgaben. Für die hier betrachteten Altanlagen und KWK-Systeme entfällt dieser Kostenpunkt. In dem Berechnungsverfahren werden zwar die möglichen Zusatzkosten durch die Erhebung der EEG-Umlage für KWK-Systeme berücksichtigt, doch entfallen diese für die betrachteten Leistungsklassen aufgrund eines Freibetrags.

So sieht das EEG nach § 61 [25] vor, dass KWK-Systeme, die ab dem 01.08.2014 in Betrieb genommen wurden, für den im Objekt genutzten KWK-Strom die EEG-Umlage anteilig gemäß Tabelle 28 zu leisten haben. Es besteht jedoch für Anlagen mit einer maximalen elektrischen Nennleistung von 10 kW eine Freimenge von 10.000 kWh pro Jahr bezüglich der Stromeigennutzung.

Tabelle 28: Zu leistender EEG-Umlageanteil in Abhängigkeit von dem Zeitraume der Stromeigennutzung [25]. Der Umlageanteil bezieht sich auf die jeweilige zeitliche vorliegende EEG-Umlage. Für Anlagen mit einer maximalen elektrischen Nennleistung von 10 kW wird eine Freimenge von 10.000 kWh pro Jahr bezüglich der Stromeigennutzung gewährt.

Zeitraum	EEG-Umlageanteil
1.8.14 bis 31.12.15	30 % der derzeitigen EEG Umlage
1.1.16 bis 31.12.16	35 % der derzeitigen EEG Umlage
ab 1.1.17	40 % der derzeitigen EEG Umlage

Erlöse

In der Regel fallen bei dem Betrieb eines Heizungssystems keine Einnahmen an. Eine Ausnahme hierzu bildet die Energiebereitstellung mittels KWK-Systemen. An dieser Stelle soll jedoch nochmals darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Energiebereitstellung für den Eigenbedarf nicht mit gewinnbringenden Rückflüssen verknüpft ist und in Summe stets Kosten anfallen.

Die Erlöse für KWK-Systeme ergeben sich einerseits aus der Einspeisung des generierten KWK-Stroms ins öffentliche Netz und andererseits durch die staatliche Förderung der Systeme. In dem Berechnungsverfahren gilt es hierbei, wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben, die Form der Zahlungsweise zu berücksichtigen. So können Einnahmen durch einmalige oder kontinuierliche Zahlungen entstehen.

Kontinuierliche Erlöse

Bei einer wärmegeführten Fahrweise von KWK-Systemen treten bei der gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme Intervalle auf, in denen im Objekt kein Strombedarf besteht. In diesen Fällen wird der generierte KWK-Strom ins öffentliche Netz eingespeist, sodass durch eine Veräußerung des Stroms Einnahmen entstehen. Der erzielte Preis für den eingespeisten Strom richtete sich nach den vorangegangenen Quartalswert für den Baseload-Strom an der Strombörse EEX in Leipzig [9]. Da in dem Berechnungsverfahren nach VDI 2067 nur die Zahlungen für das erste Jahr implementiert sind, werden in den vorliegenden Kalkulationen die Baseload-Preise für das entsprechend betrachtete Intervall hinsichtlich der zugrundeliegenden Messdaten berücksichtigt. Des Weiteren wird in den Berechnungen kein Preisände-

runingssatz angesetzt, da aufgrund der starken Fluktuationen des Baseload-Preises keine fundierten Annahmen getroffen werden können.

Für den eingespeisten Strom fallen noch weitere Erlöse in Form von vermiedenen Netznutzungsentgelten (VNNE) an. Die Grundlage für diesen Anspruch bildet §18 StromNEV [26] in Kombination mit §24 EnWG [27], §57 Abs.3 EEG [25] sowie §4 Abs.3 KWKG [11]. Die VNNE werden vom Netzbetreiber dafür ausgezahlt, dass durch die dezentrale Einspeisung der KWK-Anlage die vorgelagerten Mittel- und Hochspannungsnetze nicht beansprucht und somit Kosten vermieden werden. Für die anfallenden VNNE existiert keine einheitliche Regelung, sodass diese individuell bestimmt werden und Abweichungen in Abhängigkeit von der Region auftreten. Für das vorliegende Projektgebiet regelt die ELE Verteilnetz GmbH die Ermittlung der VNNE, sodass diese als Berechnungsgrundlage herangezogen werden. Die von der ELE Verteilnetz GmbH angegebenen VNNE betragen 0,48 Ct/kWh [28].

Eine weitere kontinuierliche Einnahme bzw. Entlastung ist nach § 53 EnergieStG [29] durch die Energiesteuerentlastung für den in der KWK-Anlage eingesetzten Brennstoff gegeben. Die Steuerentlastung wird beim zuständigen Hauptzollamt jährlich beantragt und entsprechend ausgezahlt, sodass in der vorliegenden Arbeit der Betrag als Erlös verbucht wird. Bei der Energiesteuerentlastung wird unterschieden zwischen Voll- und Teilentlastung. Die Vollentlastung beträgt für Erdgas 0,55 Ct/kWh und wird nach § 53a EnergieStG veranschlagt, wenn die Anlage hocheffizient im Sinne der EU-Richtlinie 2004/8/EG (Anhang III) [30] ist und einen Nutzungsgrad von mindestens 70 % vorweist. Des Weiteren wird dieser Satz nur gewährt solange die Anlage steuerrechtlich nicht vollständig abgeschlossen ist, sodass eine Vollentlastung in der Regel für zehn Jahre besteht. Nach diesen zehn Jahren greift § 53b EnergieStG und es besteht für das bezogene Erdgas eine Teilentlastung in Höhe von 0,442 Ct/kWh.

Eine entscheidende Einnahme bei dem Betrieb einer KWK-Anlage besteht durch die staatlich geförderte KWK-Zulage. In der vorliegenden Arbeit fallen die installierten KWK-Anlagen aufgrund des Zeitpunktes ihrer Inbetriebnahme in die Regelung des KWKG 2012. Diese sieht vor, dass für jede elektrisch generierte Kilowattstunde einer hocheffizienten¹⁴ KWK-Anlage mit einer maximalen elektrischen Nennleistung von 50 kW eine Vergütung von 5,41 Ct besteht. Diese Zulage wird für den Zeitraum von zehn Jahren kontinuierlich in Form von Jahreszahlungen oder wahlweise in einer Einmalzahlung für 30.000 Vollbenutzungsstunden (Vbh) geleistet.

Die Summe über alle Einnahmen ist aufgrund der zehnjährigen Befristung bezüglich der KWK-Zulage und der Vollentlastung von der Energiesteuer zeitlich nicht konstant. Dieser Punkt muss im Berechnungsverfahren der Gesamtannuität berücksichtigt werden, sodass sich bei Betrachtungszeiträumen größer als zehn Jahre zwei unterschiedliche Gesamtannuitäten ergeben. In Tabelle 29 sind die kontinuierlichen Einnahmen für die ersten zehn Jahre und die darauf folgende Zeit zusammengefasst.

¹⁴ Im Sinne von Anhang III der EU-Richtlinie 2004/8/EG

Tabelle 29: Kontinuierliche Einnahmen für den Betrieb einer KWK-Anlage. Die Erlöse in den ersten zehn Jahren unterscheiden sich zu den darauf folgenden Jahren, da die KWK-Zulage entfällt und für die Energiesteuer nur noch eine Teilentlastung gewährt wird.

Einnahmequelle	Preis in Ct/kWh	
	Betrachtungszeitraum ≤ 10 a	Betrachtungszeitraum > 10 a
Stromeinspeisung	vorangegangener Baseload-Preis z. B. Q1 2014: 3,35	
VNNE	0,48	
Energiesteuerentlastung	0,55	0,442
KWK-Zulage	5,41	0
Summe	9,79	4,272

Einmalige Erlöse

Betreiber einer KWK-Anlage werden durch einmalige Investitionszuschüsse gefördert. Auf Bundesebene wird die Förderung durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) [31], [32] geregelt. Auch auf Landesebene existieren in einigen Ländern Impulsprogramme, die mittels einmaligen Investitionszuschüssen KWK-Systeme fördern. In der vorliegenden Arbeit wird nur auf das Impulsprogramm der Landesregierung NRW [14] eingegangen, da das Projektgebiet in NRW liegt. Die Investitionszuschüsse werden nur bei Analysen mit Marktpreisen zugrunde gelegt, da die Förderung im Projektrahmen entfällt.

Da die behandelten KWK-Systeme, wie bereits erwähnt, unter das KWKG 2012 fallen, kann zu den Investitionszuschüssen des BAFA und der Landesregierung NRW noch ein weiterer Zuschuss im Form einer Einmalzahlung erfolgen. Dieser einmalige Investitionszuschuss besteht, wenn sich der Anlagenbetreiber für die einmalige Auszahlung der KWK-Zulage für 30.000 Vbh entscheidet. Die Höhe der Förderung A_{KWK} ist abhängig von der elektrischen Nennleistung P_{el} der KWK-Anlage und ergibt sich zu

$$A_{KWK} = P_{el} \cdot 5,41 \frac{ct}{kWh} \cdot 30.000 Vbh \quad (3-20)$$

Für eine Anlage mit einer Nennleistung von beispielweise 2 kW resultiert eine Förderung in Höhe von 3.246 €.

Die Zuwendung des BAFA richtet sich nach der elektrischen Nennleistung der KWK-Anlage und wurde zum 01.01.2015 erhöht, sodass sich für die im Projekt installierten Anlagen unterschiedliche Investitionszuschüsse ergeben. In der folgenden Tabelle ist die BAFA-Förderung in Abhängigkeit von der elektrischen Nennleistung und des Inbetriebnahme-Zeitpunktes (IBN) zusammengefasst [14, 15].

Tabelle 30: Einnahmen durch BAFA-Förderung [14, 15]

P_{el} in kW	BAFA-Förderung	
	IBN ≤ 31.12.14	IBN ≥ 01.01.15
≤ 1	1.425 €	1.900 €
≤ 4	1.425 € + 285 €/kW	1.900 € + 300 €/kW
≤ 10	2.280 € + 95 €/kW	2.800 € + 100 €/kW
≤ 20	2.850 € + 47,50 €/kW	3.400 € + 10 €/kW

Im Rahmen der BAFA-Förderung können bei KWK-Systemen mit einer Inbetriebnahme ab dem 01.01.2015 zusätzliche Einnahmen durch die sogenannten Strom- und Wärmeeffizienzboni bestehen. Der Stromeffizienzbonus beträgt 60 % und der Wärmeeffizienzbonus 25 % der BAFA-Basisförderung. Für den Erhalt des Stromeffizienzbonus gelten die in Tabelle 31 angeführten Voraussetzungen bezüglich des elektrischen Wirkungsgrades η_{el} der KWK-Anlage.

Tabelle 31: Voraussetzungen für den Erhalt des Stromeffizienzbonus [32]

P_{el} in kW	η_{el} in %
≤ 1	> 31
≤ 4	> 31
≤ 10	> 33
≤ 20	> 35

Die Anforderungen an den Wärmeeffizienzbonus beziehen sich nicht direkt auf das KWK-System, sondern auf die Einbindung der Anlage in das Heizungssystem. So besteht ein Anspruch auf diesen Bonus, wenn das System mit einem (zweiten) Abgaswärmetauscher zur Brennwertnutzung ausgestattet und an ein hydraulisch abgeglichenes Heizungssystem angeschlossen ist.

In NRW besteht eine besondere Förderung von KWK-Anlagen. Das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz in NRW hat im Rahmen ihres Förderprogramms progres.nrw [33] ein KWK-Impulsprogramm hervorgebracht, das 250 Millionen Euro zur Förderung von KWK-Systemen bereitstellt. Die Höhe der Förderung orientiert sich an der elektrischen Nennleistung der KWK-Anlage und ist in Tabelle 32 angeführt. Hierbei ist zu beachten, dass nur hocheffiziente KWK-Anlagen mit einem Wirkungsgrad von mindestens 80 % in die Förderung fallen.

Tabelle 32: Einnahmen durch die NRW-Förderung [34]

P_{el} in kW	NRW-Förderung
≤ 1	1.425 €
≤ 4	1.425 € + 285 €/kW
≤ 10	2.280 € + 95 €/kW
≤ 20	2.850 € + 47,50 €/kW

Für die Kumulierbarkeit der NRW-Förderung mit anderen Programmen existieren Bedingungen bezüglich der maximalen Förderhöchstgrenzen. So darf die gesamte Förderung das Zweifache der oben angeführten NRW-Zuschüsse nicht überschreiten. Eine Ausnahme stellen jedoch KWK-Systeme dar, die den Stromeffizienzbonus im Sinne der BAFA-Förderung aus Tabelle 31 erfüllen. Für diese KWK-Systeme darf das Dreifache des Förderbetrags nicht überschritten werden.

3.3.6 Ergebnisse der wirtschaftlichen Bilanzierung

Die ökonomische Bilanzierung der KWK-Systeme und der zuvor genutzten Energieversorgungssysteme sind an das Berechnungsverfahren der VDI 2067 Richtlinie angelehnt. Die vollzogenen Anpassungen an dem Verfahren bezüglich der vorliegenden Bilanzierungsmethodik werden ausführlich in den Kapiteln 3.3.4 und 3.3.5 behandelt. Des Weiteren sind in Kapitel 3.3.5 die für die Berechnung notwendigen Parameter angegeben, sodass die Transparenz der wirtschaftlichen Betrachtung vollständig gegeben ist.

Für eine fundierte Wirtschaftlichkeitsanalyse der im Demonstrationsprojekt installierten KWK-Systeme ist die Datengrundlage von einem Jahr unabdingbar, da nur so das Nutzerverhalten und somit der Energieverbrauch in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen exakt erfasst wird. So bestimmt der Energieeinsatz im Objekt die bedarfsgebundenen Kosten, die wiederum einen wesentlichen Anteil an der jährlichen Gesamtannuität darstellen. Hinzu kommt, dass sich die anfallenden Kosten und Erlöse für beide untersuchten Versorgungssysteme (KWK- und Altanlage) in Abhängigkeit von dem Energieverbrauch stark verändern. Dies hat zur Folge, dass ein nicht korrekt angesetzter Energieeinsatz in der Bilanzierung die Wertung der beiden Systeme in der Form verfälschen kann, dass sich die Verhältnisse der Wirtschaftlichkeit von einem zum anderen System verschieben.

Aus Gründen einer fundierten bzw. neutralen Bewertung der Systeme wird in der vorliegenden Arbeit nur auf erfasste Messdaten zurückgegriffen, die eine Auswertung eines gesamten Jahres zu lassen. Diese Anforderung an die im Projekt erfassten Messdaten ließ zum Auswertungszeitpunkt eine Berücksichtigung von insgesamt 34 KWK-Systemen zu. In diesen 34 analysierten Systemen sind bis auf Brennstoffzellen betriebene KWK-Systeme alle im Projekt vertretenen Technologien enthalten. Hierbei handelt es sich um 13 Otto- und 18 Stirling-Motor betriebene KWK-Systeme mit einer elektrischen Nennleistung von 1 kW sowie 3 Ottomotor betriebene KWK-Anlagen mit einer elektrischen Nennleistung von 4,7 kW. Die Anzahl der ersetzten Altsysteme in Abhängigkeit von dem zuvor genutzten Energieträger liegt bei 25 Erdgas-, 6 Öl- und 3 Kohle-betriebenen Heizkesseln.

Im Folgenden wird im Detail auf die wirtschaftliche Betrachtung einer installierten sowie der entsprechenden ersetzten Anlage eingegangen. Eine Analyse aller 34 Systeme folgt dann im Anschluss in einer gesamtheitlichen Betrachtung.

Das an dieser Stelle betrachtete KWK-System wurde in einem Einfamilienhaus von 1963 mit einer Wohnfläche von ca. 200 m² installiert. Beim eingesetzten KWK-System handelt es sich um eine Ottomotor betriebene Anlage mit einer elektrischen Nennleistung von 1 kW. Das KWK-System hat innerhalb des betrachteten Jahres ca. 39.000 kWh¹⁵ Erdgas bezogen und die Nutzwärme von ca. 25.000 kWh sowie die elektrische Energie von ca. 5.200 kWh generiert. Hierbei wurden ca. 12.200 kWh der Nutzwärme von der KWK-Anlage und die restliche Wärme vom Zusatzheizgerät bereitgestellt. Ferner wurden von dem generierten KWK-Strom ca. 2.500 kWh zur Eigenbedarfsdeckung genutzt. Insgesamt bestand in dem betrachteten Objekt ein Strombedarf von ca. 4.900 kWh. Für das bilanzierte KWK-System beträgt somit der

¹⁵ Bezogen auf den Brennwert von 10,1 kWh/m³ (L-Gas) [13]

Stromeigennutzungsanteil 48 % und der Stromdeckungsanteil 51 %. Die eingesetzte KWK-Anlage hat im betrachteten Objekt eine 28 Jahre alte Heizungsanlage ersetzt, die mit Erdgas betrieben wurde. Nach VDI 2067 hat die ersetzte Altanlage ihre Nutzungsdauer um 10 Jahre überschritten (siehe Tabelle 24). Aus der Auswertung bezüglich des Alters-abhängigen Jahresnutzungsgrads in Abbildung 61 (a) ergibt sich für die betrachtete Altanlage ein Nutzungsgrad von 68 %.

In Abbildung 71 sind die Ergebnisse der ökonomischen Bilanzierung zum installierten KWK-System und der zuvor genutzten Altanlage zusammengefasst. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bezüglich der kapitalgebundenen Kosten die Anschaffungskosten des KWK-Systems aus den Komponenten KWK-Anlage, Zusatzheizgerät und Wärmespeicher bestehen.

Für die Berechnungen wurde die Nutzungsdauer der KWK-Anlage auf 10 Jahre gesetzt. Des Weiteren wurde für die dargestellte Bilanzierung ein Zinssatz von 2 % und ein Betrachtungszeitraum von 10 Jahre gewählt. Alle weiteren Parameter entsprechen den Angaben in Kapitel 3.3.5.

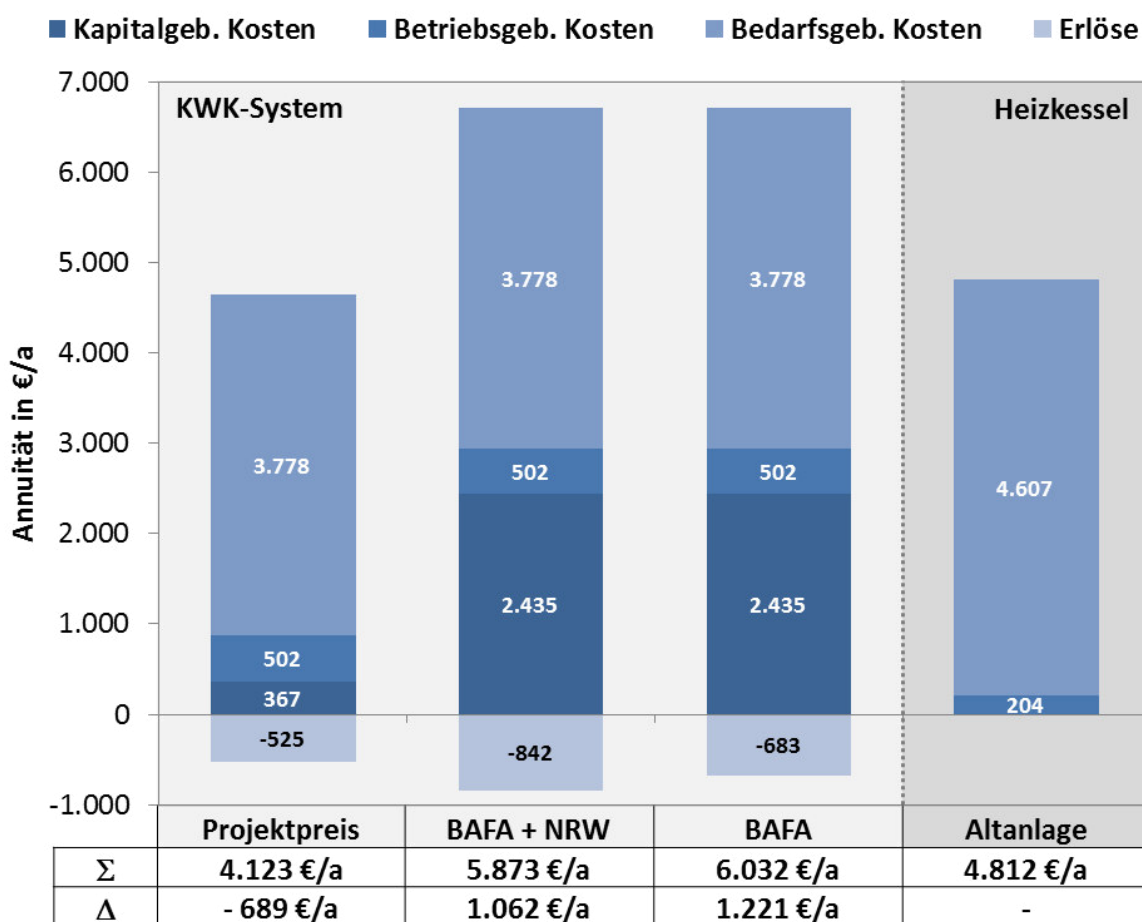


Abbildung 71: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems und der zuvor genutzten Altanlage. Für das KWK-System sind weiterhin die wirtschaftlichen Auswirkungen der verschiedenen Fördersituation auf Bundes- (BAFA), NRW- (BAFA + NRW) und Projektebene (Projektpreis) angefügt. In der hinzugefügten Tabelle sind die Gesamtannuitäten (Σ) sowie die Differenzbeträge (Δ) zu den anfallenden Kosten des zuvor genutzten Versorgungssystems zusammengefasst. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Um die wirtschaftlichen Auswirkungen der verschiedenen Fördermaßnahmen auf die Gesamtannuität der KWK-Anlage analysieren zu können, sind in Abbildung 71 die Ergebnisse der Berechnung für die Fördersituation auf Bundes- (BAFA), NRW- (BAFA + NRW) und Projektebene (Projektpreis) zusammengefasst und der Altanlage gegenübergestellt. Des Weiteren sind die einzelnen Kostenpunkte des VDI-Berechnungsverfahrens farblich dekodiert (siehe Legende).

Für das zuvor genutzte konventionelle Energieversorgungssystem, bestehend aus Heizkessel und öffentlichen Stromnetz, ergibt sich die Gesamtannuität zu 4.812 €/a. Da die Altanlage aufgrund ihres Alters vollständig abgeschrieben ist, beschränken sich die Kosten auf bedarfsgebundene und betriebsgebundene Kosten. Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten einen Aufschlag, der das erhöhte Risiko bzw. die erhöhten Kosten für die Instandhaltungsmaßnahmen nach einer Überschreitung der Nutzungsdauer abdecken (siehe Abbildung 70).

Die Analyse zeigt, dass das KWK-System nur auf Projektebene im Vergleich zur Altanlage wirtschaftlich ist. In diesem Fall wird eine jährliche Einsparung von 689 € gegenüber dem Altsystem erzielt. Für die Fördersituationen auf Bundes- und Landesebene ist die Umstellung auf das KWK-System mit jährlichen Kosten von 1.062 € bzw. 1.221 € verbunden. Hierbei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die neu installierte KWK-Anlage mit einer vollständig abgeschriebenen Heizungsanlage im Vergleich steht und für das Altsystem keine kapitalgebundenen Kosten anfallen. Diese Kosten würden jedoch innerhalb der Abschreibungsphase der Altanlage (gesamte Nutzungsdauer) ca. 400 €¹⁶ betragen, sodass sich in dieser Betrachtung die Mehrkosten für das KWK-System reduzieren. Eine Verkürzung des Betrachtungszeitraums auf die hier angesetzten 10 Jahre würde die kapitalgebundenen Kosten der Altanlage sogar auf ca. 675 €/a ansteigen lassen. Ferner gilt es zu berücksichtigen, dass die Altanlage mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der angesetzten Betrachtungszeiträume von 10 und 15 Jahren aufgrund ihres hohen Alters ersetzt werden müsste und eine Neuanschaffung anfallen würde.

Des Weiteren ist in der Auswertung zu erkennen, dass die bedarfsgebundenen Kosten für die KWK-Anlage um ca. 800 €/a geringer ausfallen. Dies stellt nicht nur finanziell eine wesentliche Einsparung dar, sondern auch im ökologischen Sinne, da Primärenergiebedarf und entsprechend die CO₂-Emission abnehmen.

Der Vergleich der betriebsgebundenen Kosten zeigt, dass das betrachtete KWK-System mit dem wartungsintensiven Ottomotor höhere Kosten hervorruft als die Altanlage. Diese jährlich anfallenden Mehrkosten relativieren sich jedoch unter der Hinzunahme der kontinuierlichen Erlöse und Einsparungen, die in der Kostengruppe bedarfsgebundene Kosten anfallen.

Die Auswertung lässt erkennen, dass in der Bilanz des KWK-Systems auf Bundes- und Landesebene ein wesentlicher Anteil an der Gesamtannuität durch die kapitalgebundenen Kosten gegeben ist und somit durch die anfänglich hohen Investitionskosten. Im Rahmen des Projekts wird die Förderung in der Kostengruppe kapitalgebundene Kosten verrechnet, da die Betrei-

¹⁶ Anschaffungskosten von ca. 4.500 € für eine Erdgas-Anlage mit einer Heizlast von 21 kW sowie dem Betrachtungszeitraum von 18 Jahren, welches der Nutzungsdauer entspricht.

ber ihre KWK-Anlage in diesem Fall für einen Festpreis von 3.300 € erworben haben. Durch diese hohe Förderung nehmen die Anschaffungskosten in der Form ab, dass es wirtschaftlich ist die abgeschriebene Altanlage durch eine neue KWK-Anlage zu ersetzen.

Hingegen können die Investitionszuschüsse auf Bundes- und Landesebene die derzeitigen hohen kapitalgebundenen Kosten nicht auffangen, um die Gesamtannuität des eingesetzten KWK-Systems im Vergleich zur betrachteten Altanlage wirtschaftlich zu gestalten. Wie schon erwähnt, gilt es zu beachten, dass die KWK-Anlage nicht gegen eine Neuanschaffung bilanziert wird, sondern gegen ein vollständig abgeschriebenes Heizungssystem.

Für eine detaillierte Einsicht in die einzelnen Kostengruppen der bilanzierten Systeme aus Abbildung 71 sind in den nachfolgenden Tabellen die Ergebnisse der Berechnungen zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 33: Anfallende Annuitäten für das betrachtete KWK-System aus Abbildung 71 für die verschiedenen Fördersituationen auf Bundes-, Landes- und Projektebene

KWK-System	Stirling-Motor			
	Förderung	Projektpreis	BAFA + NRW	BAFA
Kapitalgebundene Kosten	367,38 €/a	2.435,28 €/a	2.435,28 €	2.435,28 €
- davon Erdgas-Hausanschluss	- €/a	- €/a	- €/a	- €/a
Betriebsgebundene Kosten	502,06 €/a	502,06 €	502,06 €/a	502,06 €/a
Bedarfsgebundene Kosten	3.777,92 €/a	3.777,92 €/a	3.777,92 €/a	3.777,92 €/a
- davon Gasbezug	2.907,20 €/a	2.907,20 €/a	2.907,20 €/a	2.907,20 €/a
- davon Strombezug	870,71 €/a	870,71 €/a	870,71 €/a	870,71 €/a
Sonstige Kosten	- €/a	- €/a	- €/a	- €/a
Erlöse	524,57 €/a	841,85 €/a	683,21 €/a	683,21 €/a
- davon Stromeinspeisung	84,29 €/a	84,29 €/a	84,29 €/a	84,29 €/a
- davon KWK-Zulage	290,09 €/a	290,09 €/a	290,09 €/a	290,09 €/a
- davon Energiesteuerentlastung	124,46 €/a	124,46 €/a	124,46 €/a	124,46 €/a
- davon VNNE	25,74 €/a	25,74 €/a	25,74 €/a	25,74 €/a
- davon BAFA-Förderung	- €/a	158,64 €/a	158,64 €/a	158,64 €/a
- davon Stromeffizienzbonus	- €/a	- €/a	- €/a	- €/a
- davon Wärmeeffizienzbonus	- €/a	- €/a	- €/a	- €/a
- davon NRW-Förderung	- €/a	158,64 €/a	- €/a	- €/a
Gesamtannuität	4.122,78 €/a	5.873,40 €/a	6.032,04 €/a	6.032,04 €/a
Gesamtannuität nach 10 a	T_B ≤ 10 a	T_B ≤ 10 a	T_B ≤ 10 a	T_B ≤ 10 a
Gesamtzahlung in T_B	41.227,83 €	58.734,02 €	60.320,42 €	60.320,42 €

Tabelle 34: Annuitäten der ersetzten Altanlage aus Abbildung 71. Da die Nutzungsdauer der Anlage überschritten wurde, ist sie im wirtschaftlichen Sinne vollständig abgeschrieben, sodass keine kapitalgebundenen Kosten anfallen. Um einen Einblick in die Höhe der anfallenden kapitalgebundenen Kosten zu erhalten, sind diese in Grau angefügt.

Altanlage:	
Energieträger	Erdgas
Alter	28 a
Überschreitung der Nutzungsdauer	10 a
Kapitalgebundene Kosten	404,21 €/a
Betriebsgebundene Kosten	204,20 €/a
- Kosten während der Nutzungsdauer	90,77 €/a
- zusätzlich Kosten nach der Nutzungsdauer	113,42 €/a
Bedarfsgebundene Kosten	4.607,31 €/a
- davon Wärmebereitstellung	2.744,67 €/a
- davon Strombezug	1.862,64 €/a
Gesamtannuität während der Nutzungsdauer	5.102,29 €/a
Gesamtannuität nach der Nutzungsdauer	4.811,51 €/a
Gesamtzahlung in T_B	48.115,10 €

In Abbildung 72 ist die gesamtheitliche Betrachtung aller 34 bilanzierten Anlagen für verschiedene Berechnungsszenarien dargestellt. In der Auswertung werden, wie in Abbildung 71, die verschiedenen Fördersituationen berücksichtigt. Des Weiteren sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von dem Energieträger angefügt, der von der ersetzten Altanlage genutzt wurde. Eine weitere Differenzierung findet durch die Variation des Betrachtungszeitraums sowie der angesetzten Nutzungsdauer der bilanzierten KWK-Systeme statt. Hierbei werden zwei Fälle betrachtet, wobei der Betrachtungszeitraum stets der Nutzungsdauer entspricht. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Nutzungsdauer zehn Jahre und nach VDI 2067 15 Jahre angesetzt.

Da sich die Gesamtannuitäten der KWK-Systeme und Altanlagen innerhalb des Betrachtungszeitraums ändern können¹⁷, beziehen sich die angefügten Kosten auf die Differenz zwischen der im Betrachtungszeitraum anfallenden Gesamtzahlungen der KWK-Systeme und der Altanlagen. In der dargestellten Abbildung sind für die Differenzzahlungen durch die oberen und unteren Grenzen der grauen Felder die Standardabweichungen der mittleren Zahlungen gegeben. Dementsprechend stellt das Zentrum eines grauen Felds den Mittelwert aller betrachteten Differenzzahlungen dar. Die an den Feldern angefügten Linien markieren hingegen die höchsten und niedrigsten Differenzzahlungen der analysierten Systeme. Ferner ist in der Abbildung in Grün der Bereich markiert, für den der Austausch des Altsystems wirtschaftlich sinnvoll war.

¹⁷ Die Gesamtannuität der KWK-Systeme ändert sich nach 10 Jahren aufgrund wegfallender Erlöse (s. Kapitel 3.3.5). Die Gesamtannuität der Altanlagen ist davon abhängig ob die betrachtete Anlage innerhalb des Betrachtungszeitraums ihre Nutzungsdauer erreicht hat (siehe Abbildung 70).

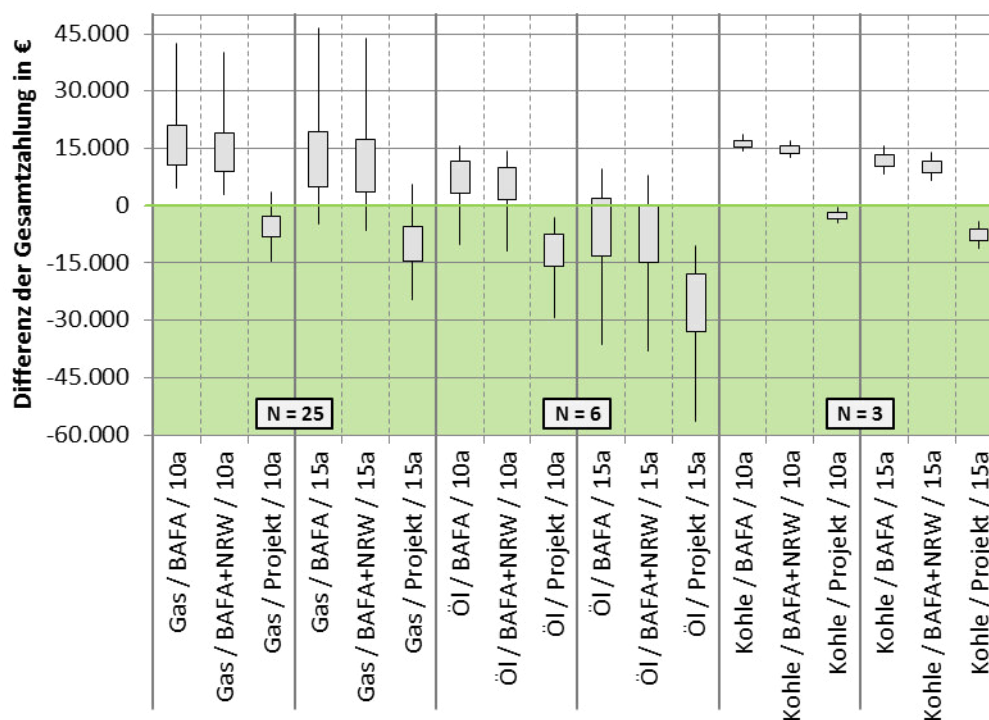


Abbildung 72: Gesamtheitliche Betrachtung aller 34 bilanzierten Anlagen für verschiedene Berechnungsszenarien. Die angefügten Kosten beziehen sich auf die Differenz zwischen der im Betrachtungszeitraum anfallenden Gesamtzahlungen der KWK-Systeme und Altanlagen. In der dargestellten Abbildung sind für die Differenzzahlungen durch die oberen und unteren Grenzen der grauen Felder die Standardabweichungen der mittleren Zahlungen gegeben. Dementsprechend stellt das Zentrum eines grauen Feldes den Mittelwert aller betrachteten Differenzzahlungen dar. Die an den Feldern angefügten Linien markieren hingegen die höchsten und niedrigsten Differenzzahlungen der analysierten Systeme. Ferner gibt N die Anzahl der bilanzierten Systeme für das jeweilige Szenario an. Die grüne Markierung stellt den Bereich dar, in den der Austausch des Altsystems wirtschaftlich sinnvoll war. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Die Analyse zeigt, dass auf Projektebene alle installierten KWK-Systeme im Mittel unabhängig vom ersetzten Energieträger sowie der angesetzten Nutzungsdauer im Vergleich zu den Altssystemen wirtschaftlich sinnvoll sind. Auf Bundes- und Landesebene sind nur die ersetzten Öl-Heizkessel mit einer Nutzungsdauer von 15 Jahren im Mittel finanziell besser gestellt als die Altssysteme. Des Weiteren existiert auf diesen Ebenen im günstigsten Fall einer ersetzten Öl-Anlage auch bei der verkürzten Nutzungsdauer von 10 Jahren ein wirtschaftlicher Vorteil durch die Installation des KWK-Systems. Gleiches gilt für den Energieträger Erdgas und einer Nutzungsdauer von 15 Jahren.

Generell ist zu erkennen, dass mit zunehmender Lebensdauer der KWK-Systeme die Gesamtannuität abnimmt und die Systeme sich im wirtschaftlichen Sinne verbessern. Dieser Verlauf ist nicht überraschend, da durch eine erhöhte Nutzungsdauer die hohen Investitionskosten über einen längeren Zeitraum verteilt bzw. abgeschrieben werden. Da die Lebensdauer abhängig von der Fahrweise des KWK-Systems ist und hierzu keine Langzeitstudien existieren, ist an dieser Stelle keine Aussage über die zu erwartenden Lebensdauern im Demonstrationsprojekt möglich.

Die Betrachtung der ersetzten 25 Erdgas-Heizungsanlagen ergibt, dass die Differenzzahlungen eine starke Streuung vorweisen. Es existiert gerade eine große Differenz zwischen den jeweiligen Mittel- und Höchstwerten. So ergibt sich z. B. für die Nutzungsdauer von 10 Jahren und einer Förderung auf Bundesebene eine Differenz von ca. 25.000 €. Diese starke Abweichung innerhalb der bilanzierten Systeme ist darauf zurückzuführen, dass in die Auswertung Mehrfamilienhäuser eingehen, die den vom KWK-System generierten Strom vollständig ins öffentliche Netz einspeisen. Die Eigennutzung des bereitgestellten KWK-Stroms entfällt in diesen Fällen zurzeit aufgrund des komplexen Abrechnungsverfahrens hinsichtlich des generierten KWK-Stroms und der strombeziehenden Bewohner. Durch das vollständige Einspeisen des KWK-Stroms entstehen zwar Einnahmen, allerdings richtet sich die Vergütung nach dem vorangegangenen Baseload-Preis der bei ca. 4 Ct/kWh liegt, sodass die Einnahmen gering ausfallen. Wird der Strom hingegen zur Eigenbedarfsdeckung genutzt, verdrängt dieser den aus dem öffentlichen Netz bezogene Strom, der mit ca. 28 Ct/kWh berechnet wird. Dieser Sachverhalt verdeutlicht die Wichtigkeit einer Erhöhung des Stromeigendeckungsanteils von KWK-Systemen, sodass die Untersuchung von stromgeführten KWK-Systemen oder auch einer Erweiterung der Systeme mit elektrischen Speichern entscheidene Erkenntnisse bezüglich einer wirtschaftlichen Optimierung von KWK-Systemen liefern würden.

Für den Energieträger Erdgas liegt die Differenz der Gesamtzahlungen für den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren auf Bundesebene im Mittel bei 15.760 €, auf Landesebene bei 14.050 € und auf Projektebene bei -5.435 €. Werden die oben beschriebenen Mehrfamilienhäuser aus der Bilanzierung genommen, reduzieren sich die mittleren Zahlungen auf 12.220 €, 10.634 € und -6.558 €. Der Einfluss dieser Mehrfamilienhäuser nimmt mit zunehmendem Betrachtungszeitraum zu. So liegt z. B. die mittlere Differenzzahlung für die Nutzungsdauer von 15 Jahre auf Bundesebene unter Berücksichtigung dieser Häuser bei 12.232 € und ohne bei 7.646 €.

Die Analyse der ersetzten Öl-Heizkessel weist im Gegensatz zum Energieträger Erdgas eine starke Abweichung zwischen der niedrigsten Gesamtzahlung und dem zugehörigen Mittelwert der jeweiligen Bilanzvariante auf. So liegt die Differenzzahlung z. B. für die Nutzungsdauer von 10 Jahren und einer Förderung auf Bundesebene bei ca. 17.000 €. Diese Abweichung ist dadurch begründet, dass die analysierten Öl-Altanlagen einen Fall enthalten, in dem der Betrieb des KWK-Systems im wirtschaftlichen Sinne sehr gut ist. Die KWK-Anlage mit einer thermischen Nennleistung von 2,5 kW wurde in ein Einfamilienhaus von 1975 installiert. Das Gebäude verfügt über eine Wohnfläche von ca. 325 m², die als Wohn- und Bürofläche genutzt wird, sodass ein hoher Nutzwärmebedarf von ca. 55.000 kWh sowie ein Strombedarf von ca. 5.000 kWh in dem betrachteten Jahr bestand. Aufgrund des hohen Wärmebedarfs und der relativ geringen thermischen Nennleistung von 2,5 kW erzielt die betrachtete KWK-Anlage die Volllaststunden von ca. 6.900 Stunden. Hierbei gilt es zu beachten, dass die KWK-Anlage ca. die Nutzwärme von 17.300 kWh bereitstellt und die restliche Wärme vom Zusatzheizgerät aufgebracht wird. Des Weiteren wird die hohe Betriebszeit der KWK-Anlage in diesem Objekt durch die Kombination Wohnen und GHD bezüglich des generierten KWK-Stroms sehr gut genutzt. So beträgt der Stromeigennutzungsanteil 45 % und der Stromdeckungsanteil 60 %. Hierdurch reduzieren sich die Strombezugskosten von ca. 2.000 €/a auf ca. 700 €/a.

Nimmt man in die Bilanz der Strombezugskosten noch die kontinuierlichen Erlöse (siehe Kapitel 3.3.5) hinzu, entfallen die Kosten für den Strom aus dem öffentlichen Netz vollständig.

Der Einfluss dieses Objekts auf die Bilanzierung aller ersetzten Heizöl-Systeme ist ähnlich stark wie für den Energieträger Erdgas. Diese Auswirkungen liegen darin begründet, dass die Anzahl der bilanzierten Systeme klein ist. Um den Einfluss auf die ökonomischen Ergebnisse durch die signifikant abweichenden Systeme darzustellen, sind in Abbildung 73 die Auswertung der Bilanz ohne diese Anlagen angefügt.

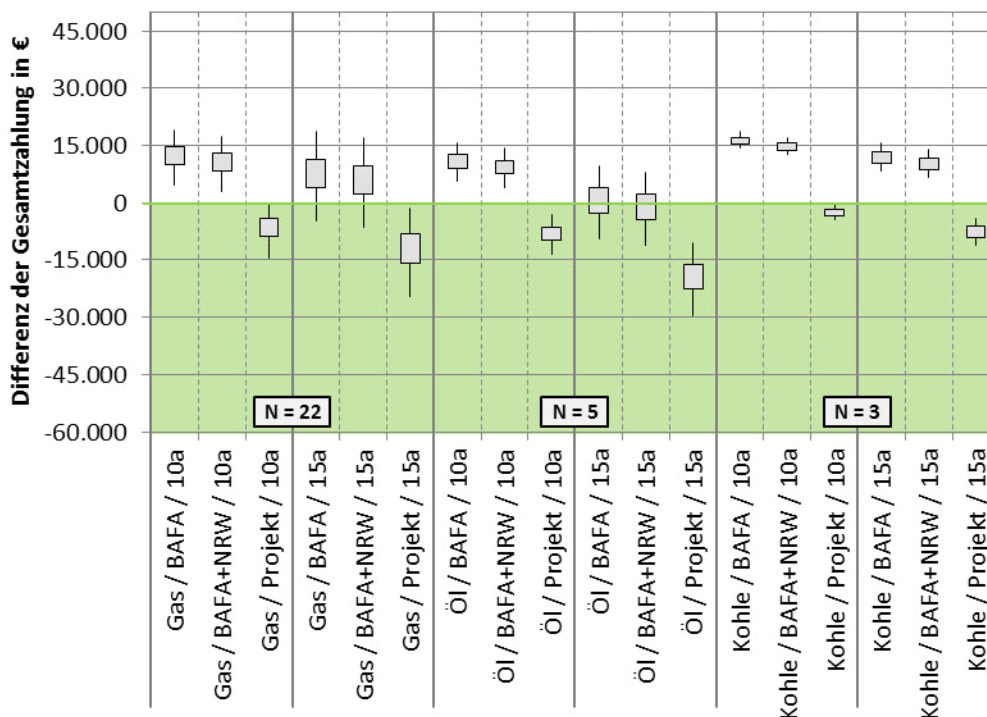


Abbildung 73: Gesamtheitliche Betrachtung von 30 bilanzierten Anlagen für verschiedene Berechnungsszenarien. In der dargestellten Bilanzierung wurden im Vergleich zu Abbildung 72 drei Systeme in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese besonders stark von den restlichen analysierten Anlagen abweichen. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Die Analyse der Mittelwerte aus Abbildung 73 zeigt, dass das Ersetzen einer Erdgas-Anlage im Vergleich zu einer mit Heizöl betriebenen Anlage für die Nutzungsdauer von 10 Jahren auf allen Ebenen mit einer Mehrinvestition von ca. 1.500 € verbunden ist. Mit zunehmenden Betrachtungszeitraum nimmt dieser Betrag für alle Förderebenen sogar auf ca. 7.000 € zu. Diese Mehrkosten liegen darin begründet, dass in den Berechnungen von einer stärkeren Preissteigerung für den Energieträger Öl ausgegangen wird als für Erdgas. So liegt die Preiszunahme in der Bilanzierung für Heizöl bei 4 % und für Erdgas bei 1,1 % (siehe Tabelle 27). Der Vergleich zwischen den Energieträgerformen Erdgas und Kohle zeigt, dass auf allen Ebenen für den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren das Ersetzen einer Kohle-Anlage mit den Mehrkosten von ca. 4.000 € verbunden ist. Für den Betrachtungszeitraum von 15 Jahren steigt dieser Betrag auf ca. 4.300 € an. In diesem Fall ist der Einfluss auf die Mehrkosten durch steigende Energiepreise gering, da eine Preissteigerung von 1,1 % angenommen wird und die angesetzten Energiepreise eine ähnliche Größenordnung besitzen (siehe Tabelle 27).

Zum Zeitpunkt der Auswertung sind drei der sieben ersetzten Kohle-Anlagen berücksichtigt worden. Bei den bilanzierten Objekten handelt es sich um ähnliche Gebäudeklassen, in denen Stirling- und Ottomotor betriebene KWK-Systeme installiert wurden. Des Weiteren zeigen die erfassten Messdaten einen vergleichbaren Energiebedarf der Anwohner auf. Da die Auswertung des Energieträgers Kohle eine geringe Streuung aufweist, kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass die verschiedenen KWK-Systeme eine ähnliche Fahrweise besitzen, die mit ähnlichen Kosten verbunden sind. Hieraus lässt sich wiederum für die folgenden Betrachtungen ziehen, dass die erfassten und ausgewerteten Daten eine Übertragung der Ergebnisse auf weitere Ebenen (Bund, NRW, etc.) zu lassen.

3.3.7 Übergreifende Analysen und Diskussion

3.3.7.1 CO₂-Einsparungskosten

Um die CO₂-Einsparungskosten innerhalb des Projekts zu ermitteln, wird auf die ökonomische Bilanzierung des vorangegangenen Kapitels zurückgegriffen (siehe Kapitel 3.3.6). In dieser wurde für verschiedene Bilanzierungsvarianten die Differenz der Gesamtzahlungen bestimmt, die für die jeweiligen installierten KWK-Systeme in Relation zu den zuvor genutzten Heizkesseln innerhalb des Betrachtungszeitraums anfallen. Demzufolge beziehen sich die in der vorliegenden Arbeit ermittelten CO₂-Einsparungskosten auf die Kosten, die auf Seiten des Anlagenbetreibers anfallen.

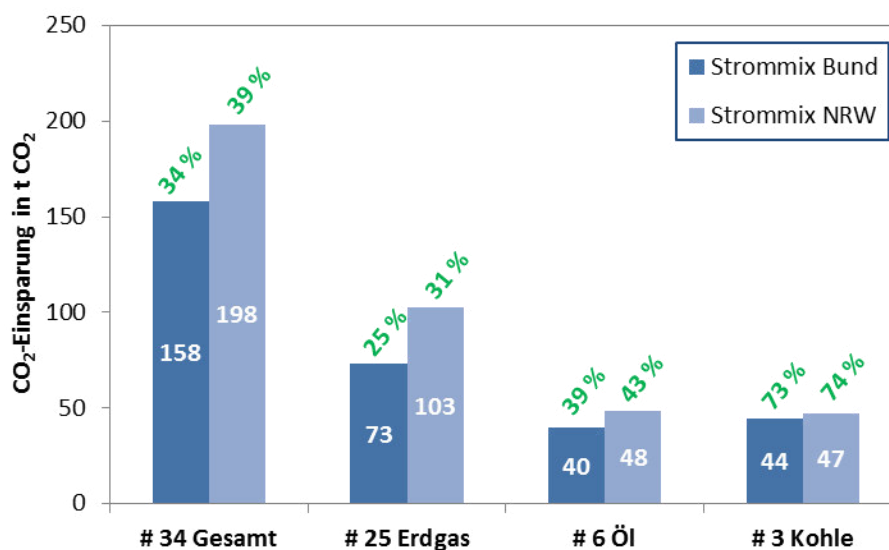


Abbildung 74: CO₂-Einsparungen der 34 ökonomisch bilanzierten KWK-Systeme für die Betrachtungsebenen Bundesrepublik (Strommix Bund) und NRW (Strommix NRW). Die Auswertung bezieht sich auf die erfassten Jahresdaten der 34 ersetzten Systeme und beinhaltet die in Kapitel 3.3.1 beschriebene Stromkorrektur bezüglich der erfassten Messdaten. Die bilanzierten KWK-Systeme haben 25 Erdgas-, 6 Öl- und 3 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt.

Die wirtschaftliche Auswertung in Kapitel 3.3.6 bezieht sich auf erfasste Jahresdaten von 34 ersetzten Systemen. Für diese Systeme und den analysierten Zeitraum gilt es, die erzielten CO₂-Einsparungen der KWK-Systeme in Bezug auf die ersetzten Altanlagen zu ermitteln. In Abbildung 74 ist die Auswertung der CO₂-Einsparungen für die Betrachtungsebenen Bundesrepublik (Strommix Bund) und NRW (Strommix NRW) dargestellt (siehe Kapitel 3.3.3). Die Analyse zeigt die CO₂-Einsparungen in Abhängigkeit von den Energieträgerformen, die von den zuvor installierten Heizkesseln genutzt wurden. Des Weiteren beinhaltet die angefügte Berechnung die in Kapitel 3.3.1 beschriebene Stromkorrektur der erfassten Messdaten.

Die in Abbildung 74 ermittelten CO₂-Einsparungen stellen die Einsparungen dar, die durch die installierten KWK-Systeme pro Jahr erzielt werden. Obwohl die ökologische und ökonomische Bilanzierung auf dieselbe Datengrundlage zurückgreift, bezieht sich die wirtschaftliche Betrachtung in Kapitel 3.3.6 auf den gesamten Betrachtungszeitraum, der für die Berechnungen angesetzt wurde (10 und 15 Jahre). Dies liegt darin begründet, dass die Gesamtannuität der betrachteten KWK-Systeme sowie der Altanlagen sich innerhalb des Betrachtungszeitraums ändern können (siehe Kapitel 3.3.5 und 3.3.6). Für die Analyse der CO₂-Einsparungskosten werden die Ergebnisse der wirtschaftlichen Betrachtung auf ein Jahr normiert, sodass die bestimmten jährlichen Kosten den ermittelten CO₂-Einsparungen aus Abbildung 74 gegenübergestellt werden können und eine Berechnung der CO₂-Einsparungskosten möglich ist.

In Abbildung 75 sind die Ergebnisse der Analyse zu den CO₂-Einsparungskosten zusammengefasst, die auf Seiten der KWK-Anlagenbetreiber durch das Ersetzen der Altanlage entstehen. Da die erzielten CO₂-Einsparungen sowie die anfallenden Kosten bezüglich des Systemwechsels abhängig von der ersetzten Energieträgerform (Altanlage) sind, muss bei der Auswertung der CO₂-Einsparungskosten diese Abhängigkeit miteinbezogen werden. Des Weiteren wurden die Berechnungen unter der Variation mehrerer Parameter durchgeführt, um die Einflüsse verschiedener Gegebenheiten bzw. Betrachtungsebenen in der Auswertung zu berücksichtigen.

So beschreiben die Diagrammüberschriften in Abbildung 75 (a) bis (f) die analysierte Energieträgerform sowie den Betrachtungszeitraum¹⁸, der für die wirtschaftliche Betrachtung angesetzt wurde. Des Weiteren sind mit den Beschriftungen BAFA, NRW und Projekt die verschiedenen Fördersituationen auf Bundes-, Landes- und Projektebene gekennzeichnet.

¹⁸ Der Betrachtungszeitraum entspricht in der Bilanzierung der angesetzten Nutzungsdauer der KWK-Anlage (siehe Kapitel 3.3.6).

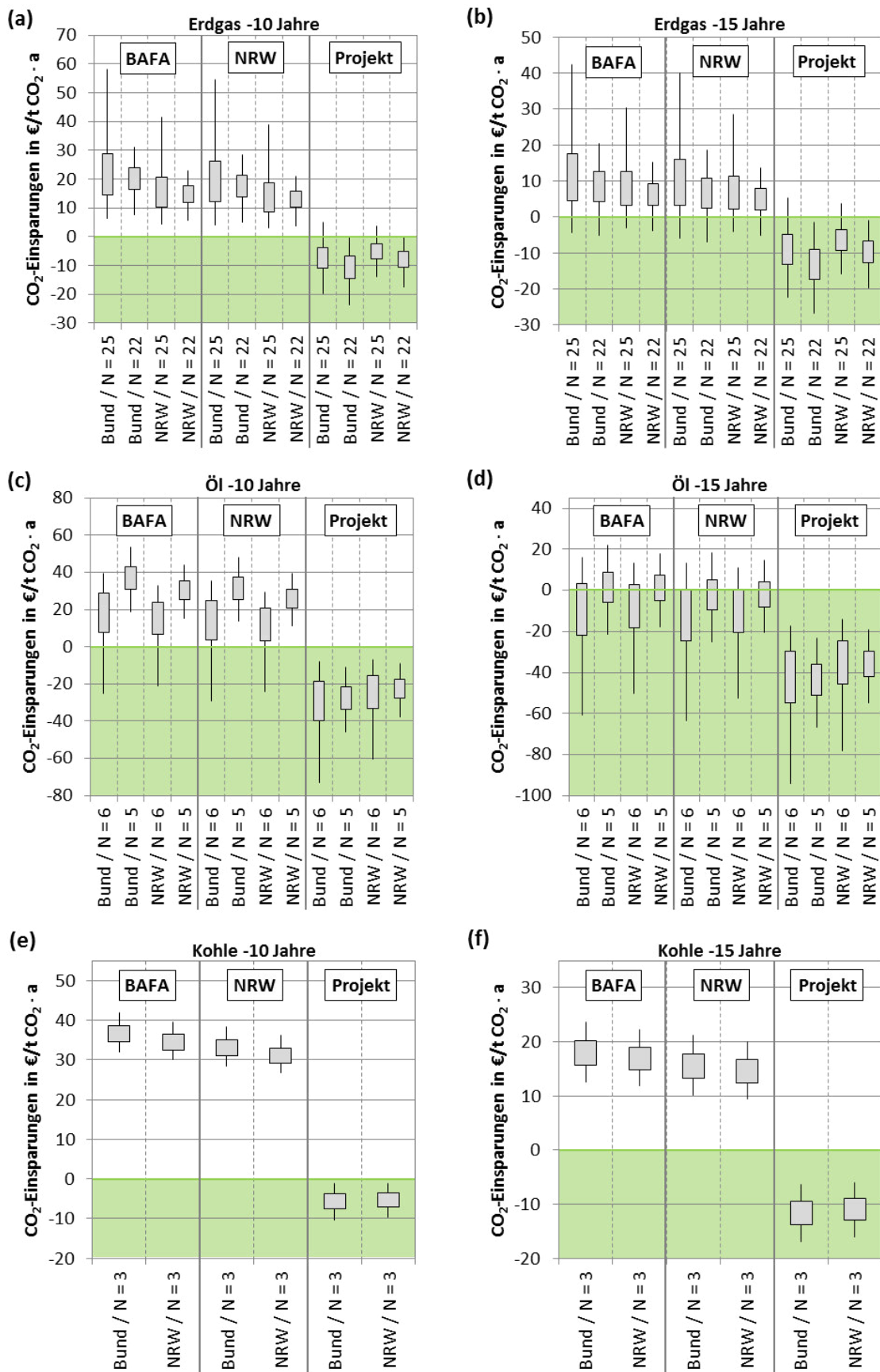


Abbildung 75: CO₂-Einsparungskosten in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform und der Kombination verschiedener Betrachtungsvarianten

Die Bezeichnungen an den Abszissen geben hingegen die Betrachtungsebene bezüglich der ökologischen Analyse an. Hierbei steht die Abkürzung Bund für die Berücksichtigung des deutschen Strommixes in der Bilanzierung und die Abkürzung NRW für die des Strommixes in NRW. Ferner gibt N die Anzahl der bilanzierten Systeme an. So findet in den Analysen zu den Energieträgern Erdgas und Öl eine Differenzierung bezüglich der Anzahl der betrachteten Systeme statt. Diese Differenzierung liegt darin begründet, dass die ökonomische Bilanzierung dieser Energieträger Systeme beinhaltet, die starke Abweichungen gegenüber den anderen bilanzierten Systemen aufweisen. So fällt für den Energieträger Erdgas die Gesamtannuität für drei Mehrfamilienhäuser besonders hoch aus, da diese den von der KWK generierten Strom vollständig ins öffentliche Netz einspeisen und nicht im Gebäude zur Eigenbedarfsdeckung nutzen. In der Bilanz der ersetzten Öl-Altanlagen existiert hingegen ein Fall, für welchen die Abstimmung zwischen KWK-System und Nutzerverhalten im wirtschaftlichen Sinne besonders günstig ist (siehe Kapitel 3.3.6).

Generell zeigt die Analyse der CO₂-Einsparungskosten, dass sich die Erkenntnisse aus der ökonomischen Analyse auf die Einsparungskosten überwiegend übertragen lassen. Dieses ist nicht verwunderlich, da die CO₂-Einsparungskosten direkt proportional zu den ökonomischen Ergebnissen aus Kapitel 3.3.6 sind. So ergibt die dargestellte Analyse, dass auf Projektebene die CO₂-Einsparungskosten negativ sind. Dies bedeutet, dass auf den Projektebenen unabhängig vom ersetzten Energieträger und Betrachtungszeitraum das Ersetzen des Altsystems wirtschaftlich vorteilhaft ist und in Relation zum Altsystem keine zusätzlichen Kosten für die Reduktion der CO₂-Emissionen entstehen (grüner Bereich in den Diagrammen). Des Weiteren entfallen unabhängig von der betrachteten Fördersituation im Mittel die CO₂-Einsparungskosten für ersetzte Öl-Heizkessel bei einem Betrachtungszeitraum von 15 Jahren. Hieraus ergibt sich, dass bei einer 15-jährigen Nutzungsdauer der KWK-Systeme durch den Wechsel eines alten Öl-Heizkessels auf Bundesebene ca. 40 % der emittierten CO₂-Emissionen eingespart werden können und hierbei in Relation zum Altsystem im Mittel keine zusätzlichen Kosten anfallen.

Abgesehen von der Fördersituation auf Projektebene und dem Energieträger Öl in Kombination mit dem Betrachtungszeitraum von 15 Jahren (siehe Abbildung 75 (d)), fallen für die Reduktion der CO₂-Emissionen durch den Technologiewechsel zusätzliche Kosten an. Hierbei fallen die CO₂-Einsparungskosten geringer aus, wenn für die ökologische Bewertung der Strommixes in NRW angesetzt wird. Dies liegt darin begründet, dass die CO₂-Einsparungen bei einer Substitution des Strommix in NRW höher ausfallen als auf Bundesebene und diese Werte invers in die Berechnung der CO₂-Einsparungskosten eingehen.

Unter Vernachlässigung der ökonomisch stark abweichenden Systeme ergibt der Vergleich der CO₂-Einsparungskosten in Abhängigkeit von dem ersetzten Energieträger, dass für den Betrachtungszeitraum von 10 Jahren die CO₂-Verminderungskosten für den Energieträger Erdgas am geringsten ausfallen. Die Kosten für die Energieträgerformen Kohle und Öl fallen ähnlich hoch aus, wobei in der Regel die CO₂-Einsparungskosten für ersetzte Kohle-Altanlagen etwas höher sind. Vergleicht man diese Verteilung mit den Resultaten der ökonomischen Bilanzierung aus Abbildung 73, wird deutlich, dass sich unter Einbezug der einge-

sparten CO₂-Emissionen die Kostenstruktur verschiebt. So stellt der Wechsel eines Öl-Heizkessels in einer reinen wirtschaftlichen Betrachtung den günstigsten und der einer Kohle-Altanlage den teuersten Fall dar. Bei einem Betrachtungszeitraum von 10 Jahren liegt die Differenz zwischen beiden Energieträgerformen im Mittel bei ca. 500 €/a. Unter Hinzunahme der CO₂-Einsparungen ergibt die Analyse, dass für die Fördersituation auf Landesebene und der Berücksichtigung des Strommixes in NRW die Kosten für den Energieträger Kohle im Mittel pro eingesparter Tonne CO₂ um 5 €/a höher ausfallen als für die Energieträgerform Öl (26 €/t CO₂·a) zu 31 €/t CO₂·a)). Werden hingegen die Fördersituation auf Bundesebene und der deutsche Strommix als Berechnungsgrundlage angesetzt, liegen die CO₂-Einsparungskosten der beiden Energieträger mit 34 €/t CO₂·a) gleich auf. Die Analyse zeigt somit, dass die Kosten für den Ersatz eines alten Kohle-Heizkessels im Vergleich zu den Energieträgern Erdgas und Öl am höchsten sind, jedoch ist im Hinblick auf das große CO₂-Einsparungspotenzial bezüglich der Substitution alter Kohle-Anlage ein Technologiewechsel sinnvoll.

3.3.7.2 Übertragung auf unterschiedliche Ebenen

KWK-Systeme besitzen ein enormes Potenzial bezüglich der Reduktion von CO₂-Emissionen. Weiterhin kann durch einen Technologiewechsel von alten Heizkesseln hin zu innovativen KWK-Systemen der Primärenergieeinsatz reduziert werden, sodass insgesamt durch den Einsatz von KWK-Systemen ein entscheidender Beitrag zur Erreichung der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung geleistet werden kann.

Um die Einsparungspotenziale von KWK-Systemen im häuslichen Sektor zu ermitteln, sollen die Ergebnisse aus dem Demonstrationsprojekt auf verschiedene Betrachtungsebenen übertragen werden. Hierbei werden zum einen die Potenziale auf Projektebene bestimmt, d.h. für alle 100 KWK-Systeme des Projekts, das Projektgebiet InnovationCity und der Gesamtstadt Bottrop. Zum anderen besteht in der vorliegenden Arbeit das Interesse an den Potenzialen, die sich auf Bundes- und der Landesebene NRW durch den Einsatz von KWK-Systemen ergeben.

Für die Übertragung ist die Datengrundlage von einem Jahr unabdingbar, da nur so die Fahrweise der KWK-Systeme in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen exakt erfasst wird. Aufgrund dessen werden für die vorliegende Analyse die Daten der 34 bilanzierten KWK-Systeme aus Kapitel 3.3.6 und 3.3.7.1 herangezogen.

3.3.7.3 Methodik zur Übertragung der Ergebnisse

Für die Übertragung der Ergebnisse auf die gewünschten Betrachtungsebenen wird genutzt, dass die Fahrweise der KWK-Systeme wärmegeführt ist. Dies hat zur Folge, dass der Wärmebedarf im Objekt die Fahrweise des KWK-Systems bestimmt. Mit der Approximation, dass das im Demonstrationsprojekt gezeigte bzw. erfasste Zusammenspiel zwischen KWK-Anlagen und Zusatzheizgerät bezüglich der Wärmebereitstellung bei der Übertragung der Ergebnisse bestehen bleibt, wird durch den Wärmebedarf der eingesetzte Brennstoffbezug definiert. Der Brennstoffbezug bestimmt wiederum die eingesetzte Primärenergie sowie die emittierten CO₂-Emissionen des KWK-Systems. Des Weiteren folgt, dass der Wärmebedarf die vom KWK-System bereitgestellte elektrische Energiemenge bestimmt, da es sich bei der

Wärme- und Strombereitstellung durch ein KWK-System um einen gekoppelten Prozess handelt. Demzufolge ist das KWK-System über die Vorgabe des Wärmebedarfs vollständig definiert und die generierte KWK-Strommenge, der Primärenergieeinsatz und die CO₂-Emissionen können hieraus abgeleitet werden.

Durch die Projektion des Wärmebedarfs und des generierten KWK-Stroms auf die zu ersetzende Altsysteme können für diese Systeme die Primärenergieeinsätze sowie die emittierten CO₂-Emissionen bestimmt werden. Mit der Approximation, dass die zu ersetzenden Altanlagen auf den jeweiligen Betrachtungsebenen dieselbe Struktur bzw. Effizienz vorweisen wie die Altanlagen im Demonstrationsprojekt, können die Primärenergieeinsätze und die CO₂-Emissionen der Altsysteme aus den Projektdaten direkt abgeleitet werden.

Die im Projekt erfassten Energiemengen und Emissionen für die 34 bilanzierten Systeme sind in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform in Tabelle 35 zusammengefasst. Die Normierung der Daten auf die von den KWK-Systemen bereitgestellten Wärmemengen bildet unter Berücksichtigung der oben angeführten Approximationen den Übertragungsschlüssel, um die Resultate aus dem Projekt auf die gewünschte Betrachtungsebene zu projizieren.

Tabelle 35: Erfasste Jahresdaten von 34 KWK-Systemen sowie Ergebnisse der ökologischen Bilanzierung dieser KWK-Systeme und der zuvor genutzten konventionellen Energieversorgung. Die bilanzierten KWK-Systeme haben 25 Erdgas-, 6 Öl- und 3 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt.

Energieträger	KWK-Systeme					Altsysteme – Strommix Bund		Altsysteme – Strommix NRW
	Wärme	Strom	Erdgas	CO ₂ - Emission	PE- Energieeinsatz	CO ₂ - Emission	PE- Energieeinsatz	CO ₂ -Emission
	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(t CO ₂)	(MWh)	(t CO ₂)	(MWh)	(t CO ₂)
Erdgas	714	122	937	226	1058	299	1375	328
Öl	205	34	261	63	295	103	395	111
Kohle	52	11	69	17	77	61	164	64
Gesamt	970	168	1266	305	1431	463	1934	503

Um die CO₂-Einsparungspotenziale auf den verschiedenen Betrachtungsebenen zu bestimmen, gilt es noch den Wärmebedarf der jeweiligen Ebene im häuslichen Sektor zu ermitteln. Des Weiteren ist für die jeweils betrachtete Ebene die Kenntnis über die Verteilung der Heizungstechnologien im Hinblick auf die eingesetzte Energieträgerform erforderlich, da die CO₂-Einsparungen stark vom ersetzten Energieträger abhängen. Mit der Kenntnis über die Verteilung der Heizungstechnologien kann der Anteil der jeweiligen Energieträgerform an der gesamten Wärmebereitstellung der jeweiligen Betrachtungsebene approximiert werden. Unter der Hinzunahme der aus den Projektdaten ermittelten normierten Faktoren können dann die CO₂- und Primärenergieeinsparungen der jeweiligen Energieträgerform und Betrachtungsebene bestimmt werden. Im Folgenden wird zunächst auf die Ermittlung des Wärmebedarfs sowie die Verteilung der entsprechenden Wärmebereitstellung auf die unterschiedlichen Energieträgerformen im häuslichen Sektor eingegangen. Im Anschluss werden die Resultate aus dem Demonstrationsprojekt und die ermittelten Wärmebedarfe genutzt, um die ökologischen Einsparungspotenziale auf den verschiedenen Betrachtungsebenen zu bestimmen.

Wärmebedarf und Energieträgerform abhängige Bereitstellungsverteilung

Die Ermittlung des Wärmebedarfs im häuslichen Sektor und die entsprechende Verteilung auf die verschiedenen Energieträger bezüglich der anteiligen Wärmebereitstellung, erfordert für die unteren Betrachtungsebenen Bottrop und das Projektgebiet InnovationenCity den Übertrag eines Teilergebnisses aus der oberen Betrachtungsebene NRW.

Bundesebenen

Um den Wärmebedarf auf Bundesebene zu ermitteln wird auf die erfassten Daten „Bauen und Wohnen“ des Mikrozensus von 2010 [35] zurückgegriffen. Diese Erhebung beinhaltet eine Auswertung der bewohnten Wohnungen in Abhängigkeit der Altersstruktur. Es werden Angaben zur Anzahl der bewohnten Wohnungen bezüglich des Baujahrs und der durchschnittlichen Wohnfläche der Wohnungen auf Bundesebene gemacht. Diese Angaben ermöglichen es, die Wohnfläche in Abhängigkeit von dem Jahr der Errichtung zu bestimmen. Nutzt man weiterhin die erstellte Datenbank „TABULA“ vom Institut Wohnen und Umwelt [36], die die Gebäudetypologien zur energetischen Bewertung des Wohngebäudebestands in Deutschland beinhaltet (siehe Kapitel 3.1.2), kann für die berechneten Wohnflächen auf Bundesebene der Wärmebedarf bestimmt werden. So beinhaltet die TABULA-Datenbank in Abhängigkeit von der Errichtung und Gebäudeklasse den spezifischen Jahreswärmebedarf, der den jährlichen Wärmebedarf eines Gebäudetyps pro Quadratmeter angibt. Bei der Auswertung des Wärmebedarfs ist zu beachten, dass die Altersunterteilung der Wohngebäude im Mikrozensus nicht mit der in der TABULA-Datenbank übereinstimmt. Des Weiteren findet in der Datenbank des Mikrozensus keine Einteilung in Gebäudeklassen statt. Um die spezifischen Wärmebedarfe aus der TABULA-Datenbank auf die Datenstruktur des Mikrozensus anwenden zu können, wurden diese unter Berücksichtigung der Altersunterteilung im Mikrozensus über alle Gebäudeklassen gemittelt. In Tabelle 36 sind die Ergebnisse des ermittelten Wärmebedarfs auf Bundesebene gemeinsam mit dem angesetzten spezifischen Wärmebedarfen zusammengefasst.

Tabelle 36: Ermittlung des Wärmebedarfs der bewohnten Wohngebäude auf Bundesebene mittels des Mikrozensus von 2010 [35] und der TABULA-Datenbank vom Institut Wohnen und Umwelt [36]

Wohngebäude von ... bis ... errichtet	Anzahl in 1000	Wohnfläche in m ²	Spezifischer Wärmebedarf ¹⁹ in kWh/(a·m ²)	Wärmebedarf in GWh/a
bis 1918	5.154	474.683.400	145	68.843
1919 – 1948	4.647	427.988.700	135	57.671
1949 – 1978	16.793	1.546.635.300	125	193.677
1979 – 1986	3.775	347.677.500	100	34.799
1987 – 1990	1.017	93.665.700	98	9.206
1991 – 2000	2.955	272.155.500	93	25.195
2001 – 2004	908	83.626.800	76	6.314
2005 – 2008	706	65.022.600	64	4.171
2009 und später	132	12.157.200	69	836
Summe	36.089	3.323.796.900	-	400.711

¹⁹ Gemittelte Werte der spezifischen Wärmebedarfe der TABULA-Datenbank [36], um die Daten an die Unterteilung der Wohngebäude im Mikrozensus [35] anzupassen.

Die Auswertung auf Bundesebene ergibt einen Gesamtwärmebedarf bezüglich der bewohnten Wohngebäude von 400.711 GWh/a. Dieser Wärmebedarf wird mit verschiedenen Energieträgerformen bereitgestellt. Für die Ermittlung der CO₂-Einsparungen durch den Einsatz von KWK-Systemen gilt es, den Anteil der jeweiligen Energieträgerform an der Wärmebedarfsdeckung zu bestimmen. Für diese Aufteilung wird die Datenerhebung des Mikrozensus 2010 herangezogen und die Anzahl der „überwiegend verwendeten Energieart der Beheizung“ ausgewertet. In Tabelle 37 ist der Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) dargestellt.

Tabelle 37: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf Bundesebene. Die Auswertung wurde Anhand der Datenerhebung des Mikrozensus 2010 bezüglich der „überwiegend verwendeten Energieart der Beheizung“ und des ermittelten Gesamtwärmebedarfs aus Tabelle 36 durchgeführt.

Energieträgerform / Technologie	Anteile an Wärmebereitstellung in %	Wärmebedarf in GWh/a
Fernwärme	13,1	52.627
Gas	48,6	194.787
Elektrizität (Strom)	4,0	15.866
Heizöl	28,1	112.682
Kohle	0,8	3.131
Holz, Holzpellets	3,5	13.967
Biomasse (außer Holz), Biogas	0,1	233
Sonnenenergie	0,1	255
Erd- und andere Umweltwärme	0,7	2.987
ohne Angabe	1,0	4.175
Gesamt	100	400.711

Landesebene – NRW

Der Mikrozensus 2010 beinhaltet nicht nur die Datenerhebung für Gesamtdeutschland, sondern auch eine Auflösung dieser Datensätze für die einzelnen Bundesländer. Diese Daten wurden für das Bundesland NRW analog zum Vorgehen auf Bundesebene ausgewertet, um den Wärmebedarf sowie die Verteilung der entsprechenden Wärmebereitstellung auf die unterschiedlichen Energieträgerformen bestimmen zu können. In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Auswertung dargestellt.

Tabelle 38: Ermittlung des Wärmebedarfs der bewohnten Wohngebäude auf Landesebene NRW mittels des Mikrozensus von 2010 [22] und der TABULA-Datenbank vom Institut Wohnen und Umwelt [23]

Wohngebäude von ... bis ... errichtet	Anzahl in 1000	Wohnfläche in m ²	Spezifischer Wärmebedarf ²⁰ in kWh/(a·m ²)	Wärmebedarf in GWh/a
bis 1918	826	75.166.000	145	10.901
1919 – 1948	907	82.537.000	135	11.122
1949 – 1978	4.242	386.022.000	125	48.340
1979 – 1986	778	70.798.000	100	7.086
1987 – 1990	136	12.376.000	98	1.216
1991 – 2000	405	36.855.000	93	3.412
2001 – 2004	191	17.381.000	76	1.312
2005 – 2008	155	14.105.000	64	905
2009 und später	27	2.457.000	69	169
Summe	7.666	697.606.000	-	84.463

Tabelle 39: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf Landesebene NRW. Die Auswertung wurde anhand der Datenerhebung des Mikrozensus 2010 bezüglich der „überwiegend verwendeten Energieart der Beheizung“ und des ermittelten Gesamtwärmebedarfs aus Tabelle 37 durchgeführt.

Energieträgerform / Technologie	Anteile an Wärmebereitstellung in %	Wärmebedarf in GWh/a
Fernwärme	8,5	7.209
Gas	60,2	50.841
Elektrizität (Strom)	5,3	4.476
Heizöl	22,2	18.773
Kohle	0,7	584
Holz, Holzpellets	1,1	926
Erd- und andere Umweltwärme	0,6	540
ohne Angabe	1,3	1.113
Gesamt	100	84.463

Bottrop

Der Mikrozensus 2010 beinhaltet nicht die Auflösung der erhobenen Daten auf Gemeindeebene, sodass dieser nicht für die Auswertung des Wärmebedarfs auf der Betrachtungsebene Bottrop herangezogen werden kann. Für die Ermittlung des Wärmebedarfs wurde deshalb auf den Zensus von 2011 [37] zurückgegriffen, der über eine Datenerhebung auf Gemeindeebene verfügt. Für die vorliegende Auswertung können aus dieser Datenerhebung nur die Anzahl der Wohnungen in Abhängigkeit von dem Baujahr verwendet werden. So fehlen in dem Datensatz die Informationen über die durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung und der Verteilung der eingesetzten Energieträgerformen zur Deckung des Wärmebedarfs. Die durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung in Bottrop konnte aus einem beauftragten

²⁰ Gemittelte Werte der spezifischen Wärmebedarfe der TABULA-Datenbank [36], um die Daten an die Unterteilung der Wohngebäude im Mikrozensus [35].

Klimabericht der Stadt Bottrop [38] entnommen werden. Eine fundierte Datenerhebung, die die Verteilung der eingesetzten Energieträgerformen zur Deckung des Wärmebedarfs beinhaltet, ist zurzeit jedoch nicht verfügbar. Man kann allerdings davon ausgehen, dass die Verteilung auf der Ebene Bottrop annähernd der in NRW entspricht. Diese Approximation wird für die Auswertung in der Form genutzt, dass der für Bottrop ermittelte Wärmebedarf mit dem Verteilungsschlüssel der Landesebene NRW auf die verschiedenen Energieträgerformen bezüglich der Deckung des Wärmebedarfs angesetzt wird. Die Ergebnisse der Auswertung der Betrachtungsebene Bottrop sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 40: Ermittlung des Wärmebedarfs der bewohnten Wohngebäude auf Gemeindeebene Bottrop mittels des Zensus von 2011 [37], der TABULA-Datenbank vom Institut Wohnen und Umwelt [23] und der Anagbe zur durchschnittlichen Wohnfläche aus [38]

Wohngebäude von ... bis ... errichtet	Anzahl in 1000	Wohnfläche in m ²	Spezifischer Wärmebedarf ²¹ in kWh/(a·m ²)	Wärmebedarf in MWh/a
bis 1918	6.988	542.269	145	78.645
1919 – 1948	5.014	389.086	135	52.429
1949 – 1978	28.849	2.238.682	125	280.339
1979 – 1986	5.069	393.354	100	39.370
1987 – 1990	2.492	193.379	98	19.006
1991 – 1995	2.862	222.091	93	20.560
1996 – 2000	3.368	261.357	87	22.703
2001 – 2004	1.637	127.031	76	9.591
2005 – 2008	1.306	101.346	64	6.500
2009 und später	628	48.733	69	3.349
Insgesamt	58.213	5.297.383	-	532.494

Tabelle 41: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf der Gemeindeebene Bottrop. Für die Auswertung wurde der Verteilungsschlüssel der Landesebene NRW bezüglich der anteiligen Wärmebereitstellung der jeweiligen Energieträgerform auf den ermittelten Wärmebedarf für die Gemeinde Bottrop aus Tabelle 40 angewendet.

Energieträgerform / Technologie	Anteile an Wärmebereitstellung in %	Wärmebedarf in MWh/a
Fernwärme	8,5	45.452
Gas	60,2	320.525
Elektrizität (Strom)	5,3	28.216
Heizöl	22,2	118.355
Kohle	0,7	3.683
Holz, Holzpellets	1,1	5.838
Erd- und andere Umweltwärme	0,6	3.405
ohne Angabe	1,3	7.019
Gesamt	100	532.494

²¹ Gemittelte Werte der spezifischen Wärmebedarfe der TABULA-Datenbank [36], um die Daten an die Unterteilung der Wohngebäude im Mikrozensus [35].

InnovationCity

Die Projektebene InnovationCity bildet eine spezifische Zusammensetzung aus sechs Stadtteilen²² der Stadt Bottrop, sodass für diesen speziellen Fall die benötigten Daten zur Auswertung des Wärmebedarfs nicht direkt zugänglich sind. In Kapitel 3.1 wurde für die Auswahl der 10 Referenzgebäude die im Projektgebiet InnovationCity vorliegende Gebäudetypologie analysiert und eine Unterteilung nach Baualtersklasse und Gebäudetypp durchgeführt, die der entwickelten Zuordnung des Instituts Wohnen und Umwelt entspricht (siehe Tabelle 8 und Tabelle 10). Diese Auswertung bildet die Grundlage für die Ermittlung des Gesamtwärmebedarfs im Projektgebiet InnovationCity. Da die TABULA-Datenbank des Instituts Wohnen und Umwelt keine Daten zur durchschnittlichen Wohnfläche für die jeweiligen unterteilten Gebäudetypen beinhaltet, wurden diese aus einer Hochrechnung zur deutschen Gebäudetypologie des Instituts Wohnen und Umwelt [39] abgeleitet. Mit den gegebenen Parametern zur Anzahl der Wohnungen, den durchschnittlichen Wohnflächen und den spezifischen jährlichen Wärmebedarfen wurde der jährliche Wärmebedarf für das Projektgebiet zu 316.650 MWh/a bestimmt. Für die Projektebene wird, wie für die Gemeindeebene Bottrop, der Verteilungsschlüssel der Landesebene NRW bezüglich der anteiligen Deckung des Gesamtwärmebedarfs in Abhängigkeit von der Energieträgerform angesetzt. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse bezüglich des Wärmebedarfs für das Projektgebiet InnovationCity zusammengefasst.

Tabelle 42: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf der Projektebene InnovationCity. Für die Auswertung wurde der Verteilungsschlüssel der Landesebene NRW bezüglich der anteiligen Wärmebereitstellung der jeweiligen Energieträgerform angesetzt.

Energieträgerform / Technologie	Anteile an Wärmebereitstellung in %	Wärmebedarf in MWh/a
Fernwärme	8,5	27.028
Gas	60,2	190.602
Elektrizität (Strom)	5,3	16.779
Heizöl	22,2	70.380
Kohle	0,7	2.190
Holz, Holzpellets	1,1	3.471
Erd- und andere Umweltwärme	0,6	2.025
ohne Angabe	1,3	4.174
Gesamt	100	316.650

„100 KWK-Anlagen in Bottrop“

Die Datenlage in diesem Projekt lässt zurzeit für eine Auswertung von erfassten Jahresdaten die Bilanzierung von 34 KWK-Systemen zu. Für die Ermittlung der CO₂- und Primärenergieeinsparungen innerhalb des Projekts (Zeitintervall ≠ 1 Jahr) konnten insgesamt 52 Systeme bilanziert werden. Für eine Vergleichbarkeit sowie Übertragung der Ergebnisse ist jedoch ein Bezug der Daten auf den Zeitraum von einem Jahr erforderlich. Aufgrund dessen werden in der vorliegenden Arbeit die Ergebnisse der 34 bilanzierten Systeme auf die restlichen 66 Sys-

²² Das Projektgebiet InnovationCity Ruhr beinhaltet in der Stadt Bottrop die Innenstadt sowie die Stadtteile Batenbrock, Boy, Lehmkuhle, Ebel, Welheimer Mark sowie Teile von Welheim.

teme hochgerechnet, sodass für die 100 installierten KWK-Systeme eine Bilanzierung vorliegt. Um die jährliche Wärmebereitstellung der nicht bilanzierten 66 KWK-Systeme zu approximieren, wird auf die Angaben der Betreiber bezüglich des Wärmebedarfs bzw. Energiebezugs zur Wärmebereitstellung zurückgegriffen (siehe Kapitel 3.1.1). Für die Fälle, in denen keine Angaben zum Energiebezug vorlagen, wurde anhand der Gebäudeklasse mittels des spezifischen Wärmebedarfs aus der TABULA-Datenbank der Wärmebedarf des Objekts abgeleitet. Für die 66 Objekte bzw. installierten KWK-Systeme ergibt sich der Wärmebedarf in Abhängigkeit von dem ersetzten Energieträger wie folgt.

Tabelle 43: Wärmebedarf der nicht bilanzierten 66 Objekte bzw. installierten KWK-Systeme. Der Wärmebedarf wurde aus den Angaben der Betreiber bezüglich des Energiebezugs zur Wärmebereitstellung abgeleitet. Falls hierzu keine Angaben vorlagen wurde der Wärmebedarf anhand der Gebäudeklasse mittels des spezifischen Wärmebedarfs aus der TABULA-Datenbank bestimmt.

Energieträger	Wärmebedarf in MWh/a
Gas	1.578
Heizöl	337
Kohle	135
Strom	86
Flüssiggas	36
Gesamt	2.171

3.3.7.4 Ergebnisse der Übertragung

Bei der Übertragung der Resultate aus dem Demonstrationsprojekt auf andere Betrachtungsebenen mittels des ermittelten Übertragungsschlüssel aus Kapitel 3.3.7.3 ist zu berücksichtigen, dass sich die messtechnisch erfassten Eigenschaften der KWK-Systeme sowie die Analysen und Annahmen zu den ersetzten Altanlagen auf die betrachteten Ebenen projizieren. Demzufolge übertragen sich die aus den Analysen ausgearbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse auf die jeweiligen Betrachtungsebenen. Aus diesem Grund beschränkt sich die folgende Untersuchung im Wesentlichen auf die graphische Darstellung der Ergebnisse, die durch die Übertragung der im Demonstrationsprojekt analysierten Systeme auf die verschiedenen Betrachtungsebenen resultieren. Für eine detaillierte Analyse und Diskussion der Einsparungspotenziale, die durch das Ersetzen von Altanlagen mittels KWK-Systemen bestehen, sei deshalb an dieser Stelle auf die angefügten Analysen in den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 verwiesen.

„100 KWK-Anlagen in Bottrop“

In Abbildung 76 sind die Energiemengen dargestellt, die von den 100 installierten KWK-Systemen im Projekt pro Jahr generiert werden. Die bereitgestellte Wärme setzt sich hierbei aus den messtechnisch erfassten Jahresdaten der 34 KWK-Systeme und dem ermittelten Wärmebedarf der restlichen 66 Objekte aus Tabelle 43 zusammen. Aus dem Wärmebedarf der 66 KWK-Systeme wurde mit dem ermittelten Übertragungsschlüssel (siehe Kapitel 3.3.7.3) die von diesen Systemen generierte elektrische Energie abgeleitet. Die Summe über diese Energiemengen und der elektrischen Energie der 34 messtechnisch erfassten Systeme stellt die generierte elektrische Energie aller 100 KWK-Anlagen pro Jahr dar.

Die ersetzten Altanlagen beinhalten im Projekt nur eine Flüssiggas und zwei Strom betriebene Altanlagen, sodass für diese Energieträger der generierte Strom und die Wärmebereitstellung im Vergleich zu den anderen Energieträgerformen gering ausfallen. Um die bereitgestellten Energiemengen dieser Energieträger gemeinsam mit den anderen Energieträgern darstellen zu können, wurden diese in Abbildung 76 um einen Faktor zehn vergrößert. Der größte Anteil der ersetzten Altanlagen wurde mit Erdgas betrieben. Insgesamt wurden 74 Erdgas betriebene Altanlagen durch neue KWK-Systeme innerhalb des Projekts ersetzt. Demzufolge stellt die Energieträgerform Erdgas den größten Anteil an der Wärme- und Strombereitstellung bezüglich der 100 installierten KWK-Systeme dar. Die Analyse der 100 Systeme zeigt, dass die installierten Systeme pro Jahr insgesamt die Wärme von 3.142 MWh bereitstellen und hierbei pro Jahr die elektrische Energie von 714 MWh generieren. Um die CO₂- und Primärenergieeinsparungen der installierten KWK-Systeme zu ermitteln, werden die von den KWK-Systemen bereitgestellten Energiemengen auf die zuvor genutzten konventionellen Energieversorgungssysteme projiziert (siehe Abbildung 60).

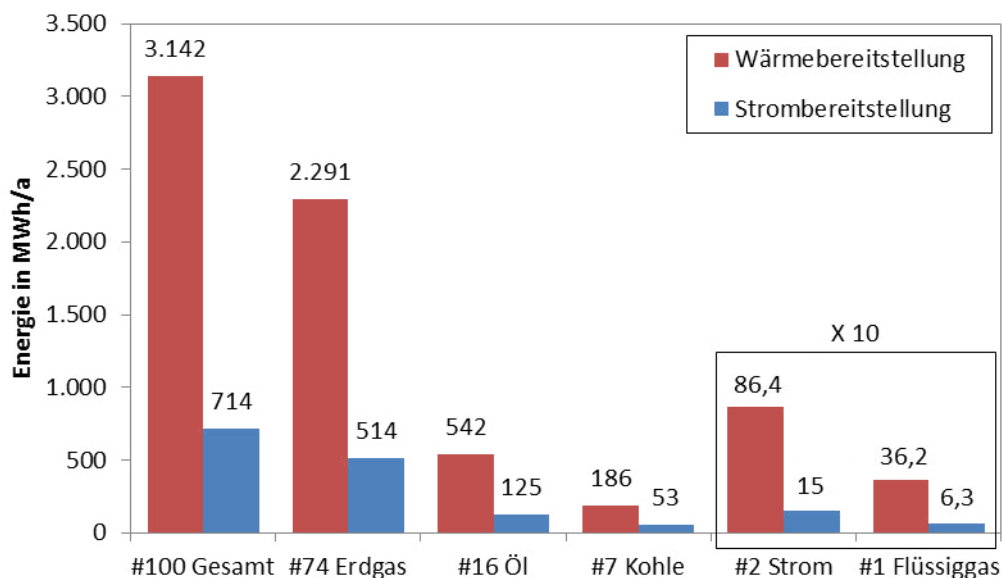


Abbildung 76: Wärme- und Strombereitstellung der 100 installierten KWK-Systeme im Projekt pro Jahr. Die bereitgestellte Wärme setzt sich aus den messtechnisch erfassten Jahresdaten der 34 KWK-Systeme und dem ermittelten Wärmebedarf der restlichen 66 Objekte aus Tabelle 43 zusammen. Aus dem Wärmebedarf der 66 KWK-Systeme wurde mit dem ermittelten Übertragungsschlüssel (siehe Kapitel 3.3.7.3) die von diesen Systemen generierte elektrische Energie abgeleitet. Die Summe über diese Energiemengen und der elektrischen Energie, der 34 messtechnisch erfassten Systeme, stellt die generierte elektrische Energie aller 100 KWK-Anlagen pro Jahr dar. Zu beachten ist, dass die bereitgestellten Energiemengen der Energieträger Strom und Flüssiggas um den Faktor zehn vergrößert dargestellt sind.

In Abbildung 77 ist die Analyse zur CO₂-Einsparung der 100 KWK-Systeme gegenüber der zuvor genutzten konventionellen Energieversorgung zusammengefasst. Hierbei konnten für die Energieträgerformen Erdgas, Öl und Kohle die Ergebnisse direkt aus der Wärmebereitstellung dieser Energieträger mittels der ermittelten Wärme normierten Faktoren hochgerechnet werden. Für die Berechnung der Einsparungen bezüglich der Energieträger Strom und Flüssiggas sind hingegen noch Annahmen zum Jahresnutzungsgrad der Altanlagen nötig, da diese

Energieträger aufgrund fehlender Jahresdaten nicht bilanziert werden konnten. Für die ersetzte Flüssiggas Anlage wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass diese sich wie die ausgewerteten Erdgas-Altanlagen (siehe Kapitel 3.3.1) verhält und ein Jahresnutzungsgrad von 77 % besitzt. Des Weiteren wird für den Energieträger Flüssiggas in den Berechnungen die spezifische CO₂-Emission von 261 g/kWh und für die darauffolgende Bestimmung der Primärenergieeinsparung der Primärenergiefaktor von 1,1 verwendet [17]. Für den Jahresnutzungsgrad der Strom betriebenen Heizungsanlagen wird in den folgenden Berechnungen ein Wert von 95 % angesetzt [40]. Die spezifische CO₂-Emission und der Primärenergiefaktor für den Energieträger Strom sind in Tabelle 20 bzw. Tabelle 21 angefügt.

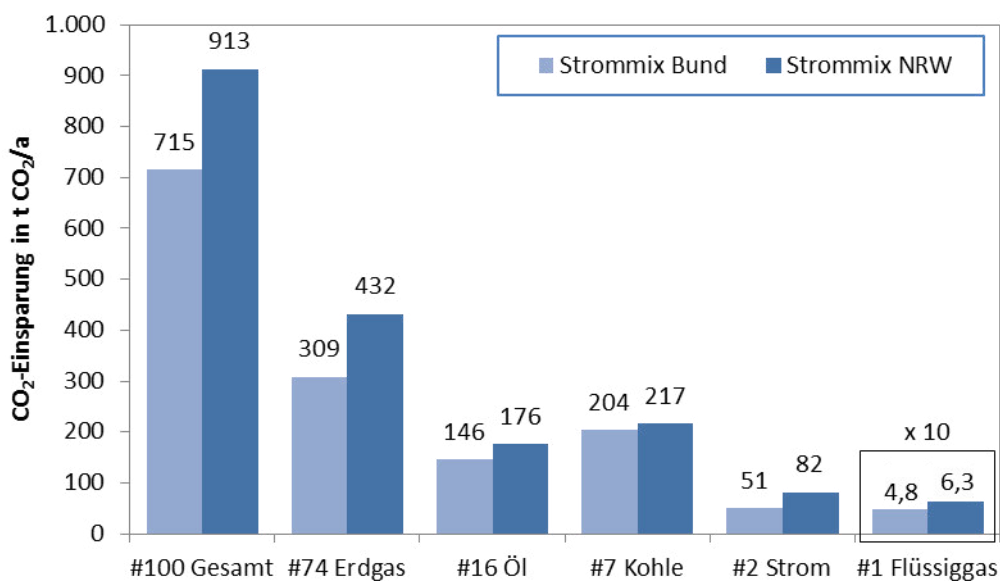


Abbildung 77: CO₂-Einsparung der 100 installierten KWK-Systeme in Relation zu den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen. Für die Energieträgerformen Erdgas, Öl und Kohle sind die Ergebnisse direkt aus der Wärmebereitstellung dieser Energieträger mittels der ermittelten Wärme normierten Faktoren hochgerechnet worden. Die Berechnung der Einsparungen bezüglich der Energieträger Strom und Flüssiggas erfordert hingegen noch eine Annahme zum Jahresnutzungsgrad der Altanlagen, da diese Energieträger aufgrund fehlender Jahresdaten nicht bilanziert werden konnten. Zu beachten ist, dass die Einsparungen des Energieträgers Flüssiggas um den Faktor zehn vergrößert dargestellt sind. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

Die Auswertung der 100 KWK-Systeme zeigt, dass bezogen auf den deutschen Strommix pro Jahr in Summe 715 t CO₂ eingespart werden. Dies entspricht einer Einsparung von 36 %. Wird für die Analyse der Strommix in NRW herangezogen, liegen die CO₂-Einsparungen sogar bei 913 t CO₂/a, was einer Einsparung bezüglich der zuvor genutzten Energieversorgung von rund 41 % entspricht. Die Analyse der einzelnen Energieträgerformen zeigt, dass das Ersetzen von Strom betriebenen Heizungsanlagen mit hohen CO₂-Einsparungen verbunden ist. So ergibt z. B. der Vergleich der Energiebereitstellung für die Energieträger Strom und Flüssiggas (siehe Abbildung 76), dass die Wärmebereitstellung pro Anlage in der gleichen Größenordnung liegen. Werden jedoch die CO₂-Einsparungen der beiden Energieträger in Relation gestellt, zeigt sich, dass die CO₂-Emission des Energieträgers Strom pro System

um den Faktor Fünf²³ größer ist als für Flüssiggas. Auf den ersten Blick ist dieser Sachverhalt verwunderlich, da der Nutzungsgrad von Strom betriebenen Heizungssystem sehr gut ist (in der vorliegenden Berechnung 95 % zu 77 %). Der Vergleich der spezifischen CO₂-Emissionen zeigt jedoch, dass diese für den Energieträger Strom deutlich größer sind. So beträgt die spezifische Emission des deutschen Strommixes 617 g/kWh und die von Flüssiggas 261 g/kWh. Dementsprechend ist die CO₂-Emission pro eingesetzte Kilowattstunde Heizleistung in dem betrachteten Beispiel um 356 g höher.

Tabelle 44: Prozentuale CO₂-Einsparungen der 100 KWK-Systeme gegenüber den zuvor gegenutzten konventionellen Energieversorgungssystemen in Abhängigkeit von dem ersetzten Energieträger. Die prozentualen Einsparungen bleiben bei der Übertragung der im Projekt bestimmten Ergebnisse auf verschiedene Betrachtungsebenen erhalten.

Energieträgerform	CO ₂ -Einsparung in %	
	Strommix NRW	Strommix Bund
Erdgas	31	25
Öl	43	39
Kohle	74	73
Strom	75	65
Flüssiggas	35	29
Gesamt	41	36

Um die CO₂-Einsparungspotenziale in Abhängigkeit von dem Energieträger analysieren zu können, sind in Tabelle 44 die prozentualen Einsparungen dargestellt.

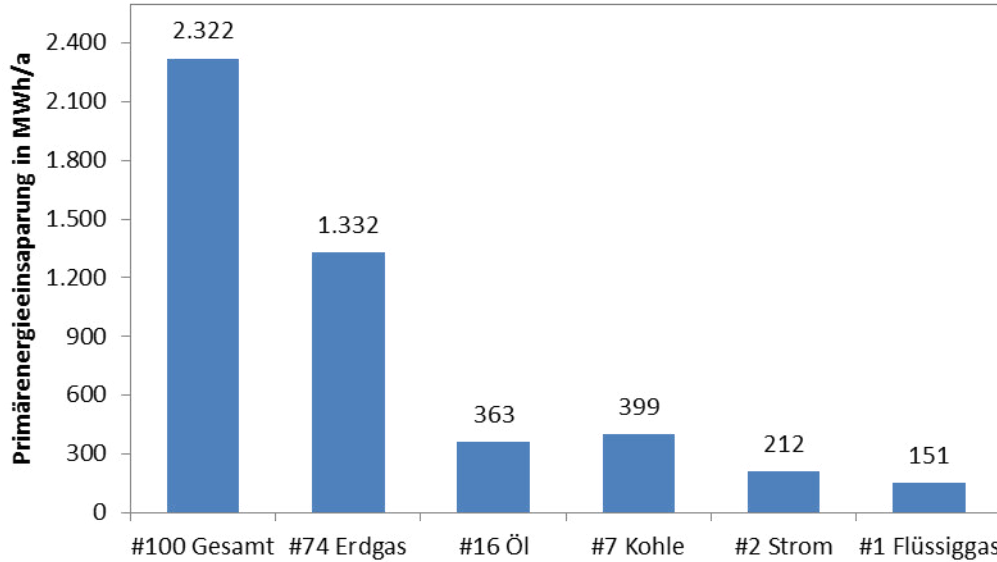


Abbildung 78: Primärenergieeinsparungen der 100 installierten KWK-Systeme in Relation zu den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen. Für die Energieträgerformen Erdgas, Öl und Kohle sind die Ergebnisse direkt aus der Wärmebereitstellung dieser Energieträger mittels der ermittelten Wärme normierten Faktoren hochgerechnet worden. Die Berechnung der Einsparungen bezüglich der Energieträger Strom und Flüssiggas erfordert hingegen noch eine Annahme zum Jahresnutzungsgrad der Altanlagen, da diese Energieträger aufgrund fehlender Jahresdaten nicht bilanziert werden konnten. Für weitere Informationen siehe Fließtext.

²³ Bezogen auf den deutschen Strommix.

Aus dem Vergleich der relativen Einsparungen mit den Berechnungen aus den vorherigen Kapitel ist zu erkennen, dass die prozentualen Einsparungen für die Energieträger Erdgas, Öl und Kohle im angesetzten Bilanzkreis des KWK-Systems (siehe Abbildung 59) gleich sind. Dies liegt darin begründet, dass in den berechneten Übertragungsschlüssel zur Ermittlung der Einsparungen die technischen Kennwerte der KWK-Systeme und der ersetzten Altanlagen eingehen (siehe Kapitel 3.3.7.3). Demzufolge bleiben die CO₂-Einsparungen sowie die Primärenergieeinsparungen im gezogenen Bilanzkreis unabhängig von der bereitgestellten Wärmemenge prozentual konstant. Dies bedeutet wiederum, dass die prozentualen Einsparungen bei der Übertragung der Ergebnisse auf die verschiedenen Betrachtungsebenen (Bund, NRW, etc.) erhalten bleiben.

Die erzielten Primärenergieeinsparungen der 100 KWK-Systeme innerhalb des Projekts sind in Abbildung 78 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass durch die Installation der 100 Anlagen pro Jahr insgesamt 2.322 MWh eingespart werden. Des Weiteren lässt die Analyse erkennen, dass die größten Einsparungspotenziale, analog zur CO₂-Einsparung, durch die Energieträgerformen Kohle und Strom gegeben sind. Die hohen Einsparungen bezüglich der ersetzten Kohle-Anlagen liegen, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, einerseits in den niedrigen Nutzungsgraden der Altanlagen und andererseits in der hohen spezifischen Emission von Kohle begründet. Für die Ersetzung von Strom betriebenen Heizungsanlagen liegen die hohen Einsparungen darin begründet, dass der Primärenergiefaktor mit 2,67 ca. um das Zweieinhalbfache größer ist als die Faktoren der anderen Energieträger. Hieraus lässt sich ableiten, dass sogar das Ersetzen einer effizienten Strom-Heizungsanlage (Nutzungsgrad 95 %) bei den derzeitigen Strommix mit hohen Primär- und CO₂-Einsparungen verbunden ist. Gerade die Substitution der Altanlagen durch KWK-Systeme birgt hohe Einsparungspotenziale, da durch die gekoppelte Produktion von Wärme und Strom zusätzlich der klimabelastende Strom des öffentlichen Netzes substituiert wird.

Um die Einsparungspotenziale der jeweiligen Energieträger bezüglich der Primärenergieeinsparungen zu verdeutlichen, sind diese in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Auch hier gilt, dass sich die Ergebnisse und Erkenntnisse der im Projekt analysierten KWK-Systeme übertragen.

Tabelle 45: Prozentuale Primärenergieeinsparungen der 100 KWK-Systeme gegenüber den zuvor gegenutzten konventionellen Energieversorgungssystemen in Abhängigkeit von dem ersetzten Energieträger. Die prozentualen Einsparungen bleiben bei der Übertragung der im Projekt bestimmten Ergebnisse auf verschiedene Betrachtungsebenen erhalten.

Energieträgerform	Primärenergieeinsparung in %
Erdgas	23
Öl	25
Kohle	53
Strom	62
Flüssiggas	22
Gesamt	28

InnovationCity

Um die Ergebnisse der Analyse zu den installierten KWK-Systemen auf das Projektgebiet InnovationCity projizieren zu können, wurde im vorangestellten Kapitel der Wärmebedarf für dieses Gebiet im häuslichen Sektor bestimmt. Im oberen Teil von Abbildung 79 ist der Wärmebedarf des Projektgebiets in einem Kreisdiagramm dargestellt. Das Diagramm enthält weiterhin die Information zur Verteilung der eingesetzten Energieträgerformen bzw. Technologien bezüglich der Deckung des Gesamtwärmebedarfs. Es ist zu erkennen, dass die Wärmebereitstellung maßgeblich von den Energieträgern Erdgas, Öl und Strom getragen wird. Weiterhin stelle die Wärmeversorgung mittels Fernwärme einen großen Anteil an der Deckung des Wärmebedarfs dar. Eine detaillierte Auflösung der prozentualen Verteilung ist Abbildung 79 zu entnehmen. Für die Übertragung der Projektdaten gilt es, den Anteil der zu substituierenden Wärmebereitstellung für die jeweilige Energieträgerform vorzugeben. In der vorliegenden Arbeit können aufgrund der ersetzten Systeme im Projekt für die Energieträger Erdgas, Öl, Kohle und Strom Berechnungen zu den CO₂- und Primärenergieeinsparungen durchgeführt werden. Für diese Energieträgerformen wird für die Substitution der Altanlagen durch innovative KWK-Systeme bezüglich der Wärmebereitstellung folgende prozentuale Verteilung angesetzt.

- ↳ Erdgas 20 %
- ↳ Öl 10 %
- ↳ Strom 5 %
- ↳ Kohle 100 %

Der Anteil der ersetzten Erdgas-Altanlagen ist mit 20 % durchaus ambitioniert gewählt und liegt darin begründet, dass im Demonstrationsprojekt mit ca. 74 % eine große Resonanz bei den Betreibern von Erdgas betriebenen Altanlagen bezüglich des Technologiewechsels bestand. Die Substitution bezüglich der Energieträger Strom und Öl fallen in dem vorliegenden Beispiel mit 5 % bzw. 10 % geringer aus. Hingegen wird für die Ersetzung von alten Kohlekesselein ein Szenario der vollständigen Substitution gewählt, um die Auswirkungen dieses stark klimabelasteten Energieträgers darzustellen. Im unteren Diagramm aus Abbildung 79 ist die Verteilung der substituierten Wärmebereitstellung angefügt. Für den gewählten Fall wird insgesamt ein Wärmebedarf von 48.188 MWh/a durch die KWK-Systeme gedeckt. Dies entspricht bezüglich des Gesamtwärmebedarfs von 316.650 MWh/a einem Deckungsanteil von ca. 15 %. Der generierte KWK-Strom, der mit dieser Wärmebereitstellung verknüpft ist, beträgt 8.338 MWh/a. Eine Aufschlüsselung zur Verteilung der generierten elektrischen Energie in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform ist rechts unten in Abbildung 79 angefügt.

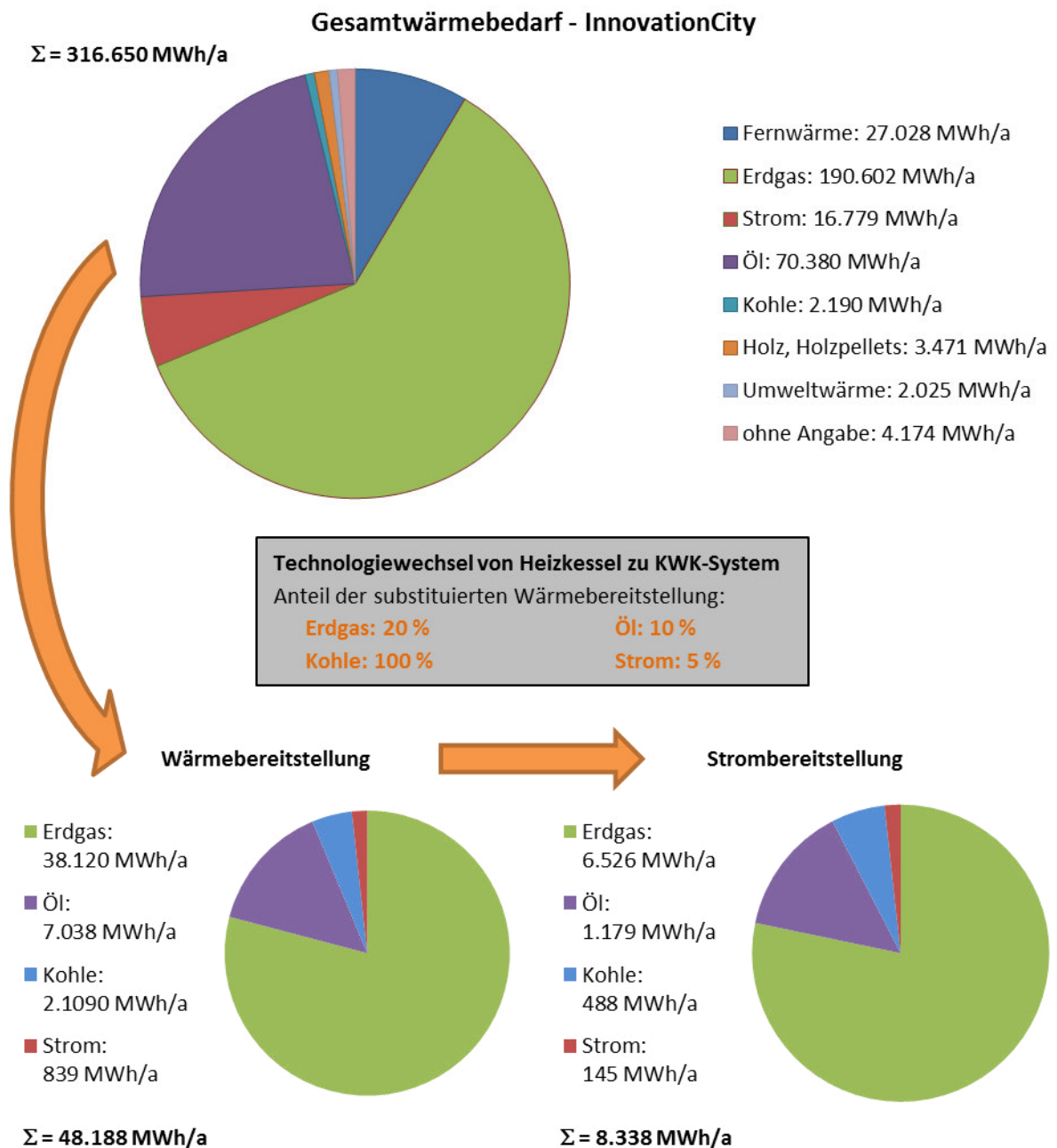


Abbildung 79: Gesamtwärmebedarf für das Projektgebiet InnovationCity in Abhängigkeit von der eingesetzten Energieträgerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom.

Die berechneten CO₂-Einsparungen für das angefügte Szenario sind in Abbildung 80 zusammengefasst. Es zeigt sich, dass im Projektgebiet InnovationCity durch den Einsatz von KWK-Systemen bezogen auf den deutschen Strommix 7.668 t CO₂/a eingespart werden können. Wird in der Analyse der Strommix in NRW angesetzt, ergibt sich sogar eine Einsparung von 9.933 t CO₂/a. Die in diesem Szenario erzielten CO₂-Einsparungen können einen merklichen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Projektgebiet leisten. So liegen die gesamten CO₂-Emissionen für das Projektgebiet InnovationCity unter Ausschluss des Verkehrs bei

269.230 t CO₂/a [41]. Demzufolge liegen die Einsparungen unter Berücksichtigung des deutschen Strommixes bei 3 % und des Strommixes in NRW bei 4 %. Wird die CO₂-Bilanz im Projektgebiet auf die Betrachtung der Haushalte (ohne Verkehr) begrenzt, liegen die Emissionen bei 159.750 t CO₂/a [41] und es ergibt sich bezüglich der eingesetzten KWK-Systeme eine Einsparung von 5 % bzw. für den Strommix in NRW von 6 %.

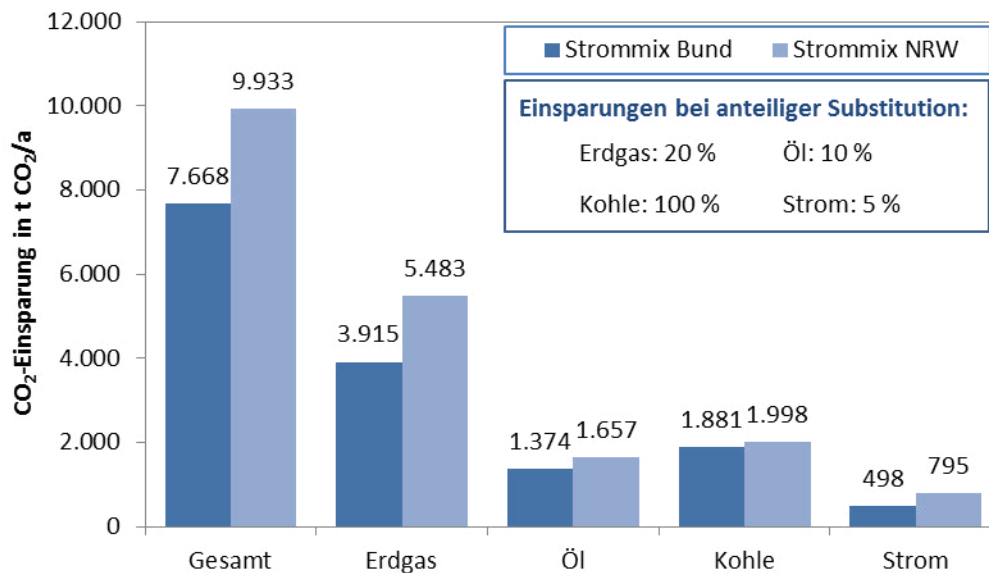


Abbildung 80: CO₂-Einsparungen im Projektgebiet InnovationCity für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

Die aus dem Demonstrationsprojekt abgeleiteten Primärenergieeinsparungen für das Projektgebiet InnovationCity sind Abbildung 81 dargestellt. Mit der angesetzten Substitution der Altsysteme ergibt sich insgesamt eine Primärenergieeinsparung von 26,1 GWh/a.

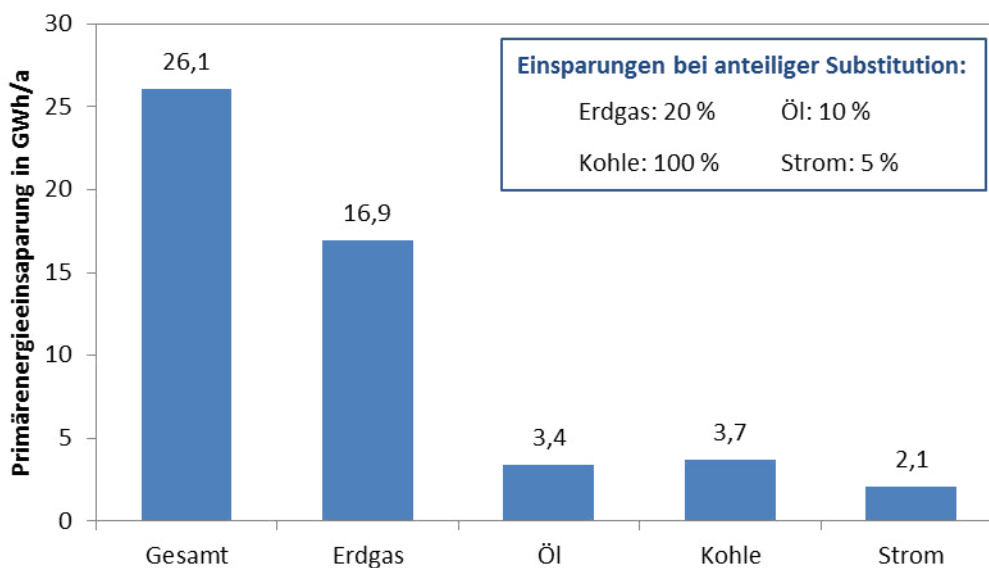


Abbildung 81: Primärenergieeinsparungen im Projektgebiet InnovationCity für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

Bottrop

Die Übertragung der analysierten Projektdaten auf die Betrachtungsebene Bottrop erfolgt analog zur Vorgehensweise auf der zuvor angefügten Betrachtungsebene InnovationCity.

In Abbildung 82 ist im oberen Kreisdiagramm der Gesamtwärmebedarf für die Betrachtungsebene Bottrop dargestellt. Das Diagramm gibt weiterhin Aufschluss über die Verteilung der eingesetzten Energieträger bzw. Technologien zur Wärmebereitstellung. Die prozentuale Verteilung wurde hierbei, wie auch für das Projektgebiet InnovationCity, von der Betrachtungsebene NRW übernommen (siehe Kapitel 3.3.7.3). Für die Substitution der Altanlagen in Abhängigkeit von der Energieträgerform wurde die identische Verteilung angesetzt wie für die Betrachtungsebene InnovationCity. Dies hat zur Folge, dass der bestehende Gesamtwärmebedarf von 532.494 MWh/a mit der angesetzten Substitution zu 15 % (81.035 MWh/a) durch den Einsatz von KWK-Systemen gedeckt wird. Des Weiteren generieren die KWK-Systeme bei dieser Substitution die elektrische Energie von 14.021 MWh/a.

Die Bereitstellung dieser Energiemengen durch die KWK-Systeme ist in Relation zu den ersetzten Energieversorgungssystemen mit einer CO₂-Einsparung von 13 kt CO₂/a verknüpft (siehe Abbildung 83). Bezogen auf den Strommix in NRW ergibt sich eine Einsparung von 16,7 kt CO₂/a. Dies bedeutet, dass die CO₂-Emissionen von 932 kt CO₂/a [38] auf der Betrachtungsebene Bottrop um 1 % durch die eingesetzten KWK-Systeme reduziert werden können. Wird für diese Betrachtung der Strommix in NRW angesetzt, ergibt sich eine Einsparung von 2 %. Die CO₂-Emissionen der Haushalte in Bottrop beträgt 371 kt CO₂/a [38], so dass in Relation hierzu die Einsparung bei 3 % bzw. bezogen auf den Strommix in NRW bei 4 % liegt.

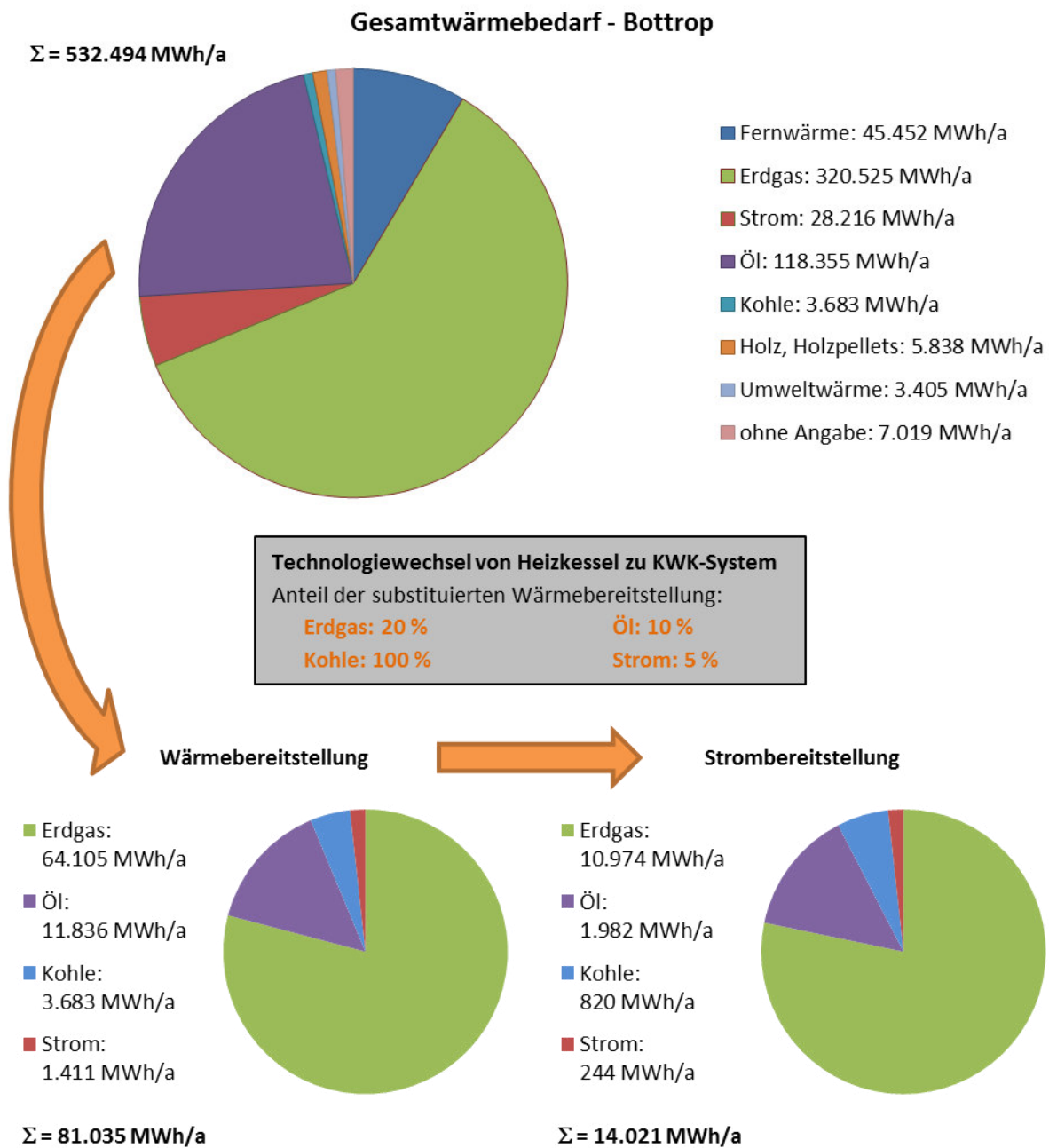


Abbildung 82: Gesamtwärmebedarf für die Betrachtungsebene Bottrop in Abhängigkeit von der eingesetzten Energieträgerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom.

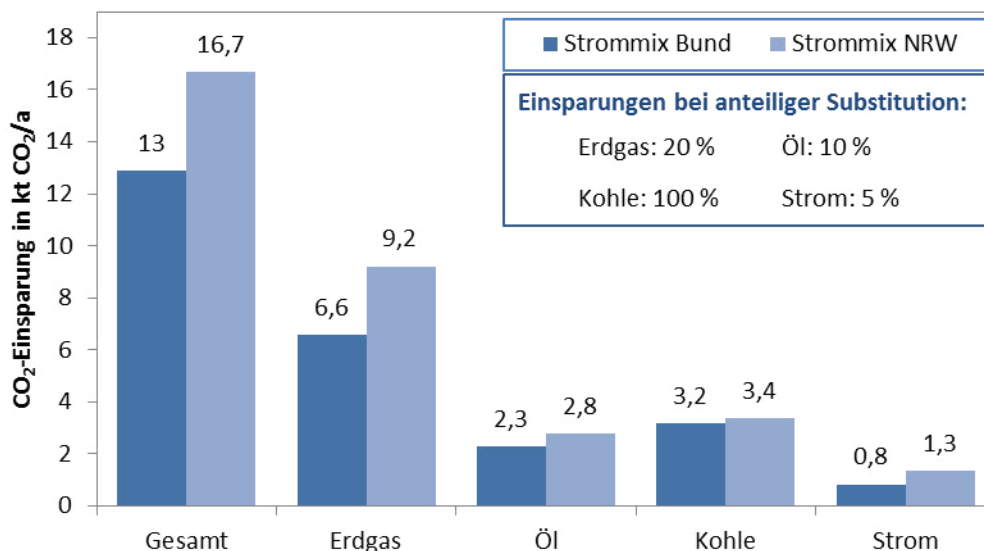


Abbildung 83: CO₂-Einsparungen auf der Betrachtungsebene Bottrop für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

Die Primärenergieeinsparungen auf dieser Betrachtungsebene sind in Abbildung 84 zusammengefasst. Die Auswertung zeigt, dass für die angenommene Substitution insgesamt 43,8 MWh/a an Primärenergie durch den Einsatz von KWK-Systemen eingespart werden können.

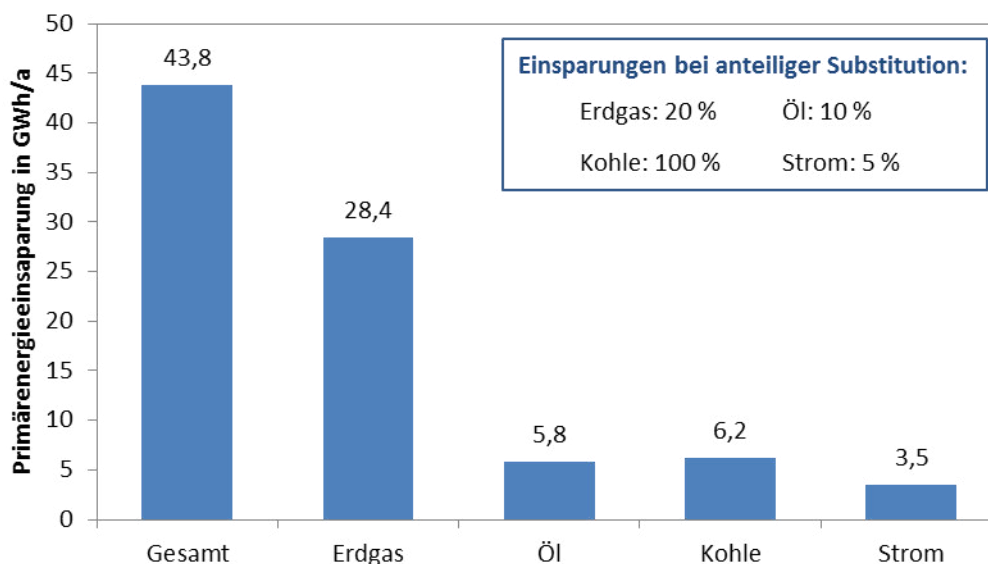


Abbildung 84: Primärenergieeinsparungen auf der Betrachtungsebene Bottrop für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

Landesebene – NRW

In Abbildung 85 ist der Gesamtwärmebedarf im häuslichen Sektor entsprechend der Auswertung in Kapitel 3.3.7.3 dargestellt. Des Weiteren ist in dieser Abbildung, analog zu den vorangegangenen Betrachtungsebenen, die Wärme- und Strombereitstellung der KWK-Systeme angefügt, die sich bei der angesetzten Substitution der Altanlagen ergibt. Die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme deckt hierbei mit 12.854 GWh/a ca. 15 % des Gesamtwärmebedarfs von 84.463 GWh/a ab.

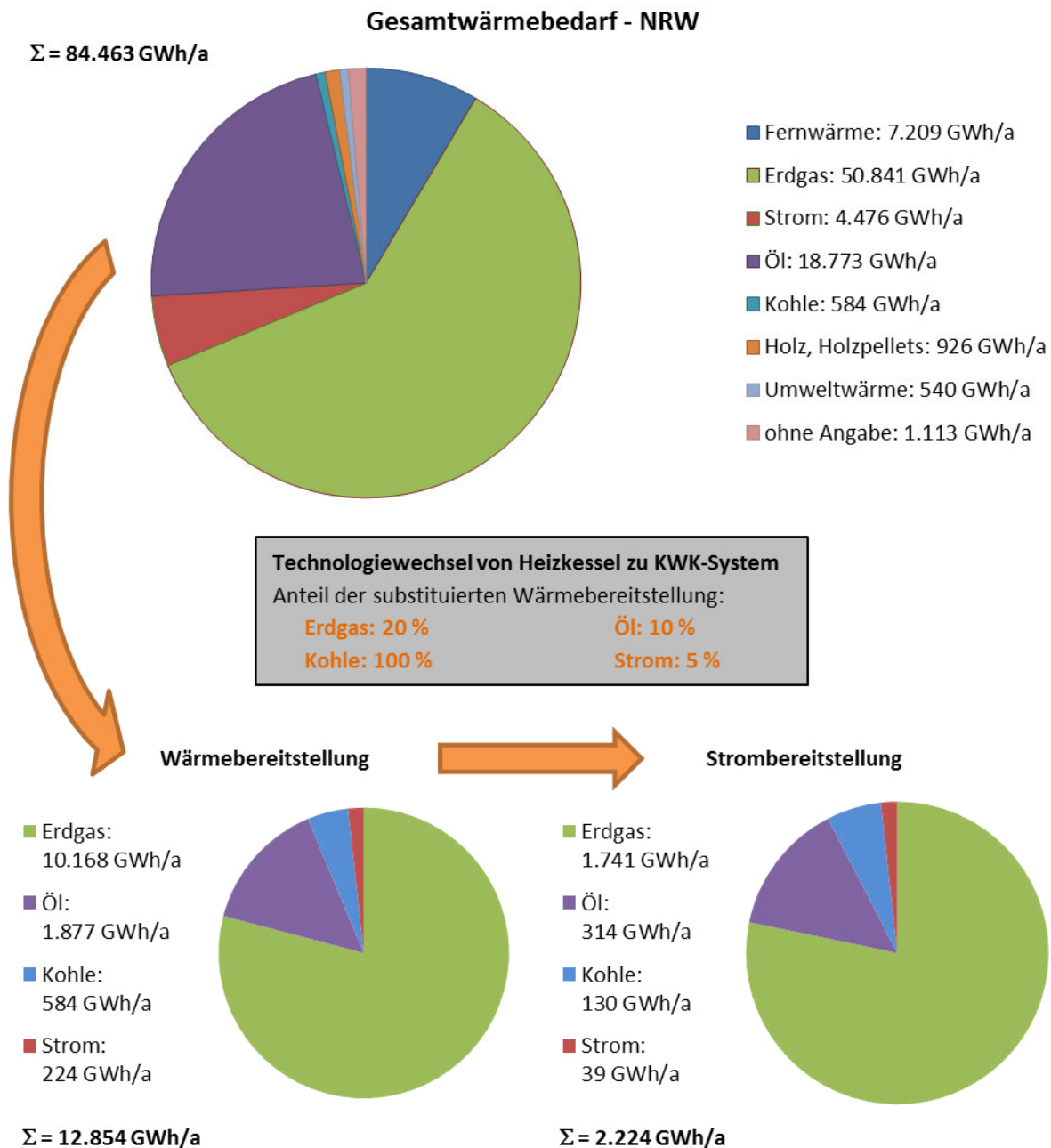


Abbildung 85: Gesamtwärmebedarf für die Betrachtungsebene NRW in Abhängigkeit von der eingesetzten Energieträgerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom.

Die von den KWK-Systemen generierten Energiemengen korrelieren in Relation zu den substituierten Energieversorgungssystemen mit einer CO₂-Einsparung von 2.045 kt CO₂/a (siehe Abbildung 86). Wird der Strommix in NRW als Referenz für die Berechnungen angesetzt, ergibt sich die Einsparung zu 2.649 kt CO₂/a. In Relation zu den insgesamt ausgestoßenen CO₂-Emissionen von 305.300 kt CO₂/a [42] auf der Betrachtungsebene NRW ergibt sich, dass in dem betrachteten Substitutions-Szenario die CO₂-Einsparung bei 0,7 % bzw. bezogen auf den Strommix in NRW bei 0,8 % liegt.

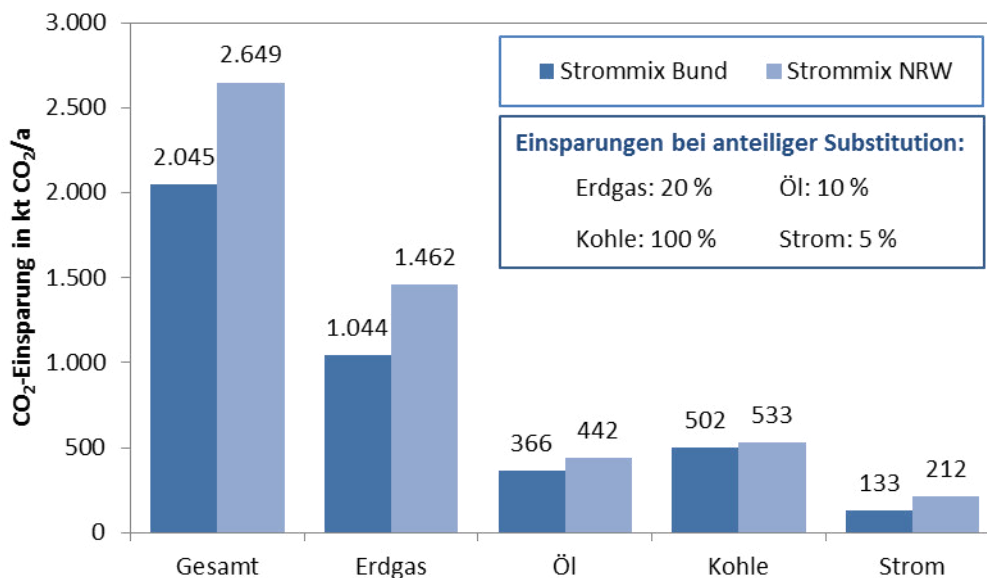


Abbildung 86: CO₂-Einsparungen auf der Betrachtungsebene NRW für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

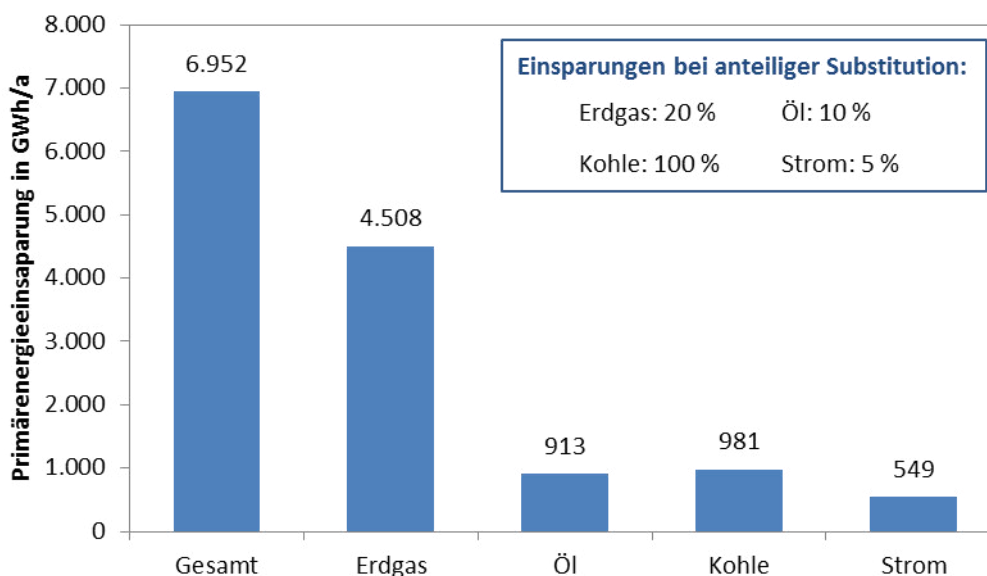


Abbildung 87: Primärenergieeinsparungen auf der Betrachtungsebene NRW für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

In Abbildung 87 sind die Ergebnisse der Primärenergieeinsparungen, die aus dem Technologiewechsel resultieren zusammengefasst. Insgesamt können durch den Technologiewechsel in dem vorliegenden Szenario Primärenergieeinsparungen von 6.952 GWh/a erzielt werden. Setzt man diesen Wert mit dem gesamten Primärenergieverbrauch von 1.202 TWh/a [42] in Relation zeigt sich, dass die Einsparungen bei 0,6 % liegen.

Um die Einsparungspotenziale durch den Einsatz von KWK-Systemen im häuslichen Sektor zu verdeutlichen, sind in den folgenden Abbildungen die CO₂- und Primärenergieeinsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers dargestellt. Hierbei sind für die CO₂-Einsparungen in den gestrichelten Linien die Einsparungen unter Hinzunahme des deutschen Strommixes angefügt. Die durchgehenden Linien stellen hingegen die Einsparungen dar, die sich in Bezug auf den Strommix in NRW ergeben. Für beide Abbildungen gilt es zu beachten, dass die Einsparung bezüglich der Substitution von Kohlekesseln um eine Größenordnung geringer ausfällt als für die anderen Energieträger und sich deshalb die entsprechenden Graphen (Blau) auf die rechte Ordinate (Blau) beziehen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Einsparungen bezüglich des Energieträgers Kohle in Relation zu den anderen Energieträgerformen zwar geringer ausfallen, dennoch besitzt dieser Energieträger ein enormes Einsparungspotenzial. So sind die geringen Einsparungen darin begründet, dass die Wärmebereitstellung mittels Kohle-Heizkessel nur 0,7 % am Gesamtwärmebedarf beträgt.

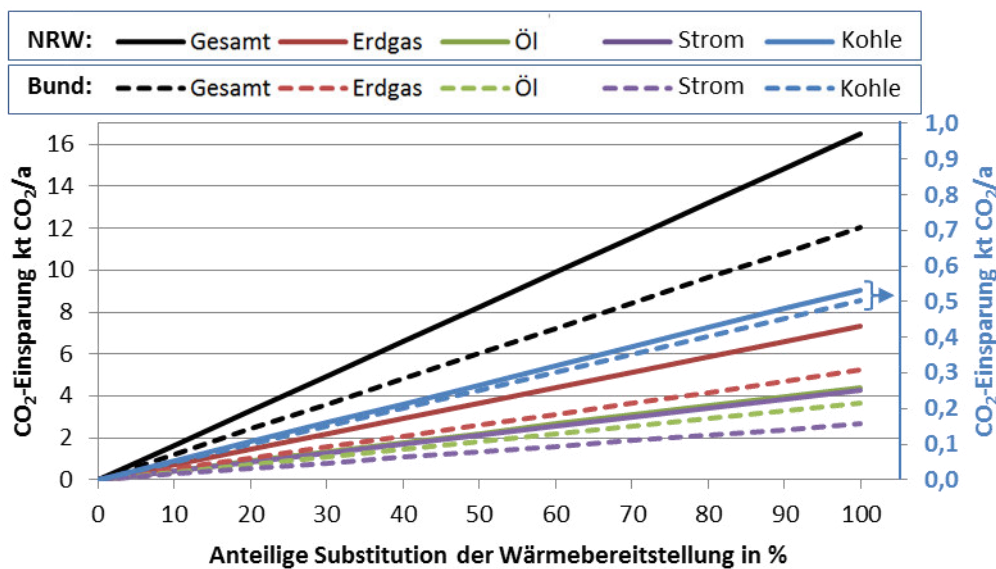


Abbildung 88: CO₂-Einsparung der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers

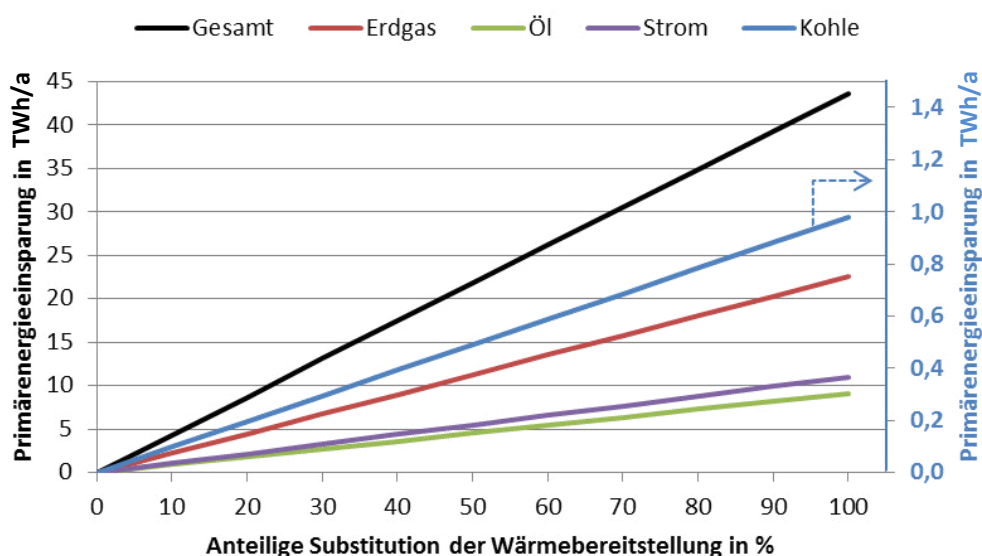


Abbildung 89: Primärenergieeinsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers

Bundesebene

Der Gesamtwärmebedarf des häuslichen Sektors auf Bundesebene beträgt 400.711 GWh/a und ist in Abbildung 90 angefügt. Die Anteile der Energieträgerformen bzw. Technologien unterscheidet sich auf dieser Ebene zu der Verteilung in NRW, sodass sich im beibehaltenden Substitutions-Szenario der Deckungsanteil der KWK-Systeme an dem Gesamtwärmebedarf leicht ändert. Im vorliegenden Fall deckt die Wärmebereitstellung der KWK-Systeme 14 % des Gesamtwärmebedarfs. Die Wärmebereitstellung von 54.150 GWh/a korreliert mit der Strombereitstellung von 9.391 GWh/a.

Durch den angesetzten Technologiewechsel können auf Bundesebene pro Jahr 9,36 Mt CO₂ eingespart werden (siehe Abbildung 91). Bei einer CO₂-Emission von 939 Mt CO₂/a [42] auf Bundesebene ergibt sich durch die Substitution der Altanlagen eine Reduktion von ca. 1 %.

Die Betrachtung der Primärenergieeinsparung in Abbildung 92 ergibt vergleichbare Einsparungen von 0,8 % bezüglich der eingesetzten Primärenergie. So liegen insgesamt die Einsparungen im gewählten Szenario bei 29,96 TWh/a und der Primärenergieeinsatz auf Bundesebene bei 3.841 TWh/a.

Entsprechend der Analyse auf Landesebene sind in Abbildung 93 und Abbildung 94 die CO₂- und Primärenergieeinsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers dargestellt, sodass die Einsparungspotenziale durch den Einsatz von KWK-Systemen im häuslichen Sektor in Abhängigkeit von der Wärme-Substitution direkt aus den Diagrammen abgeleitet werden können.

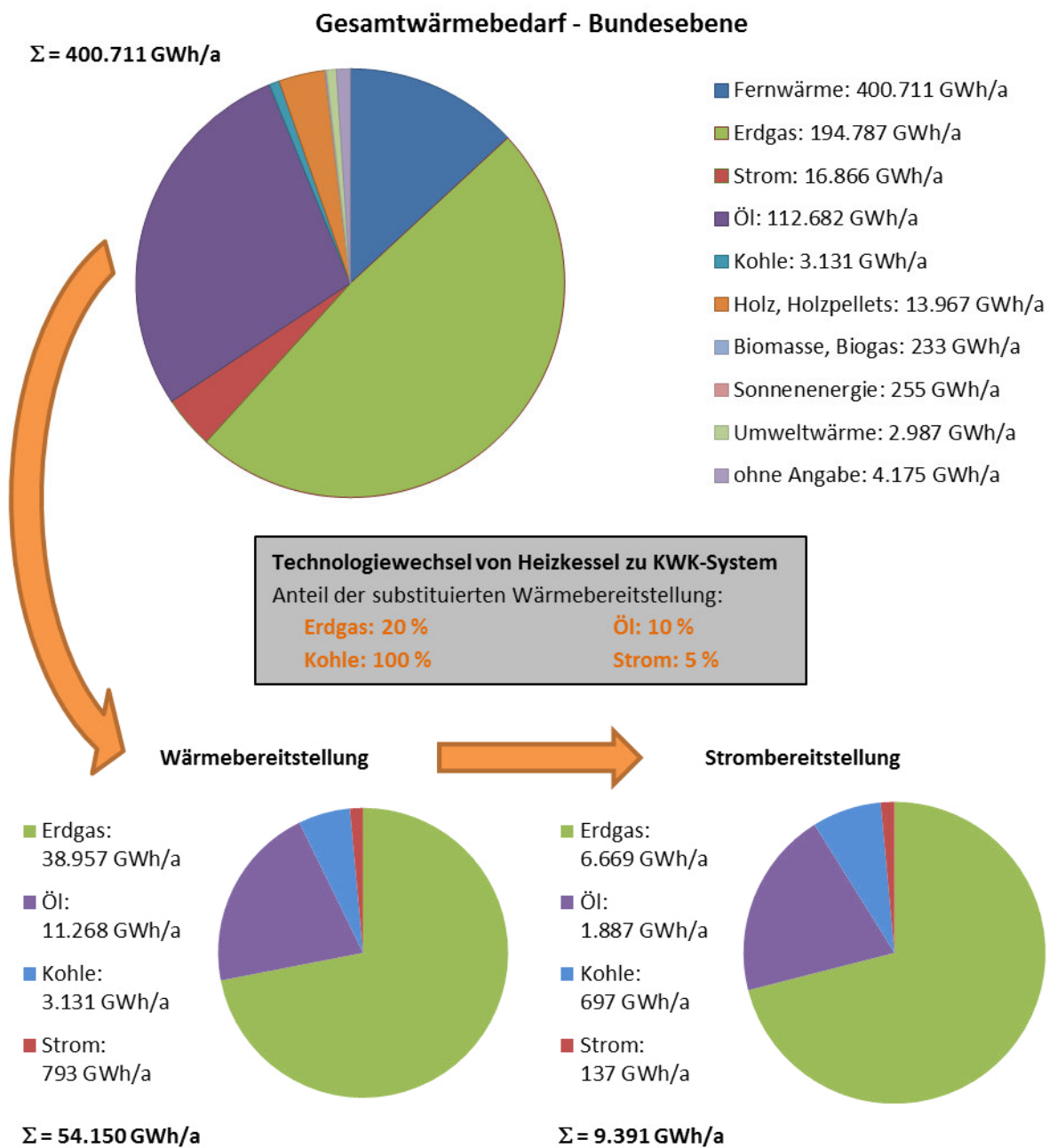


Abbildung 90: Gesamtwärmebedarf auf Bundesebene in Abhängigkeit von der eingesetzten Energie-trägerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom.

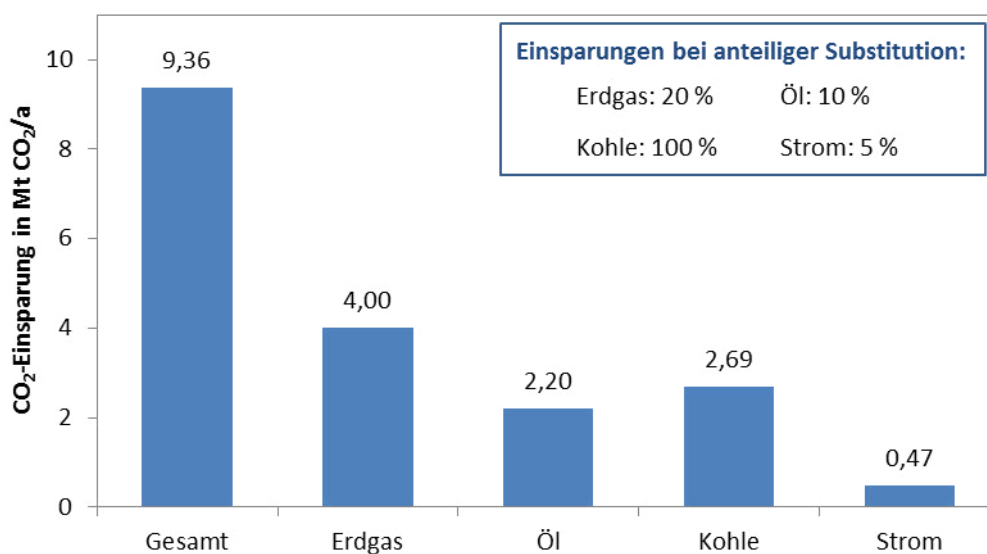


Abbildung 91: CO₂-Einsparungen auf Bundesebene für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

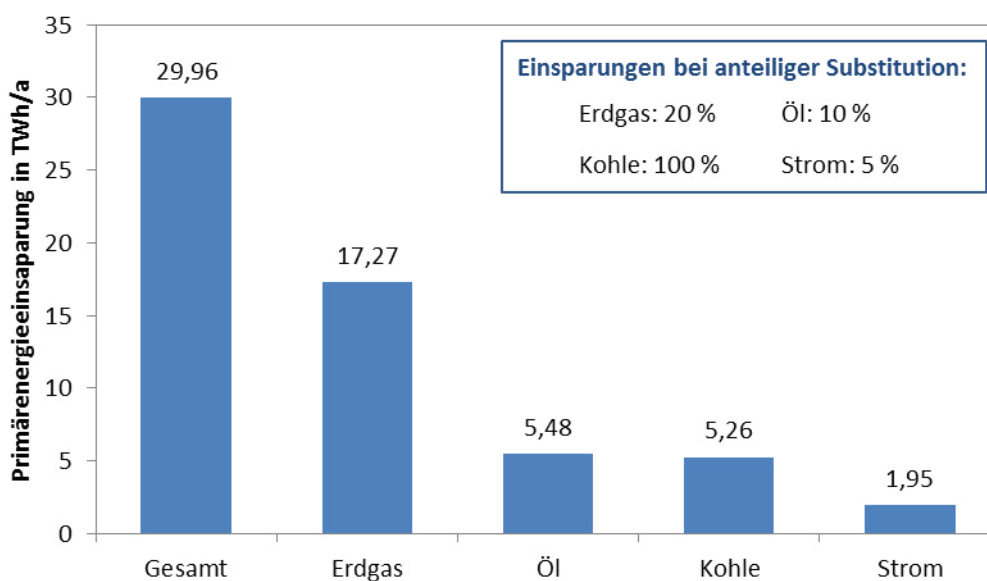


Abbildung 92 Primärenergieeinsparungen auf Bundesebene für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform

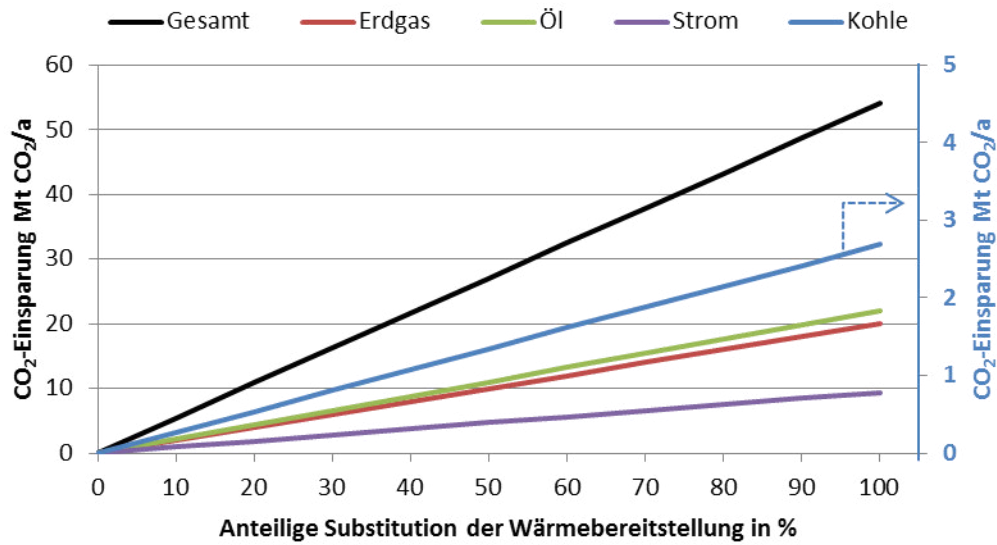


Abbildung 93: CO₂-Einsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers

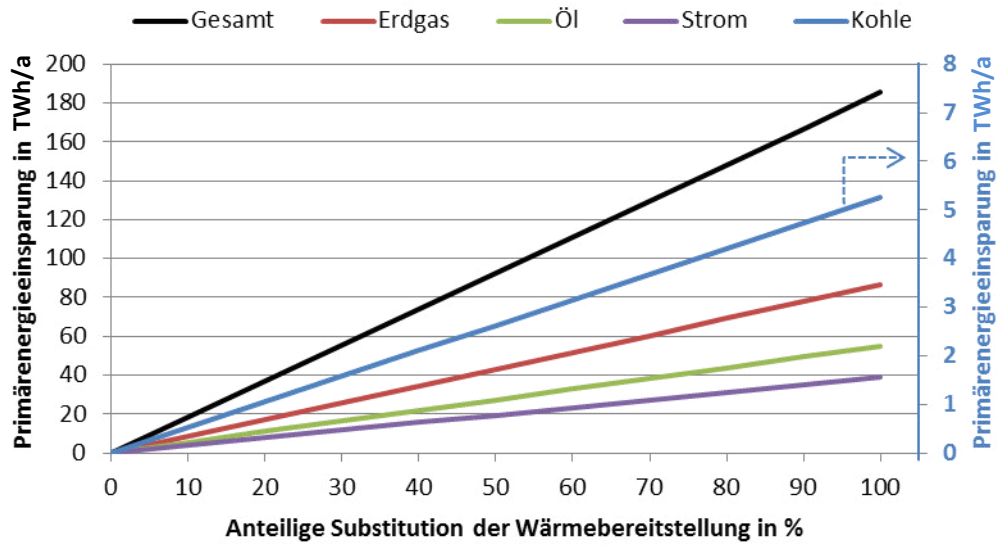


Abbildung 94: Primärenergieeinsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers

3.4 Dynamische Simulationen

Simulationsverfahren sind heutzutage in nahezu allen Bereichen der Energietechnik zu finden. Ihre Anwendungsbereiche liegen dabei nicht nur in der theoretischen Untersuchung von Systemen sondern auch in der Auslegung und Optimierung derselbigen. Die Simulation von dynamischen Systemen mit einer Vielzahl voneinander abhängiger Variablen findet zunehmend auch Anwendung in den Bereichen der Gerätetechnik und Gebäudeenergieversorgung.

Ein wesentliches Arbeitspaket des vorliegenden Projekts beinhaltet die Modellbildung und Simulation des energetischen Verhaltens von Gebäuden inklusive der installierten KWK-Anlagen, Hydraulik und Warmwasserspeicher (WWS). Die Modellierung umfasst dabei im Wesentlichen zwei Hauptbereiche. Zum einen wurde die thermische Gebäudehülle abgebildet, welche ursächlich für den Wärmebedarf des zu betrachtenden Objekts verantwortlich ist. Hierbei flossen sowohl die in Kapitel 3.1 ermittelten Daten hinsichtlich der Gebäudeklassifizierung nach IWU ein, als auch die zusätzlich vor Ort erhobenen Gebäude- und Wetterdaten. Der zweite zu betrachtende und zu modellierende Bereich war das Hydrauliksystem mit dem entsprechenden Energiebereitstellungssystem. Dieses System setzt sich aus der jeweiligen KWK-Anlage, den thermischen Speichern, Pumpen und Regelungssystemen zusammen. Diese Komponenten sind in Kombination für die Deckung der Wärmebedarfsanforderungen aufgrund der thermischen Gebäudehülle verantwortlich. Der Vorteil dieser generellen Modularisierung ist, dass verschiedene Gebäudetypen mit verschiedenen Versorgungssystemen einfach gekoppelt werden können ohne das Gesamtsystem erneut modellieren zu müssen. Die Modelle wurden anhand der Messdaten validiert, wie in den folgenden Kapiteln dargestellt. Alle Modelle und Simulationen in dem Kapitel wurden mit Hilfe der Modellierungssprache „Modelica“ [43] in der Simulationsumgebung „Dymola“ [44] modelliert.

Einführung in Modelica / Dymola

Modelica ist eine objektorientierte, gleichungsbasierte und deklarative Programmiersprache, welche vor allem zur Beschreibung komplexer physikalischer nichtlinearer Systeme genutzt wird. Das zu betrachtende physikalische Gesamtsystem wird dabei hinsichtlich seiner realen Bestandteile und physikalischen Vorgänge in Objekte aufgeteilt, die anhand von differentiellen, algebraischen und diskretisierten Gleichungen beschrieben werden. Die einzelnen Objekte werden mittels Energie- und Massenbilanzen miteinander gekoppelt und zu einem Gleichungssystem zusammengefasst. Die Implementierung der entwickelten Ansätze wurde im Rahmen dieses Projekts in der grafischen Entwicklungsumgebung Dymola realisiert.

Dymola (Dynamic Modeling Laboratory) ist ein Werkzeug zur objektorientierten Modellierung und Lösung komplexer, multiphysikalischer Systeme, welches auf der offenen Modellierungssprache „Modelica“ basiert. Dymola zeichnet sich besonders dadurch aus, dass es den Anwender in die Lage versetzt, eigene Modellbibliotheken zu erstellen, vorhandene Modellbibliotheken zu nutzen oder diese den eigenen Bedürfnissen anzupassen. Der Nutzer kann mittels „Drag and Drop“ verschiedenste Modelle miteinander koppeln und somit auch sehr komplexe Systeme erstellen, welche dennoch ein hohes Maß an Übersichtlichkeit bieten. Ein Eingreifen auf Quelltextebene ist speziell bei der Modellentwicklung ebenfalls möglich.

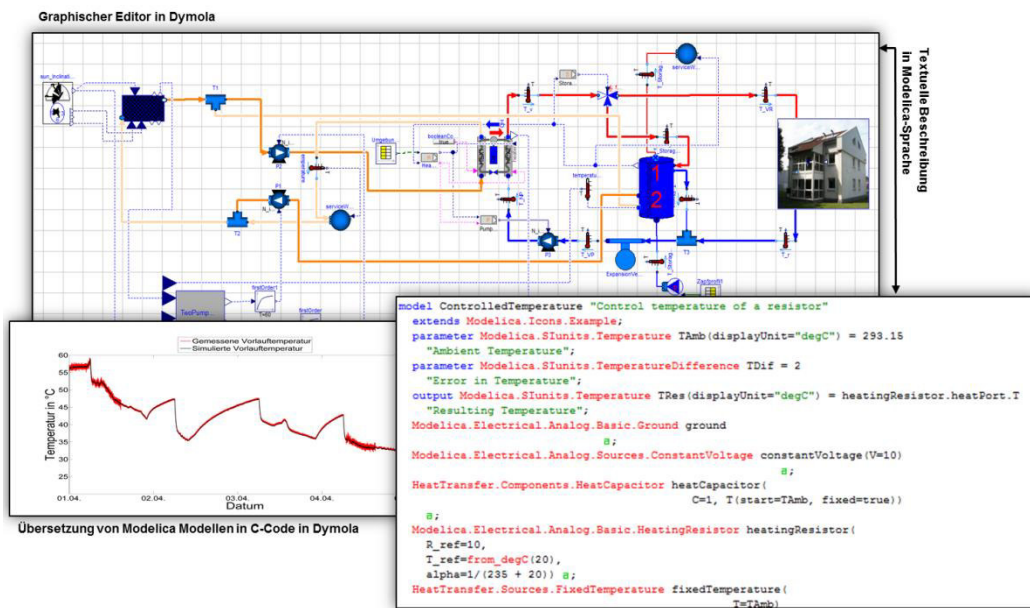


Abbildung 95: Verschiedene Ebenen in Modelica / DYMOLA

3.4.1 Grundlegender Modellaufbau

Die während des Projekts erstellten Gesamtmodelle für die einzelnen Referenzgebäude besitzen sowohl für die Ein- als auch die Mehrzonenmodelle denselben grundlegenden Aufbau. Das Gesamtmodell setzt sich jeweils aus drei grundlegenden Modulen zusammen. In Abbildung 96 ist das Zusammenwirken der drei Module schematisch dargestellt.

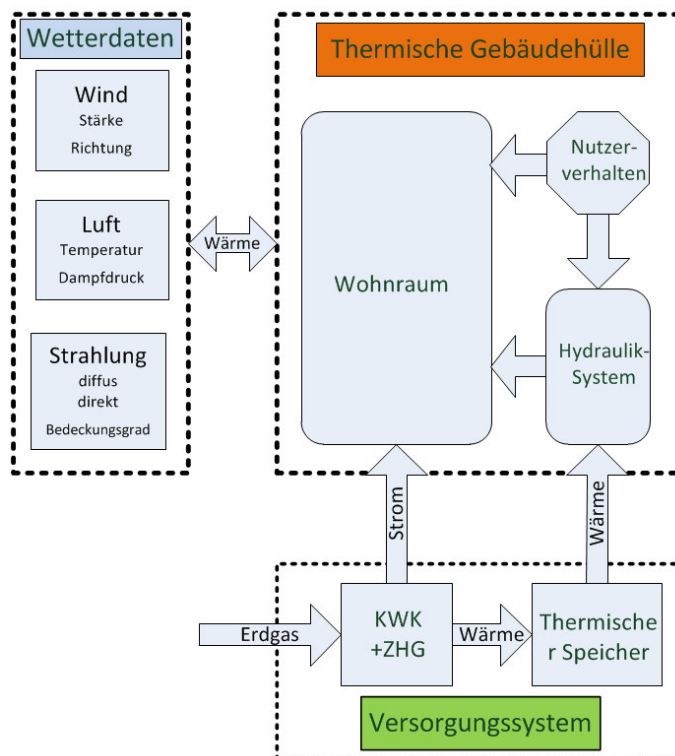


Abbildung 96: Grundlegender Modellaufbau mit den drei Hauptkomponenten: Aufbereitung der Wetterdaten, Thermische Gebäudehülle, Versorgungssystem

Das Wettermodul stellt die jeweils auf die einzelnen Gebäudeflächen umgerechneten Wetterdaten bereit. Dies beinhaltet die Berechnung der Windgeschwindigkeit an den einzelnen Gebäudeflächen in Abhängigkeit von der Windrichtung und Orientierung des Gebäudes. Des Weiteren wird gleichzeitig die aufkommende Strahlung an den einzelnen Gebäudeflächen simuliert. Das Wettermodul stellt somit die maßgeblichen Eingangsdaten für die Simulation der in der Interaktion mit der Umwelt ein- und ausgehenden Energiemengen bereit.

Das Modell der thermischen Gebäudehülle ist der zentrale Bestandteil des Gesamtmodells und ermöglicht die Ermittlung des Wärmebedarfs eines ausgewählten Gebäudes. Dabei werden die instationären Vorgänge der Konvektion, Wärmeleitung, Emission und Absorption im Detail für jede Fläche des Gebäudes simuliert. Ergebnis dieser Simulation ist der wetter- und bewohnerverhaltensabhängige Wärmebedarf des Gebäudes. Diese Wärmemenge muss durch das Versorgungssystem bereitgestellt werden und wird durch die über die Hydraulik verbundenen Heizkörper in die zu beheizenden Räume eingebracht.

Das Versorgungssystem setzt sich aus dem jeweiligen KWK-System, dem Zusatzheizgerät, dem thermischen Speicher und den angeschlossenen Heizungspumpen zusammen. Die Kombination aus KWK-Anlage und Zusatzheizgerät stellt, entsprechend des durch die thermische Gebäudehülle vorgegebenen Wärmebedarfs, die Wärme bereit. Da die Wärme gepuffert über den Speicher bereitgestellt wird, kommt es zu einer gewissen Entkopplung des gebäudeseitigen Wärmebedarfs und der Wärmebereitstellung durch das KWK-System und das Zusatzheizgerät. Der Grad der Entkopplung hängt von der jeweiligen Größe des Speichers, der thermischen Leistung der KWK-Zusatzheizgerät-Kombination, der Regelung der Anlage und der Höhe der Bedarfsanforderung ab.

3.4.2 Modellbildung

Um ein beliebiges Energiesystem beschreiben und simulieren zu können, sind verschiedene Teilschritte auf dem Weg vom realen System hin zum virtuellen Modell notwendig. Stark vereinfacht kann man diesen Prozess in vier Phasen unterteilen. Die erste Phase beinhaltet die Festlegung der relevanten Systemparameter und deren Erfassung. In Bezug auf das vorliegende Projekt beinhaltete dies die Begehung und Vermessung der zu betrachtenden Objekte und die Ermittlung sämtlicher technisch relevanter Daten. Anhand der Gebäudedaten wurden, soweit nicht vorhanden, technische Zeichnungen der Gebäude angefertigt. In der zweiten Phase wird mittels der Zeichnungen die reale Geometrie der Gebäude abstrahiert und in ein reduziertes Modell überführt. Diese Modellbildung beinhaltet auch die räumliche Diskretisierung des realen Systems mit einer begrenzten Anzahl an Parametern. Dieses abstrahierte Modell wird abschließend entsprechend der ermittelten Objekteigenschaften parametrisiert. In der dritten Phase werden die Einzelmodelle in das Gesamtsystemmodell implementiert und die verschiedenen Kopplungsstellen werden miteinander verknüpft. Hierbei werden auch die Umweltparameter (Wind, Solarsstrahlung, Lufttemperatur, Bodentemperatur) so aufbereitet, dass sie als kontinuierlicher Input in die Simulation einfließen können. Die abschließende Phase beinhaltet die Definition der zu betrachtenden Szenarien und deren zugrunde liegenden Zeiträume. Sind diese Parameter definiert, werden die ersten Simulationen zur Überprüfung der logischen

und physikalischen Plausibilität des Gesamtsystemverhaltens durchgeführt. Ist dieser Punkt abgeschlossen, werden die definierten Szenarien simuliert und anhand gegebener Messdaten validiert. In Abbildung 97 sind die vier beschriebenen Phasen schematisch ihrer logischen Reihenfolge nach dargestellt. Detaillierte Informationen zu den Teilmodellen sind in Anhang A13 enthalten.

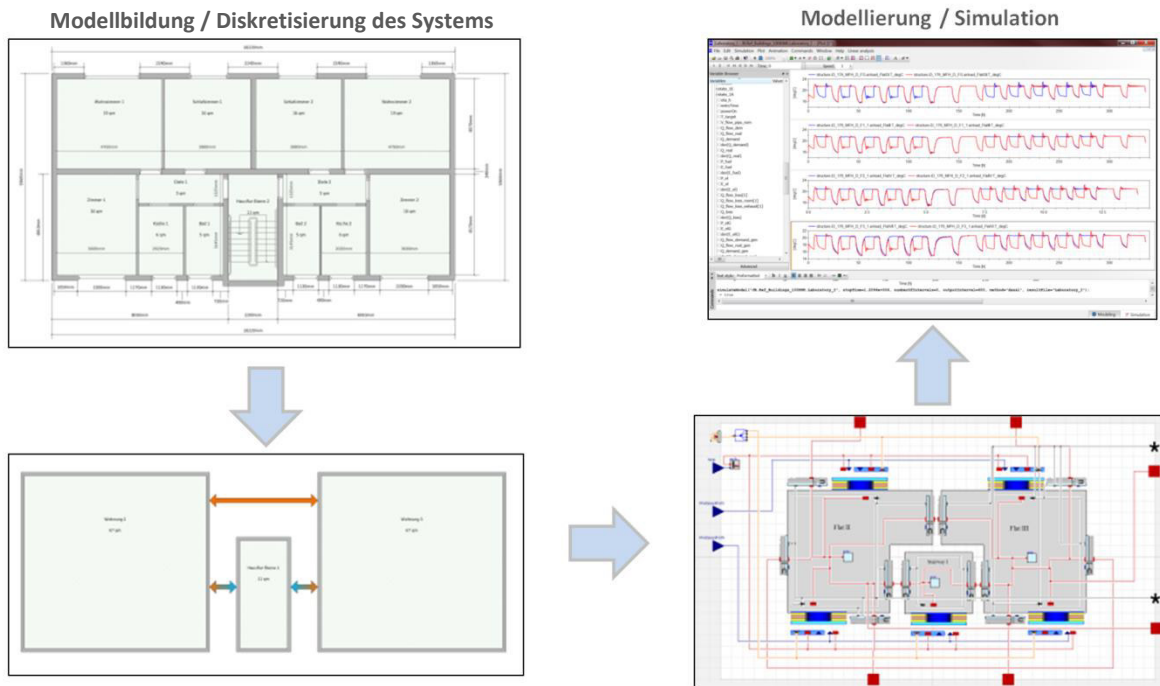


Abbildung 97: Vorgehensweise zur Modellierung der Gebäudehülle in Modelica

3.4.3 Wetterdaten

Die in die Simulation eingehenden Wetterdaten wurden aus öffentlich zugänglichen Beständen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bezogen. Da nicht alle benötigten Wetterdaten an einem Standort vorlagen, musste auf verschiedene Wetterstationen des DWD zurückgegriffen werden. In der folgenden Tabelle 46 sind die verschiedenen Bezugsstationen und die jeweilig bezogenen Messgrößen aufgeführt.

Tabelle 46: Auflistung der genutzten Wetterstationen und der jeweils bezogenen Messgrößen

Messgröße	Einheit	Detail	DWD-Station (ID)
Umgebungslufttemperatur	[°C]	Stundenwerte	Essen-Bredeney (1303)
rel. Luftfeuchte	[% rel.]		
Windgeschwindigkeit	[m/s]		
Windrichtung	[°]		
Bodentemperatur 1 m	[°C]		Düsseldorf (1078)
Bodentemperatur 2 m	[°C]		Ruhr-Universität (1117)
extraterrestrische Strahlung	[J/cm ²]		
Globalstrahlung			
Direktstrahlung			
Diffusstrahlung			

Die gemessenen Lufttemperaturen an der Außenseite der Referenzobjekte sind in Abbildung 98 den Werten der Messwarte Bredene y gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte der Station Bredene y durchgehend unter den Außenwandmessungen in der Referenzgruppe liegen.

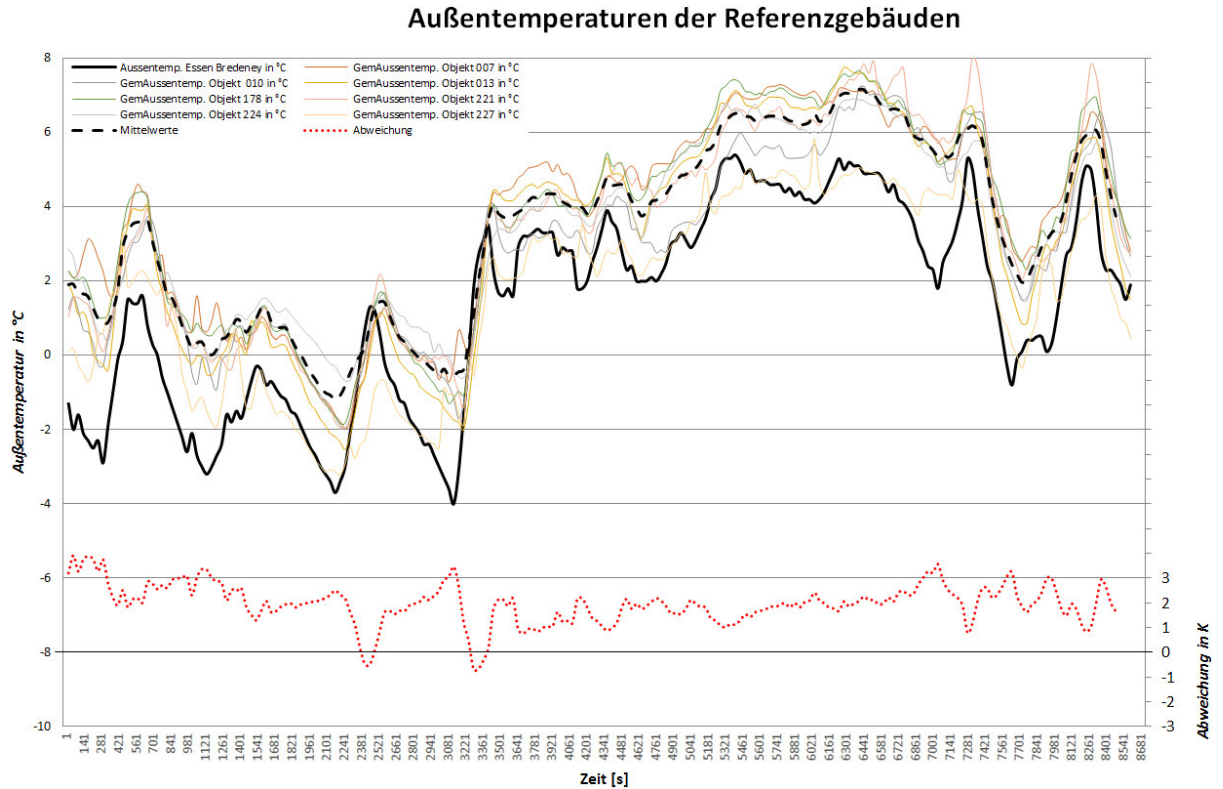


Abbildung 98: Außentemperaturen der Referenzgebäude und Lufttemperatur in Bredene y

Die Ursache hierfür beruht unter anderem auf der Wärmeabgabe der Gebäudehülle und weiterer Beeinflussung durch Solarstrahlung an der Messstelle. Es ist aber zu erkennen, dass der qualitative Verlauf der Grafen dennoch ein hohes Maß an Übereinstimmung besitzt. Die räumliche Distanz zwischen den betrachteten Objekten und der Messstelle Essen-Bredene y wird daher in den folgenden Betrachtungen vernachlässigt.

Um die Leistungsfähigkeit der modellierten Gebäudehüllen im Detail validieren zu können, wurde in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4655 drei Referenzzeiträume gewählt. Diese Zeiträume sollen exemplarisch die verschiedenen Heizperioden darstellen. Der erste Zeitraum stellt die Heizperiode im Winter dar, der zweite die Übergangsperiode und der dritte die Nichtheizperiode im Sommer. In der folgenden Abbildung ist die 3-Tagesmitteltemperatur für die drei Heizperioden aufgetragen und hervorgehoben.

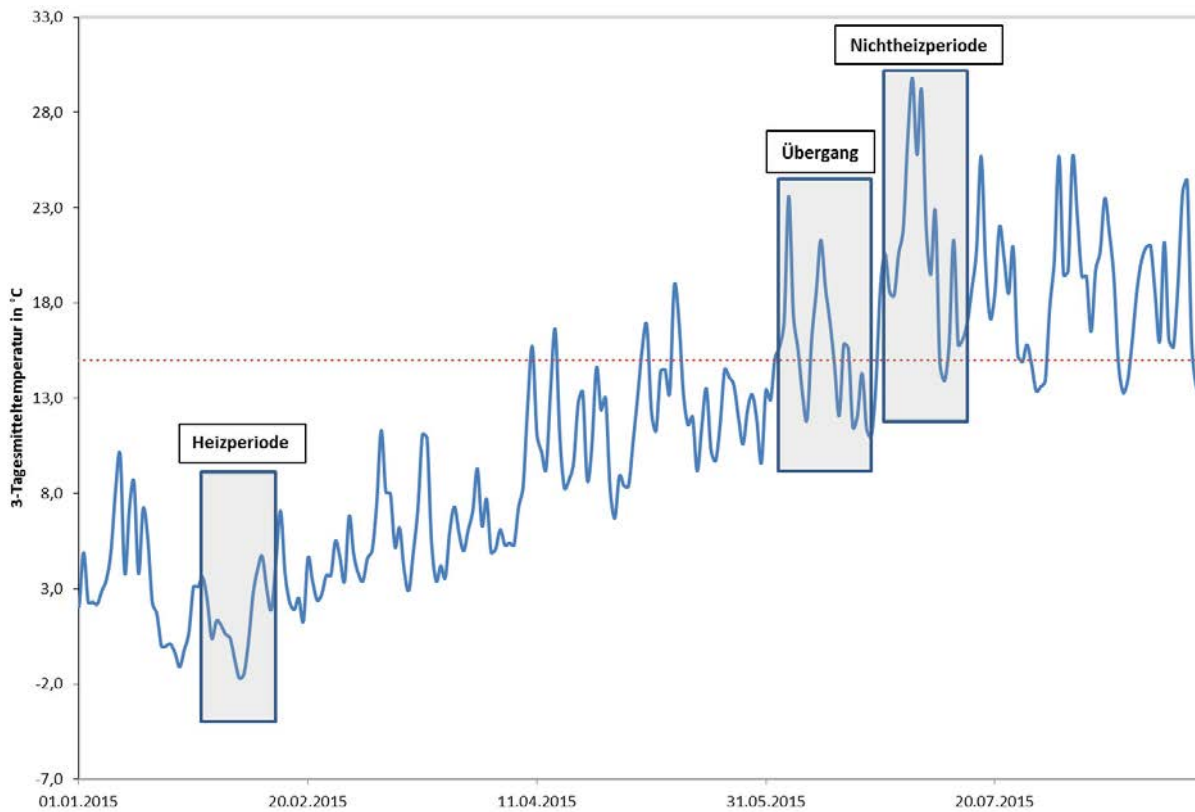


Abbildung 99: Referenzzeiträume Heizperiode, Übergang, Nichtheizperiode; anhand gemittelter Extrema

Die Verschiebung des Übergangszeitraumes in Richtung Nichtheizperiode ist dem Umstand geschuldet, dass die vom DWD zur Verfügung gestellten Strahlungsdaten für den zu betrachtenden Zeitraum nicht korrigierbare Messfehler enthielten. Unter Berücksichtigung der ermittelten Typologie des 100 KWK-Gebäudebestandes wurde eine Periode gewählt, welche sich um die klassische Heizgrenztemperatur von Altbauten einpendelt. Diese Heizgrenztemperatur beträgt für Neubauten ca. 10 °C und für Altbauten ca. 15 °C, was dem zu betrachtenden Bestand am nächsten kommt.

Für die Jahressimulationen wurde auf Testreferenzjahre (engl.- test reference year, kurz TRY) zurückgegriffen. Sie sind als vollständiger Datensatz mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung beim Deutschen Wetterdienst erhältlich und eignen sich besonders gut für zeitlich hochaufgelöste Jahressimulationen. Abschließend sind in Tabelle 47 die festgelegten Zeiträume aufgeführt.

Tabelle 47: Zeitintervalle der definierten Referenzzeiträume

Zeitraum	Datum
Heizperiode	30.01.-10.02.2015
Übergang	30.05.-10.06.2015
Nichtheizperiode	03.07.-14.07.2015

3.4.1 Mehrzonenmodell: Abgleich mit Messdaten

Die im folgenden Kapitel dargestellten Ergebnisse sollen den Validierungsprozess beschreiben und als Nachweis der Leistungsfähigkeit der erstellten Modelle dienen. Die Simulationsergebnisse werden exemplarisch für drei ausgewählte Gebäudemodelle präsentiert. Es handelt sich dabei um ein Einzonenmodell eines Einfamilienhauses und um jeweils ein Mehrzonenmodell eines Einfamilienhauses und eines Mehrfamilienhauses. Auf Basis von Mehrzonenmodellen werden die IDs 221 und 227 ausgewertet. Die ID 004 stellt das Referenzobjekt für das Einzonenmodell dar. Die zugehörigen Rahmendaten sind in Tabelle 17 und Tabelle 18 enthalten. Entsprechend der generellen Aufteilung der Gesamtmodelle werden die Ergebnisse der Simulation der Gebäudehülle und des Versorgungssystems den jeweiligen Messdaten gegenübergestellt. Zur Verbesserung der Übersicht werden die Ergebnisse der Simulation im aktuellen Kapitel immer in orange dargestellt und die Messdaten in blau. Zu Beginn der Heizperiode kam es durch Störungen im GSM-Netz zu Ausfällen der Datenübermittlung, welche auf die kumuliert gemessenen Daten nur einen geringen Einfluss hatten, aber die Darstellung von Leistungsdaten für den Zeitraum des Ausfalls unmöglich macht. Diese Ausfälle wurden in den Graphen grau kenntlich gemacht.

Beginnend mit dem Heizwärmebedarf wird der Abgleich der thermischen Gebäudehülle realisiert. Die Validierung des thermischen Gebäudemodells weist nach, dass die wetterbedingte thermische Ein- und Auskopplung von Energien im Modell korrekt simuliert wird und somit den wetterabhängigen Heizwärmebedarf des zu betrachtenden Objekts korrekt abbildet. Das Gebäudemodell simuliert den durch das Versorgungssystem bereitzustellenden Wärmebedarf, welcher eine Funktion des Gebäudetyps, des Nutzerverhaltens und des Wetters ist.

Die Validierung des Versorgungssystems wird 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.

Die Validierung der Modelle wird anhand der im Kapitel „Wetterdaten“ definierten drei Referenzzeiträume vorgenommen. Entsprechend der chronologischen Reihenfolge wird mit der Heizperiode (Winter) begonnen.

3.4.1.1 Einfamilienhaus

ID 221 - Heizperiode (Winter)

Wie anhand der Gegenüberstellung des simulierten und gemessenen Heizwärmebedarfs in Abbildung 100 erkennbar ist, korreliert der Wärmebedarf der Simulation mit der real gemessenen überwiegend sehr gut. Die zu erkennende Abweichung ab der Nacht von Freitag auf den Sonnabend konnte nach Analyse der Messdaten zu Heizwärme und Trinkwarmwasser auf eine vermehrte Heizaktivität und Anwesenheit von mehr Personen als üblich zurückgeführt werden. Die messtechnisch erhobenen Daten lassen nur im geringem AusmaÙe Aussagen über stark schwankendes Nutzerverhalten zu und können somit aufgrund der begrenzten Datenlage nur bedingt in der Simulation abgebildet werden.

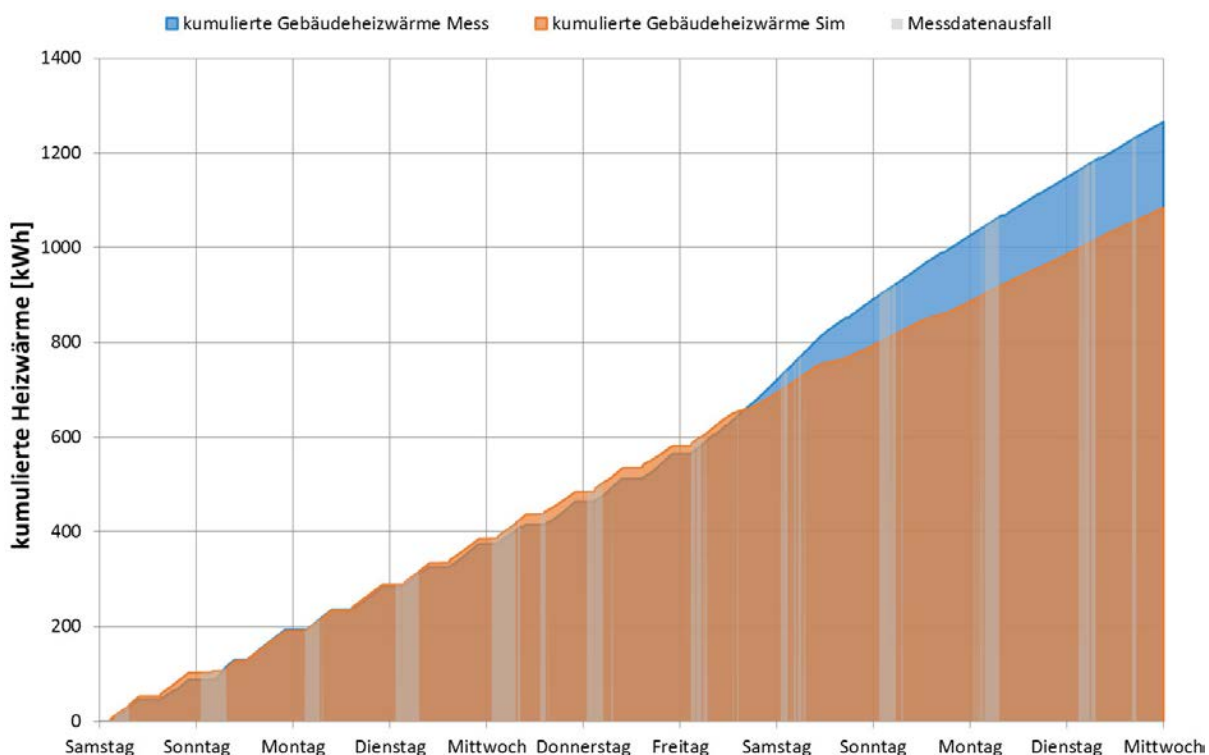


Abbildung 100: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf in der Heizperiode

Die in den ersten sechs Tagen von Samstag 0:00 Uhr bis Freitag 0:00 Uhr erhaltenen Simulationsergebnisse weisen eine hohe qualitative und quantitative Übereinstimmung auf. Die Abweichung der kumulierten Wärmemengen beträgt in diesem Zeitraum nur +17 kWh bei gemessenen 565 kWh gegenüber 582 kWh in der Simulation. Die relative Abweichung beträgt somit +3% und liegt innerhalb der Messgenauigkeit des installierten Wärmemengenzählers. Der folgende gesteigerte Bedarf erstreckt sich bis zum Ende des Betrachtungszeitraums mit einer täglich kleiner werdenden Differenz zu den Simulationsergebnissen (siehe Abbildung 102). Zeitgleich ergibt sich am Freitag, zu Beginn des stark erhöhten Heizwärmebedarfes, ein mit 20 kWh deutlich erhöhter Brauchwasserwärmebedarf. Der Tagesdurchschnitt der übrigen Tage beträgt nur 11,6 kWh pro Tag (siehe Abbildung 103). Obwohl das nicht-Auftreten der Tages- und Nachtabenkung durch das Modell dargestellt werden konnte (siehe Abbildung

101), ist der erhöhte Heizwärmebedarf mit einer nicht darstellbaren Ausnahmesituation von Seiten des Bewohnerverhaltens zu begründen. So ist es möglich, dass ein zusätzlicher Gebäudereich von Freitag an durchgehend beheizt wurde und oder mehr Personen anwesend waren, welches zu einem erhöhtem Luftaustausch führte. Der Anstieg der mittleren Umgebungstemperatur von $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ am Sonnabend auf 3 bis $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in den folgenden Tagen, steht im Widerspruch zu einem gesteigerten Heizwärmebedarf durch Umwelteinflüsse.

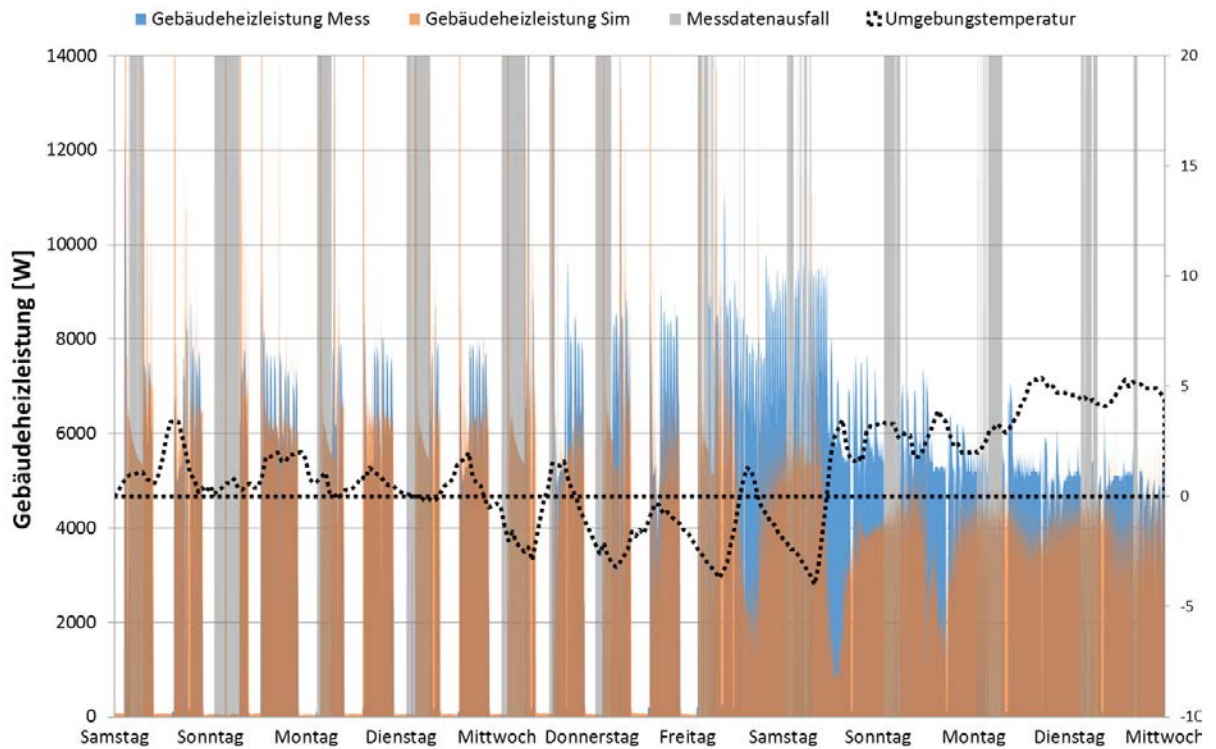


Abbildung 101: Gebäudeheizleistung in der Heizperiode

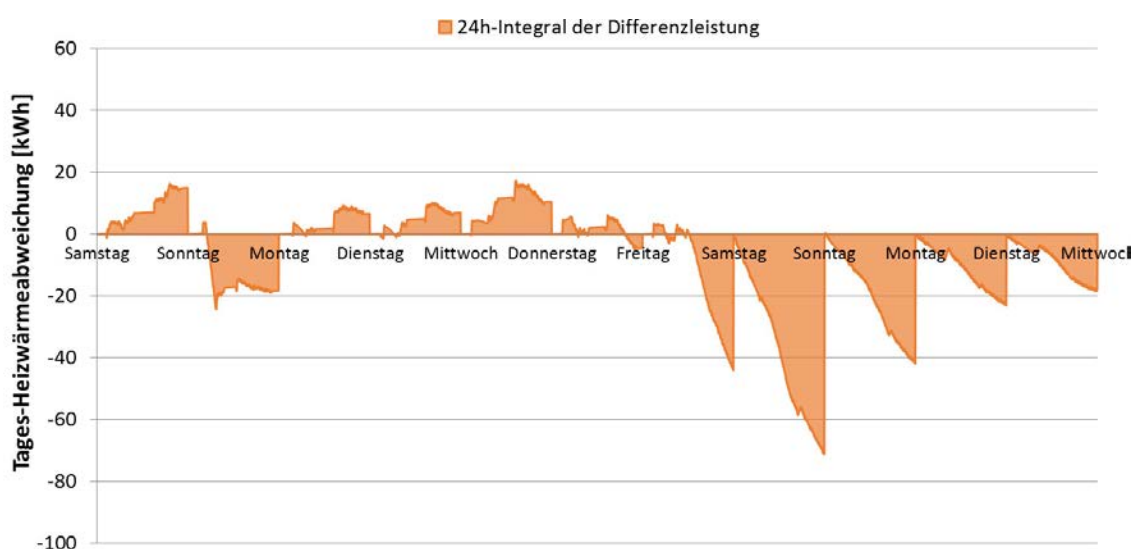


Abbildung 102: Kumulierte Heizwärmeabweichung in der Heizperiode

Neben dem reinen Heizwärmebedarf des Gebäudes stellt auch der Brauchwasserwärmebedarf eine zu deckende Wärmeanforderung an das Wärmeversorgungssystem. Das Verhalten des Modells im Vergleich zum Realobjekt ist in Abbildung 103 dargestellt und zeigt eine hohe Übereinstimmung auf. Es ergeben sich hier geringe Abweichungen des Modells vom Realverhalten, da die in das Modell eingepflegten Leistungswerte des Wärmemengenzählers vereinzelt Messdatenausfälle aufweisen. Anstatt einer Interpolation der Leistungswerte wurde stattdessen ein Faktor von 1,36 auf die Leistungsdaten angewandt, um kumuliert denselben Wärmebedarf über den Zeitraum anzufordern. Die daraus resultierenden synthetisch erzeugten Leistungsspitzen in der Trinkwarmwasserversorgung werden über den thermischen Speicher gedämpft und entwickeln somit nur einen geringfügigen Effekt auf Seiten der KWK-Anlage und des Zusatzheizgeräts.

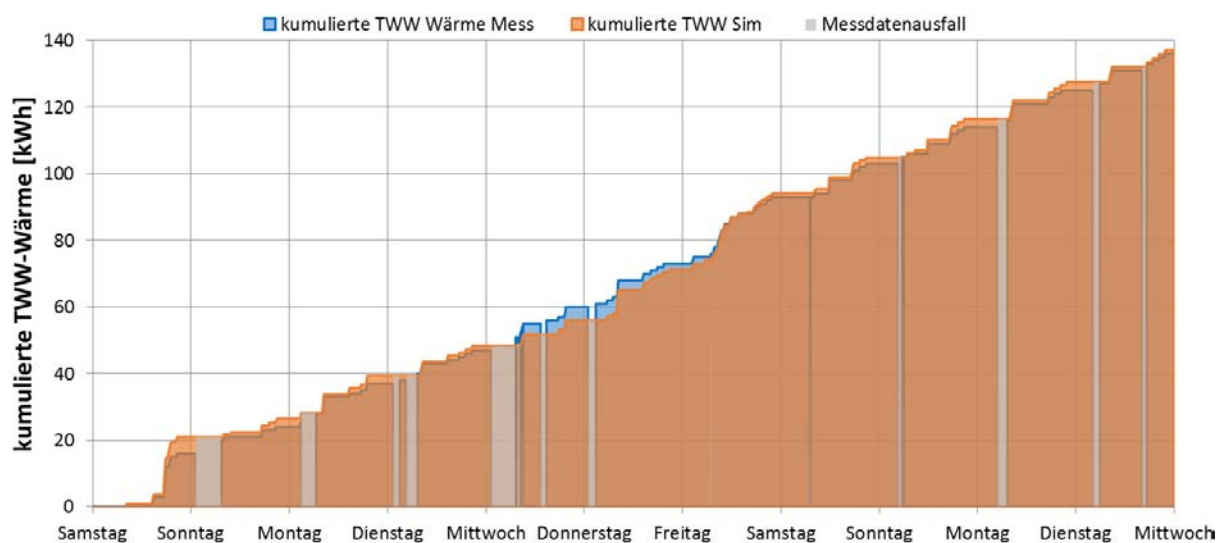


Abbildung 103: Kumulierten Brauchwarmwasserwärme mit Bedarfsspitze am Freitag in der Heizperiode

Das Raumtemperaturverhalten des Simulationsmodells im Vergleich zu der durch die Raumtemperaturregelung vorgegebenen Solltemperatur ist in Abbildung 104 dargestellt. Das thermische Verhalten während des Aufheizens und Abkühlens der einzelnen Räume entspricht dem aus der Theorie zu erwartenden Verhalten. Darüber hinaus setzen die Temperaturregler im Zusammenspiel mit den Heizungsventilen die vorgeschriebenen Temperaturen sehr gut um. Es ist weiterhin ein realistisches Überschwingen des PI-Thermostatreglers zu Beginn der Heizphase zu beobachten wie auch der Störeinfluss der variierenden Solarstrahlung. Das Ansteigen der Raumtemperatur kurz vor dem Beginn der Absenkung ist mit dem zeitgleichen Wechsel der Anwesenheitsluftaustauschrate zur Absenkungsrate zu begründen, da die Radiatoren aufgrund ihrer thermisch trägen Masse weiter Wärme an den Raum abgeben. Von Freitag an wurde die normale Raumtemperaturabsenkung durch die Regelung ausgesetzt und die Solltemperatur durchgehend auf dem Tagessollwert belassen.

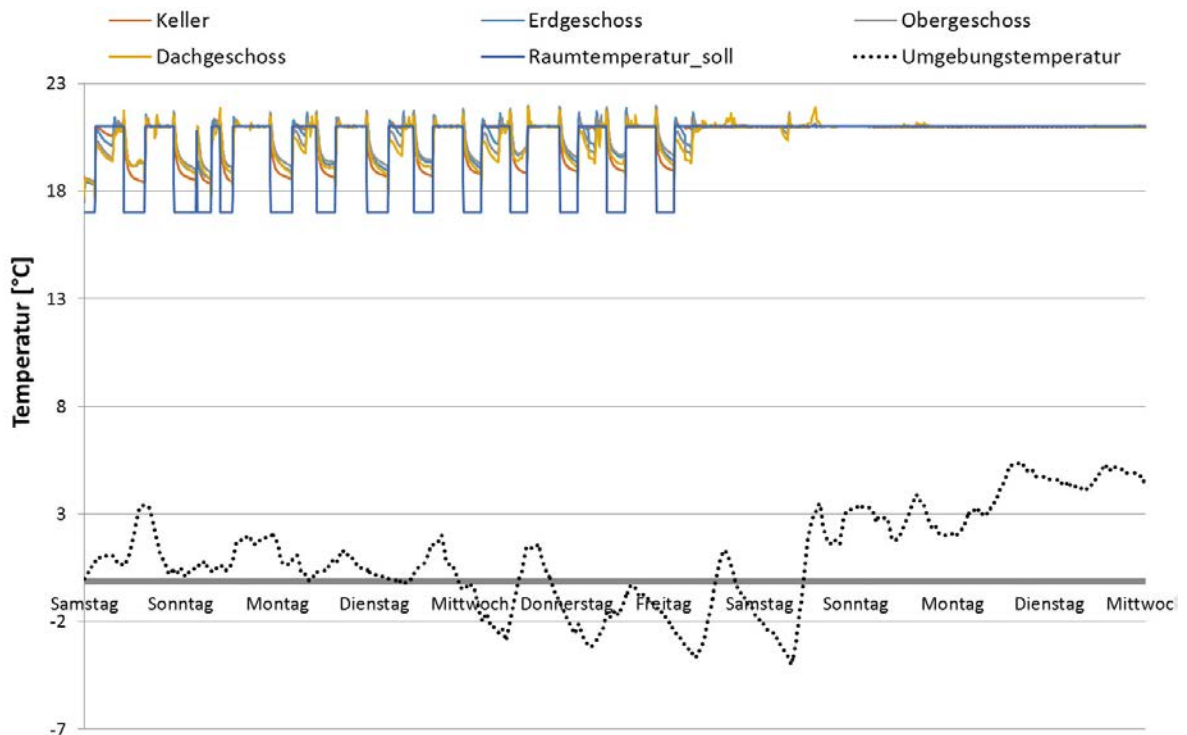


Abbildung 104: Gegenüberstellung der simulierten Raumtemperaturen in den verschiedenen Zonen und der gemessenen Außentemperatur in der Heizperiode

Als Resultat des vorangegangenen Abgleichs und der sehr guten qualitativen und quantitativen Übereinstimmung kann das thermische Gebäudemodell für den Referenzzeitraum der Heizperiode als validiert betrachtet werden. Aufbauend auf diesem Ergebnis folgt die Validierung der Versorgungsanlage für den betrachteten Zeitraum, unter Berücksichtigung der erläuterten Einschränkungen.

Der bereitgestellte KWK-Strom ist in kumulierter Form in Abbildung 105 abgebildet. Nach den ersten sechs, wie zuvor beschrieben sehr repräsentativen Tagen ergibt sich bis Freitag 0:00 Uhr eine relative Abweichung von +14 % bei gemessenen 85,1 kWh zu 98,6 kWh in der Simulation. Da es sich um eine systematische tägliche Abweichung bei gleichzeitiger Übereinstimmung der Wärmemengen handelt, ist von einem zu hoch angesetzten elektrischen Wirkungsgrad auszugehen. Ursächlich hierfür ist der Umstand, dass während der Modellierungsphase noch keine Daten der Hersteller zur Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der KWK-Vorlauftemperatur vorlagen. Diese Daten wurden dem GWI mittlerweile zur Verfügung gestellt und werden im Rahmen des Folgeprojekts in die vorhandenen Modelle implementiert. Herstellerangaben zu den Regelungslogiken und Schaltgrenztemperaturen wurden übernommen. Die erhöhte Stromproduktion ab Freitag kann wie bereits in der Gebäudevalidierung beschrieben aufgrund einer ungewöhnlichen Bedarfssituation von Seiten der Bewohner nicht dargestellt werden.

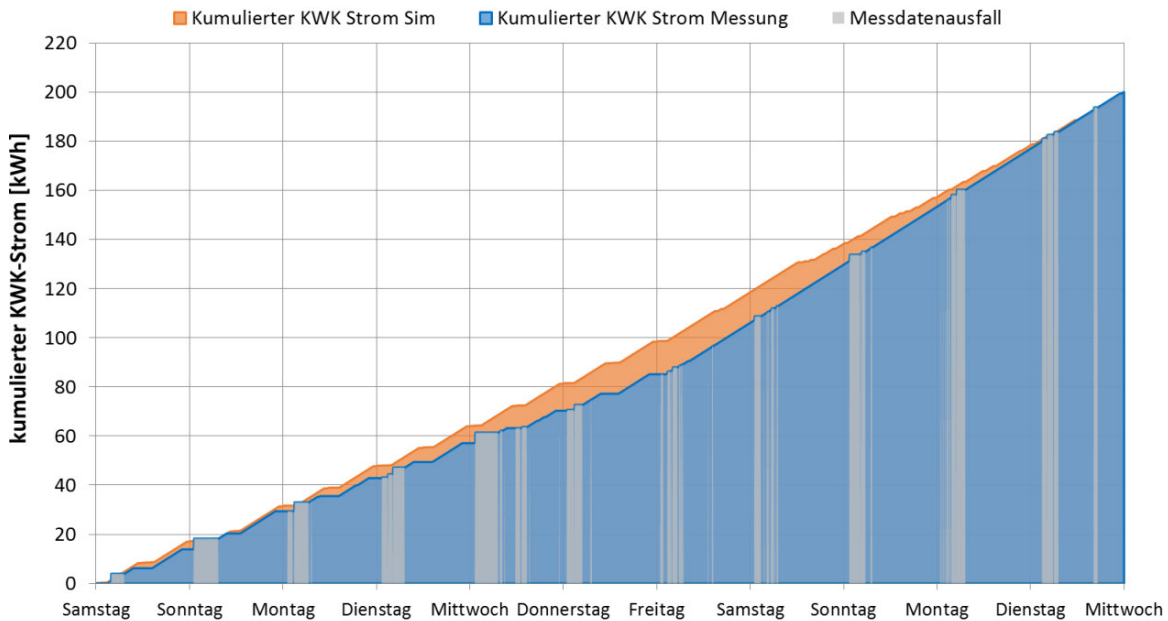


Abbildung 105: Kumulierte KWK-Stromproduktion in der Heizperiode

Der qualitative Verlauf der kumulierten KWK-Stromproduktion erscheint trotz der Abweichungen repräsentativ. Betriebszeiträume, wie auch Ein- und Ausschaltvorgänge und elektrische Leistungswerte sind in Abbildung 106 abgebildet. Von Beginn des Betrachtungszeitraumes bis zum folgenden Freitag ist ein hohes Maß an zeitlicher Korrelation zwischen der gemessenen und simulierten KWK-Taktung zu erkennen, mit einer zu erwartenden leicht verlängerten Betriebsdauer. Für Zeiträume mit Messdatenausfällen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit anzunehmen, dass sich das Modell korrekt verhält, da die anliegende Zeiträume diesen Schluss zulassen und die kumulierten Energiemengen (Strom, Wärme) keine große Abweichung aufweisen. Ab Freitag bis zum Ende des Zeitraums weist das Modell wie erwartet geringere Betriebszeiten als die Messung auf.

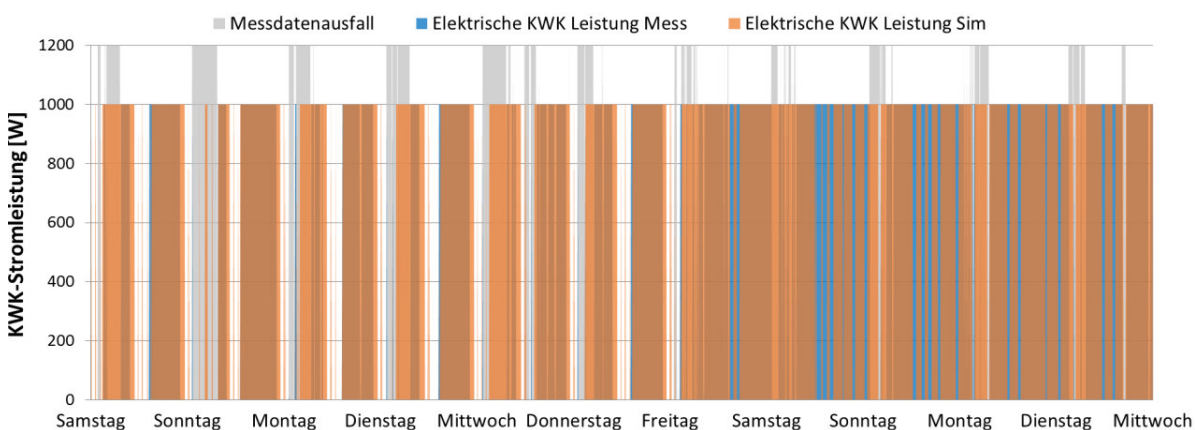


Abbildung 106: Elektrische Leistung der KWK-Anlage in der Heizperiode

Die Abweichungen des kumulierten Brennstoffverbrauchs (siehe Abbildung 107) belaufen sich insgesamt auf -7 % in den ersten sechs Tagen mit 86,1 m³ zu 79,6 m³. Bei einem mit 3 % leicht höheren Heizwärmebedarf des Modells und einer 17 % erhöhten Stromproduktion lässt dies den Schluss zu, dass im Modell nicht angenommene An- und Abfahrverluste, wie auch

Wärmeverluste der KWK-Anlage an die Umgebung, diese systematische Abweichung ausmachen. Ein erhöhter KWK-Anteil würde zudem einen erhöhten Gasverbrauch bedeuten.

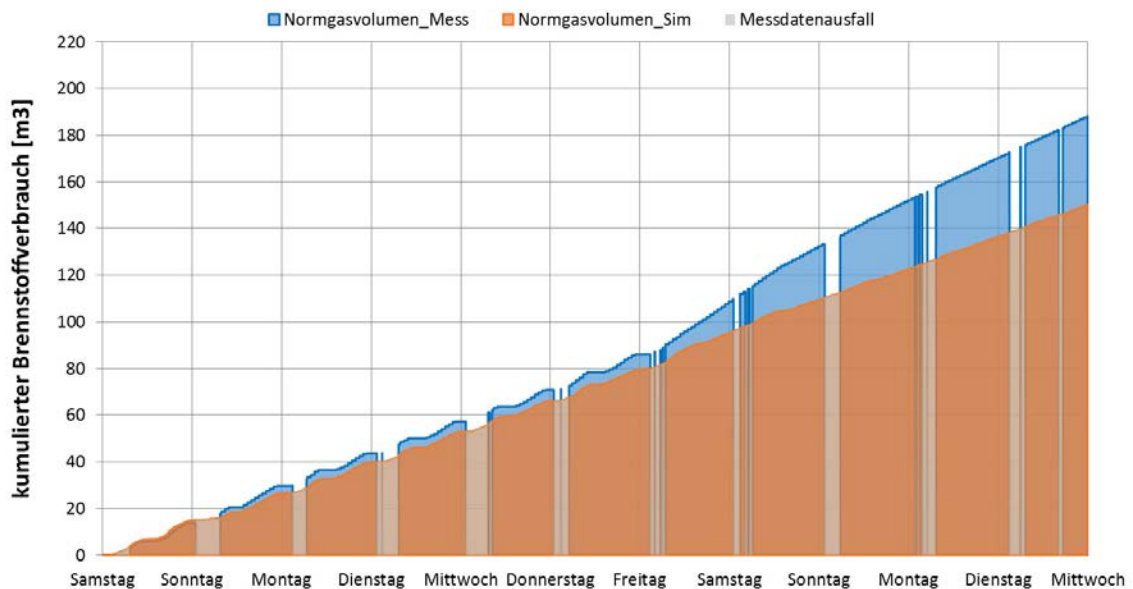


Abbildung 107: Kumulierter Brennstoffverbrauch in der Heizperiode

ID 221 – Übergangszeitraum

Die Validierung des Modells für den Übergangszeitraum steht exemplarisch für die Jahreszeiten Frühling und Herbst, da in diesen Zeiträumen der Übergang von der Heizperiode zur Nichtheizperiode vonstattengeht. Der Übergangszeitraum ist dadurch gekennzeichnet, dass die für das jeweilige Gebäude spezifische Heizgrenztemperatur periodisch über- und unterschritten wird. Für den vorliegenden Übergangszeitraum konnte ein repräsentatives Verhalten des Simulationsmodells erreicht werden. Kumuliert ergibt sich für den Heizwärmebedarf am Ende des gewählten Zeitraums eine Abweichung von 1,7 % bei gemessenen 277 kWh zu 282 kWh in der Simulation (siehe Abbildung 108). Das qualitative Verhalten scheint im Vergleich mit den Messdaten plausibel, das zeitliche Auftreten von Ereignissen führt zu vergleichbaren Reaktionen in der Simulation und in der Realität.

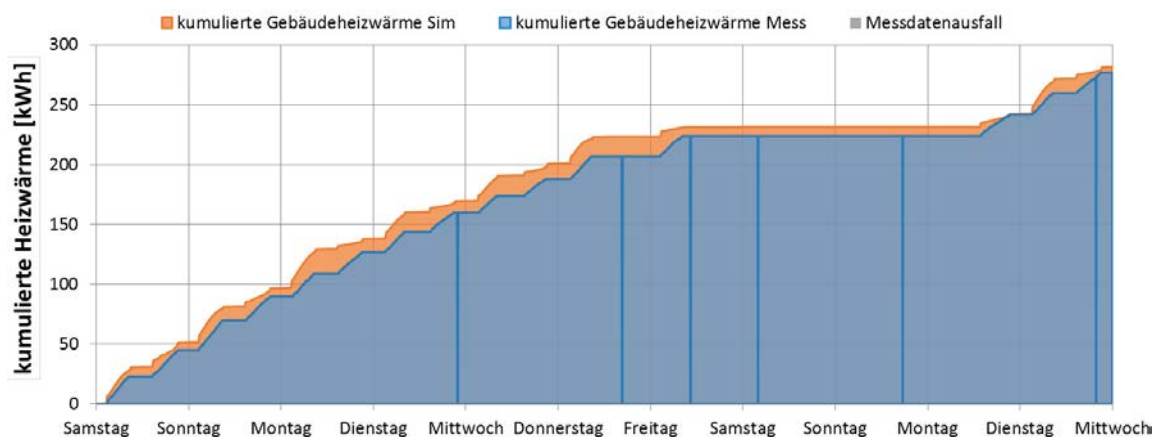


Abbildung 108: Kumulierter Heizbedarf im Übergangszeitraum

Nach Abbildung 110 ergibt sich in den ersten sechs Tagen ein täglicher Mehrbedarf in der Simulation von 3 bis 7 kWh. In den folgenden drei Tagen zwischen Samstag 0:00 Uhr und Montagabend stellt das Modell sehr gut die Überschreitung der Heizgrenztemperatur dar. Es ist sowohl simulationsseitig als auch aus der Analyse der Messdaten erkennbar, dass es zu keiner Wärmebedarfsanforderung kommt.

Obwohl das Gebäudemodell wie in Abbildung 109 ersichtlich zu denselben Zeitpunkten Heizwärme bezieht, kommt es in der ersten Heizperiode des Tages zu einem überhöhten Wärmebedarf und später einem zu niedrigen. Es ist anzunehmen, dass das Lüftungsverhalten im Übergangszeitraum eine größere zeitliche Abhängigkeit aufweist als im Winter.

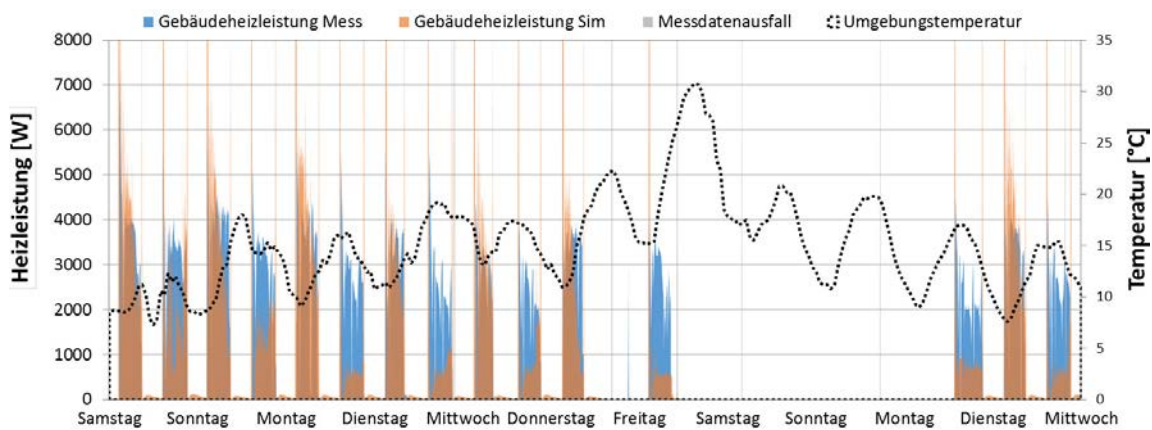


Abbildung 109: Gebäudeheizleistung im Übergangszeitraum

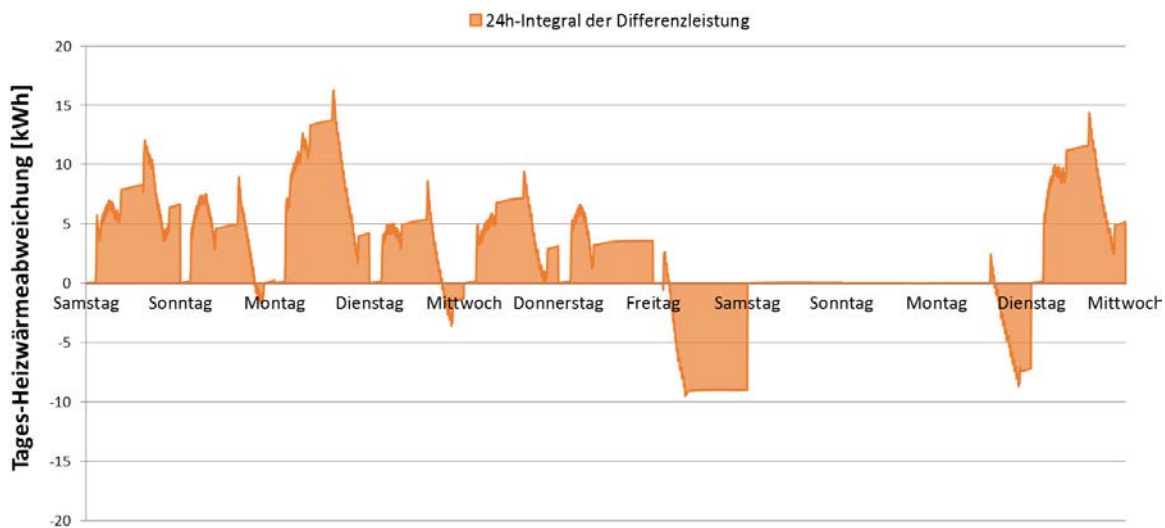


Abbildung 110: Kumulierte Heizwärmeabweichung im Übergangszeitraum

Charakteristisch für den Übergangszeitraum ist der regelungstechnische Schritt von Heiz- zu Nichtheizperiode in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Dieser Übergang ist in Abbildung 109 deutlich an der Nichtheizphase zwischen Freitagmittag und Montag bei mittleren Umgebungstemperaturen von über 15 °C zu erkennen. Die Raumtemperaturen verlaufen dabei wie in Abbildung 111 ersichtlich zwischen nachts 18 °C und tagsüber bis zu 31 °C. Eine Ausnahme bildet der sehr warme Freitag, an dem sich das Gebäude stark aufheizt. Die

Aufheizung des Dachgeschosses ist dabei wie zu erwarten deutlich höher als die der restlichen betrachteten Räume.

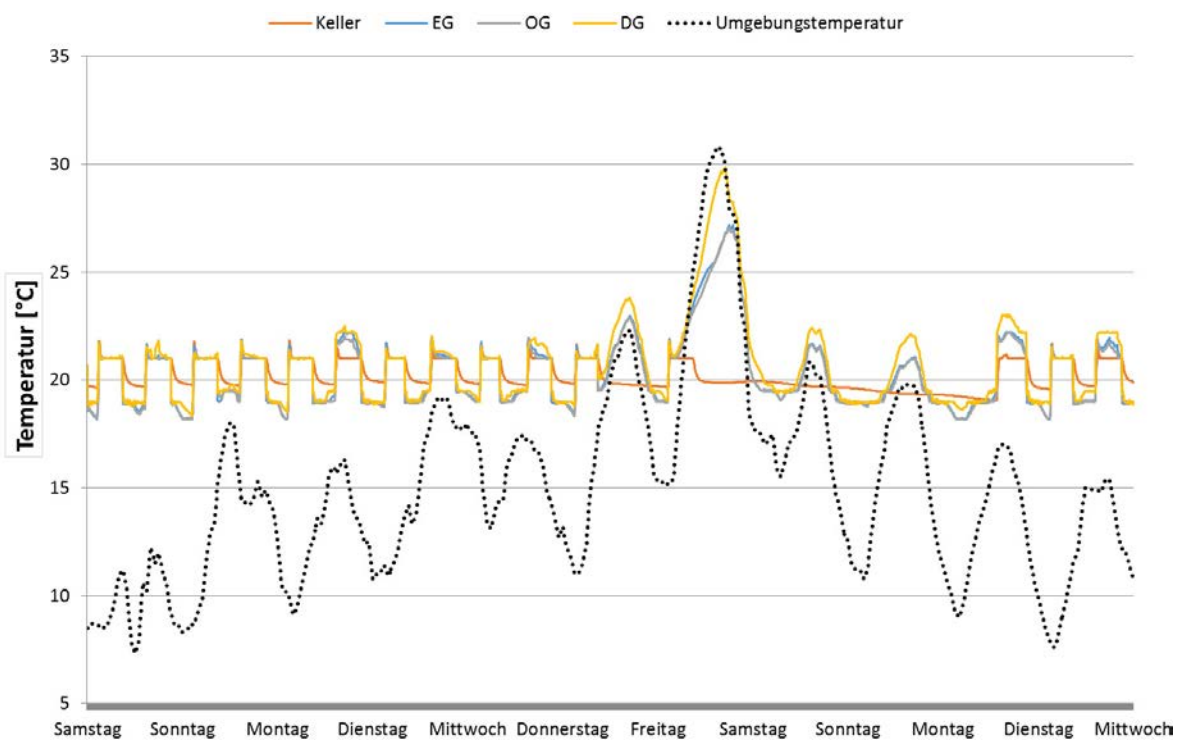


Abbildung 111: Gegenüberstellung der simulierten Raumtemperaturen in den verschiedenen Zonen und der gemessenen Außentemperatur im Übergangszeitraum

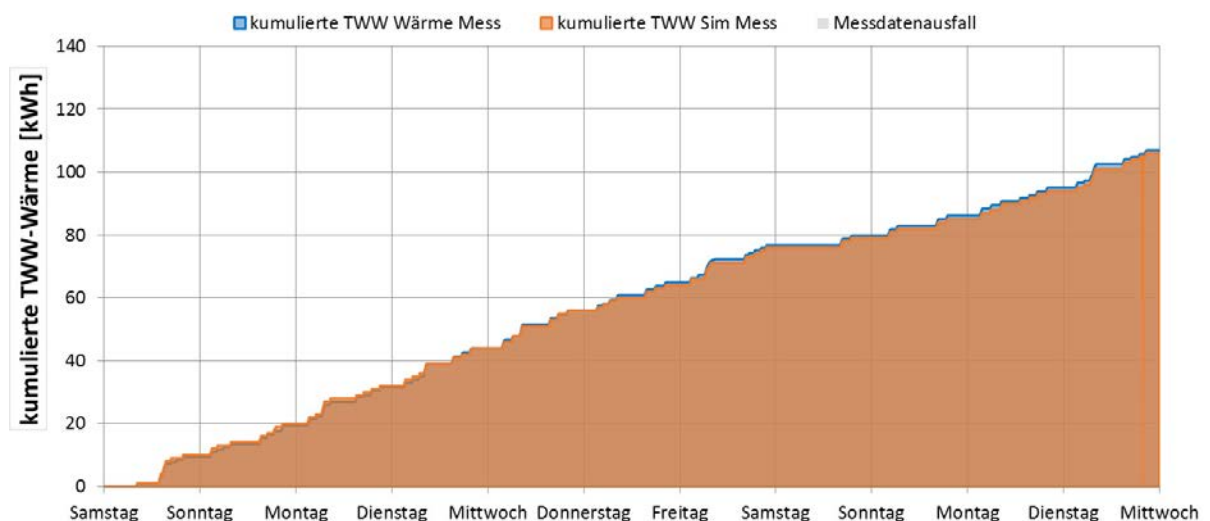


Abbildung 112: Kumulierte Brauchwarmwasserwärme im Übergangszeitraum

Der Brauchwasserwärmebedarf des Modells ergibt mit kumuliert 106 zu 107 kWh bei einem identischen Ereignisverhalten eine hohe Übereinstimmung mit den Messdaten. Die auftretende Abweichung von unter 1 % liegt deutlich unter der Messgenauigkeit der angewandten Wärmemengenzähler. Zusammen mit den oben beschriebenen, ebenfalls repräsentativen Heizverhalten des Gebäudes, kann das Verhalten der KWK-Anlage im Folgenden bewertet werden.

Die in Abbildung 113 dargestellte kumulierte KWK-Stromproduktion ist in ihrer qualitativen Ausprägung nahezu deckungsgleich mit den gemessenen Daten und weist auch absolut nur eine minimale Differenzen auf. Diese sehr guten Ergebnisse ergänzt durch die hohe Übereinstimmung auf Seiten des Wärmebedarfs bestätigen somit die Kopplung von Wärmebedarf und KWK-Betrieb. Die Stromproduktion zwischen Freitagmittag und Montag, an denen keine Heizwärme benötigt wird, ist auf die angenommenen thermischen Speicherverluste und den Brauchwasserwärmebedarf zurückzuführen. Die Wärmeverluste über den Speicher wurden in der Simulation als konstant angenommen, da keine Temperaturdaten aus dem Aufstellungsraum zur Verfügung standen. Diese Annahme führt speziell in wärmeren Zeiträumen zu einem geringen Fehler, welcher jedoch sehr leicht durch zusätzliche Messungen im Aufstellungsraum behoben werden könnten. Insgesamt ergibt sich somit am Ende des Zeitraums eine positive Abweichung der Simulation von den Messdaten. Diese beträgt 7,3 % bei 78,5 kWh zu 73,1 kWh. Anhand von Abbildung 114 ist ersichtlich, dass es auch bei der generellen Taktung der KWK-Anlage eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten erreicht werden konnte. Die Leistungsfähigkeit des Modells im Hinblick auf dieses Verhalten der KWK-Anlage ist besonders wichtig für zukünftige Szenarien-Analysen zur gesteigerten Eigenstromnutzung.

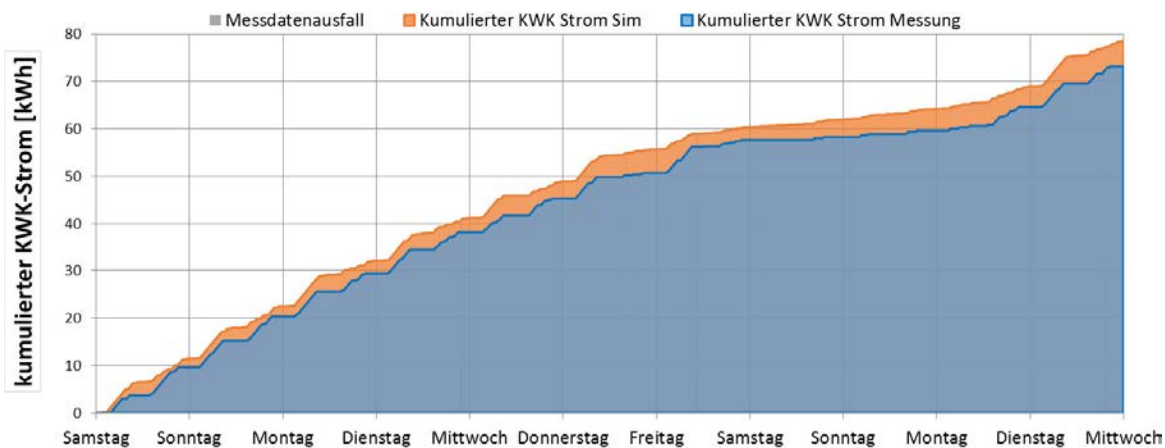


Abbildung 113: Kumulierte KWK-Stromproduktion im Übergangszeitraum

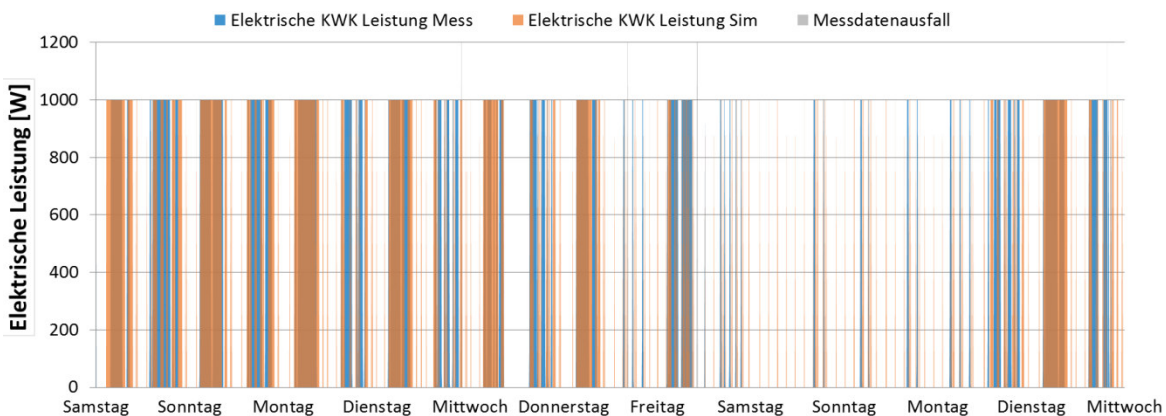


Abbildung 114: Elektrische Leistung der KWK-Anlage im Übergangszeitraum

Der resultierende kumulierte Brennstoffverbrauch (siehe Abbildung 115) zeigt in den Heizzeiträumen unter Berücksichtigung der tagesabhängigen Abweichung des Heizverhaltens eine hohe Repräsentativität auf. So ergeben sich zum Ende des Betrachtungszeitraums Abweichungen von 0,4 % bei 52,57 m³ der Messung zu 52,79 m³ des Modells. Die größere Steigung des Graphen zwischen Freitagmittag und Montag, an denen nicht geheizt wird, deutet auf die bereits beschriebenen höheren Verluste über den Wärmespeicher hin. Dieser wird vermutlich durch eine zu hoch angenommene treibende Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung hervorgerufen. Das Objekt weist darüber hinaus eine Besonderheit im Vergleich zu den meisten anderen Objekten auf, da die KWK-Anlage im Dachgeschoss installiert wurde. Folgerichtig sind die Temperaturschwankung zwischen Umgebung und Speicher saisonal besonders groß. Aufgrund fehlender Messdaten zur Umgebungstemperaturen kann der Wärmeverlust aus dem Speicher in Richtung des Dachgeschosses nicht dargestellt werden.

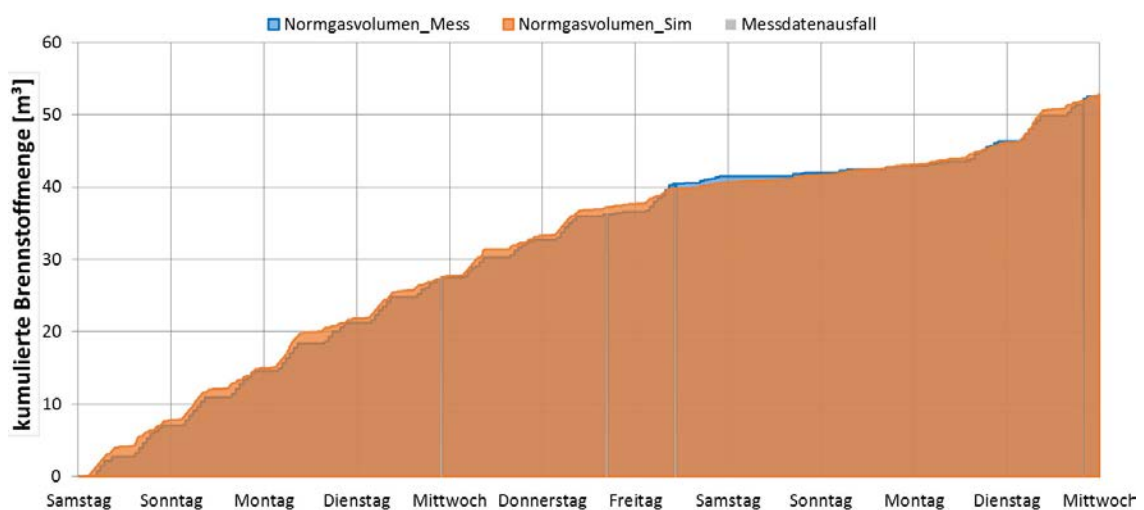


Abbildung 115: Kumulierter Brennstoffverbrauch im Übergangszeitraum

Die Objekteinspeisung wird in Abbildung 116 dargestellt. Die bereits beschriebene systematisch positive Abweichung der KWK-Stromproduktion von resultierend 5,4 kWh stellt sich bei der Objekteinspeisung ebenso durch eine positive Abweichung von 7,8 kWh dar.

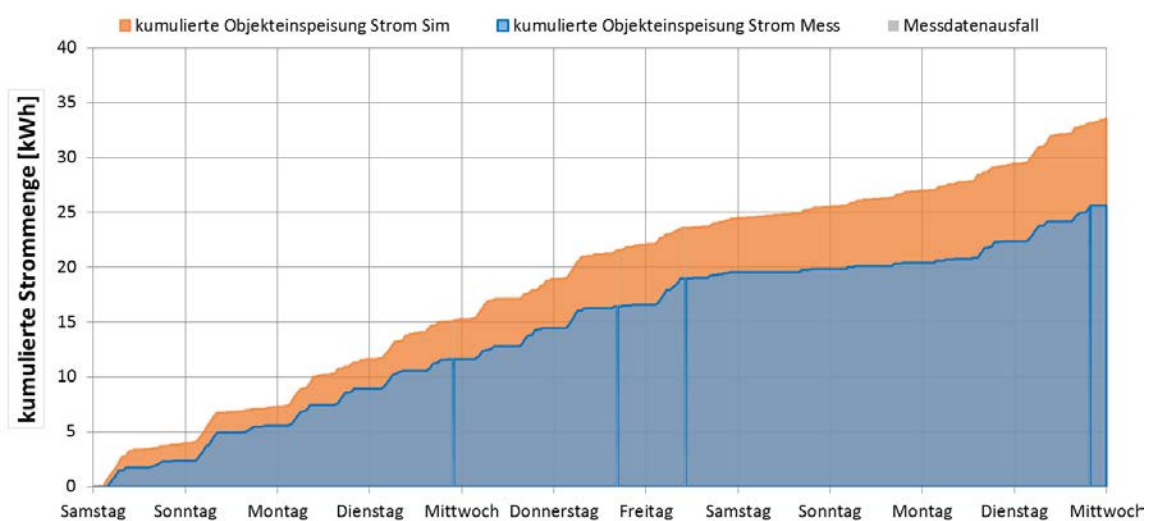


Abbildung 116: Stromeinspeisung im Übergangszeitraum

Die Abweichung zwischen diesen beiden Werten resultiert vermutlich einerseits aus den unterschiedlichen Betriebszeiten der KWK-Anlage im Modell und der Realität, welche die Gleichzeitigkeit von Produktion und Verbrauch betreffen. Des Weiteren entsteht vermutlich durch die Anwendung der Stromkorrektur eine geringe Abweichung in den An- und Abfahrvorgängen. Da die resultierende Gesamtabweichung mit 2,4 kWh messwertbezogen 9,2 % und simulationsbezogen 7,3 % beträgt sowie das qualitative Ereignisverhalten dargestellt wird, kann von einer guten Repräsentativität ausgegangen werden. Mit steigendem Wärmebedarf würde die relative Abweichung durch die Wärmeverluste im Winter zudem sinken.

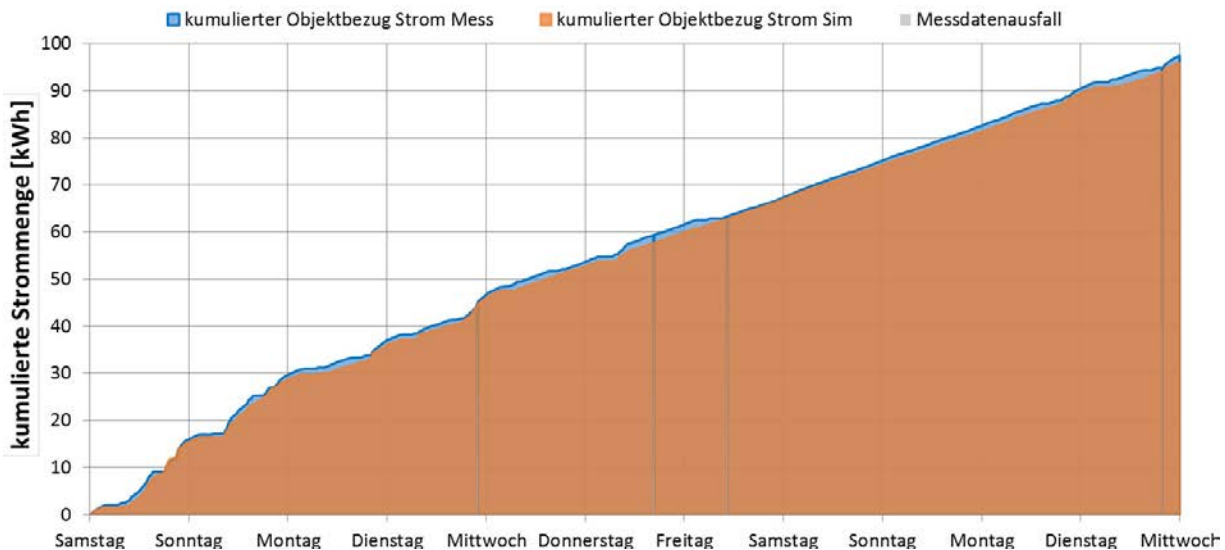


Abbildung 117: Strombezug im Übergangszeitraum

Der elektrische Objektbezug stellt sich in Abbildung 117 realistisch dar. Aufgrund der leicht erhöhten Stromproduktion stellt sich zum Ende des Zeitraumes eine Abweichung von -1,5 kWh ein. Einen geringen Einfluss auf die Unterschiede im quantitativen wie qualitativen Verlauf des Simulationsgraphen im Vergleich zur Messung stellt die Abweichung in den Betriebszeiten der KWK-Anlage dar. Bei der Betrachtung eines Wochenzeitraums ist dieser allerdings zu vernachlässigen.

ID 221 – Nichtheizperiode (Sommer)

Die in Abbildung 118 dargestellte kumulierte Heizwärme weist im Sommerzeitraum deutliche Abweichungen von den Messwerten auf. So kommt es beim Absinken der Umgebungstemperatur unter 15 °C am Freitag, wie in der Messung, zu einer Beheizung des Gebäudes. Allerdings steigt die Umgebungstemperatur in den folgenden Tagen wieder deutlich über 15 °C, sodass eine Beheizung des Gebäudemodells bei den angenommenen Luftaustauschraten und in dem Umfang nicht zustande kommt (siehe Abbildung 119). Die durchgängige Beheizung von Freitag bis Samstagabend deckt sich somit nicht mit dem Wärmeheizbedarf der Simulation. Dieses Phänomen kann sowohl auf physikalische als auch menschliche Ursachen hinweisen. Als menschliche Ursache kann ein verändertes Lüftungsverhalten und oder Heizverhalten vorliegen. Nach Analyse des Trinkwarmwasserbedarfs ist ein verändertes Bewohnerverhalten wahrscheinlich und wird im Kapitel zur Auswertung des Trinkwarmwasserbedarfs näher be-

leuchtet. Darüber hinaus wird in den Simulationen keine durch die Nutzer betriebenen Verschattungseffekte durch Rollos oder Jalousien abgebildet. Somit ist eine Überbewertung des solaren Energieeintrags in das thermische Gebäudemodell denkbar. Die Quantifizierung dieser Effekte kann durch eine Erweiterung der Messdatenerfassung um eine Einzelraumtemperaturmessung oder Wärmemengenzähler in den einzelnen Räumen leicht realisiert werden.

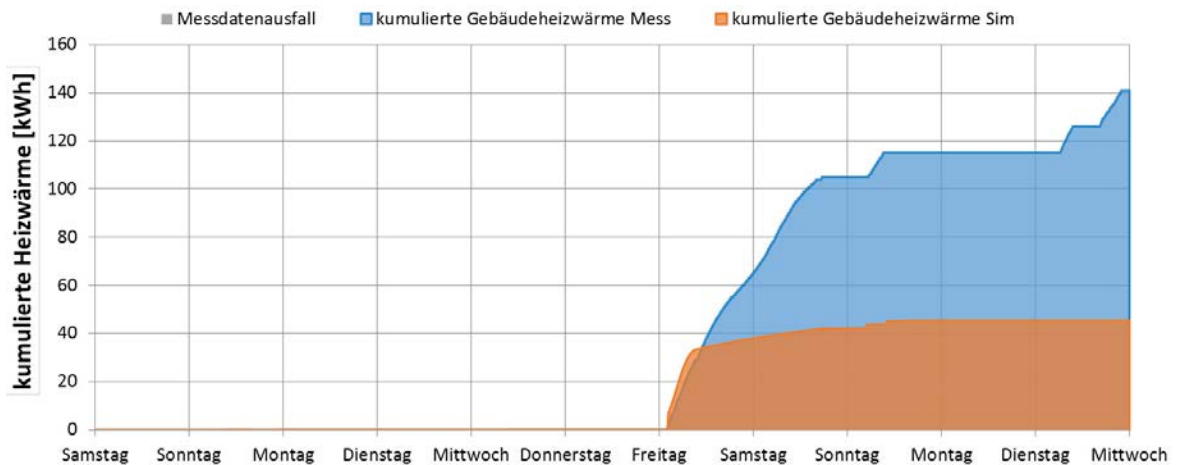


Abbildung 118: Kumulierter Heizwärmebedarf in der Nichtheizperiode

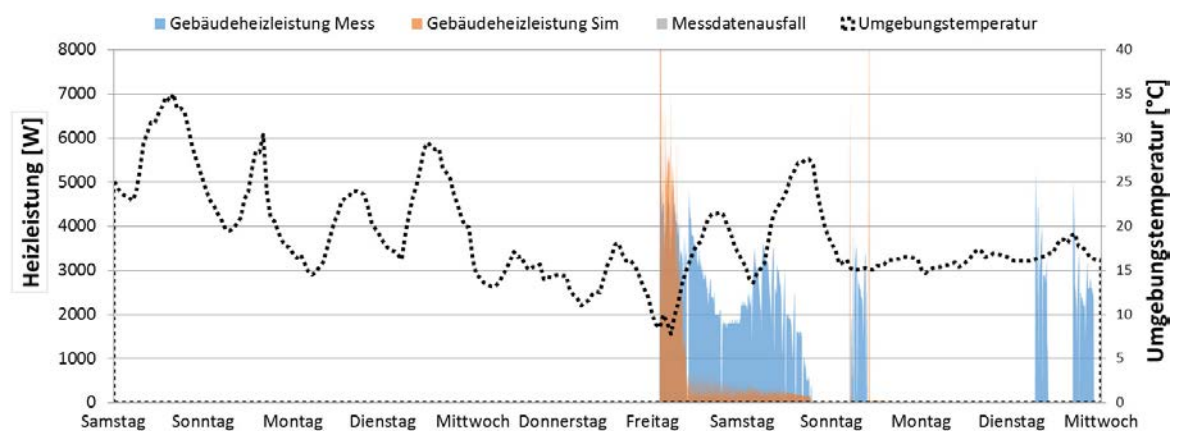


Abbildung 119: Gebäudeheizleistung in der Nichtheizperiode

Die Raumtemperaturen (siehe Abbildung 120) des Modells liegen in den dargestellten Beheizungszeiträumen teils deutlich über den angestrebten 21 °C, obwohl die Umgebungstemperaturen niedriger ausfallen. Dies ist zum Teil auf die thermische Trägheit des Gebäudes als auch auf den solaren Eintrag zurückzuführen.

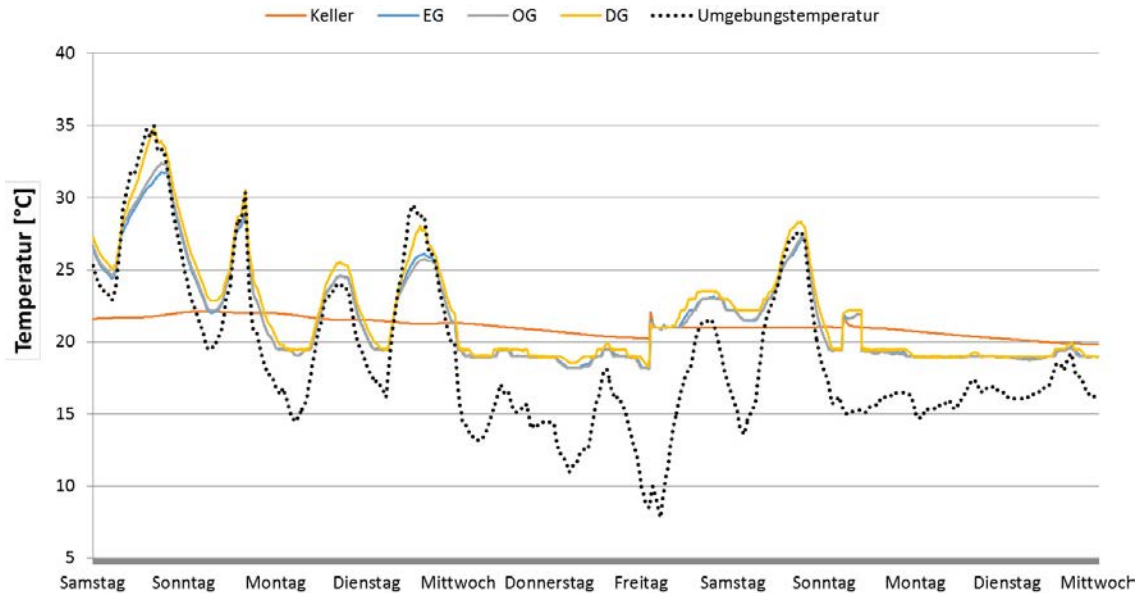


Abbildung 120: Gegenüberstellung der simulierten Raumtemperaturen in den verschiedenen Zonen und der gemessenen Außentemperatur in der Nichtheizperiode

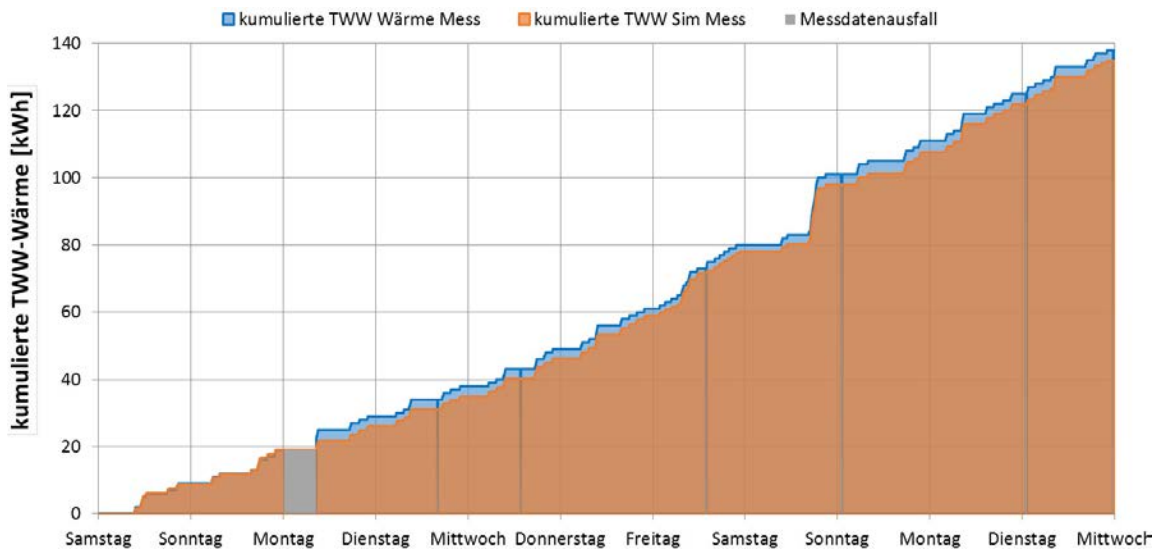


Abbildung 121: Kumulierte Brauchwarmwasserwärme mit Bedarfsspitze am Freitag in der Nichtheizperiode

Der Brauchwasserwärmebedarf zeigt für die Nichtheizperiode eine hohe Übereinstimmung auf und macht mit 140 kWh im Betrachtungszeitraum dieselbe Wärmemenge aus, wie zur Beheizung des Gebäudes in der Messung erscheint. Durch einen Messdatenausfall am ersten Montag kommt es zu einem Leistungsdatenausfall, welcher nicht interpoliert werden konnte. So kommt es am Ende des Betrachtungszeitraums zu einer kumulierten Abweichung von

2,6 %, welche im Bereich der Messgenauigkeit des Wärmemengenzählers liegt. Anhand der Messdaten kann rekonstruiert werden, dass im Zeitraum des großen Heizwärmebedarfs von Samstag 0:00 Uhr bis 17:00 Uhr ein deutlich unterdurchschnittlicher Wärmebedarf von 3 kWh besteht. Die Bereitschaftswärmeverluste des Brauchwasserspeichers werden vom Hersteller nach DIN EN 12897 bei einer Temperaturdifferenz von 45 K mit 1,8 kWh pro Tag angegeben. Unter der Annahme eines tagsüber durchgängigen Betriebs der Zirkulationspumpe kommen weitere Wärmeverluste unbekannter Höhe hinzu. So kann die Annahme getroffen werden, dass es zum Zeitpunkt der durchgängigen Beheizung zu einer Ausnahmesituation wie einem über längere Zeit unbemerkt offenen Fenster mit möglicher Abwesenheit der Bewohner kam. Da dieser Fall nicht geklärt werden konnte, ist ein solcher Fall durch das Simulationsmodell im Rahmen der Validierung nicht darstellbar.

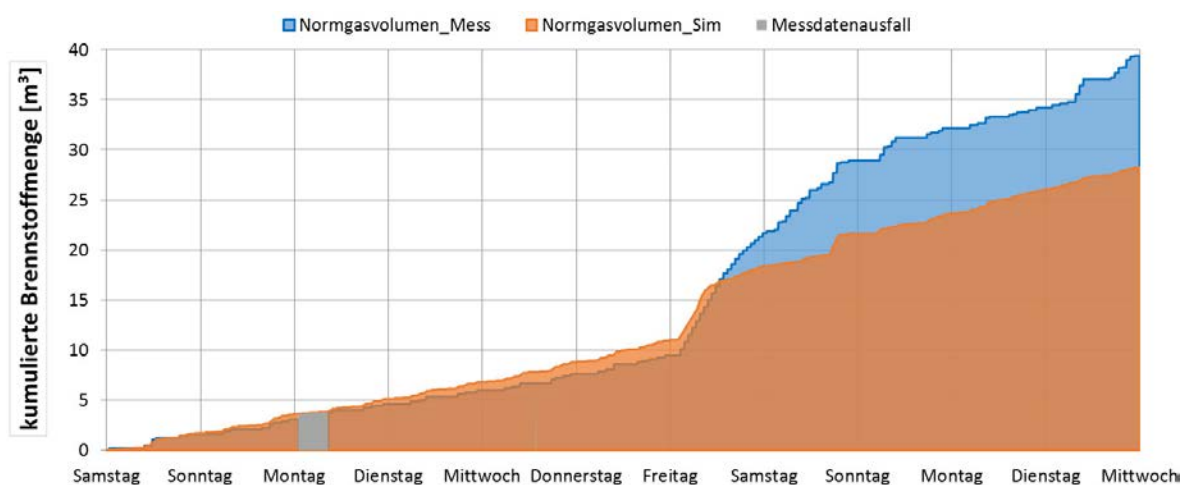


Abbildung 122: Kumulierte Brennstoffverbräuche in der Nichtheizperiode

Anhand oben beschriebener Problemstellungen bei der Darstellung einer möglichen Ausnahmesituation des Heizwärmebedarfs, kann das KWK-Modell nur in Zeiten der Nicht-Beheizung des Gebäudes in diesem Zeitraum betrachtet werden. Diese Betrachtung umfasst somit nur die bereitzustellende Wärme der Brauchwassererwärmung und Wärmeverluste der Versorgungsanlage. Der in Abbildung 122 dargestellte kumulierte Brennstoffverbrauch zeigt, dass in den Zeiträumen der Nicht-Beheizung des Gebäudes der Verbrauch pro Zeit stets etwa 17 % höher liegt. Somit ergibt sich in der beheizungsfreien Zeit zwischen Beginn des Betrachtungszeitraumes und Freitag 0:00 Uhr ein Normvolumenverbrauch von 11 m³ zu 9,4 m³. Das ereignisorientierte und qualitative Verhalten des Brenngasverbrauchs in diesen Zeiträumen stellt sich als vergleichbar dar, fällt jedoch wiederum aus den genannten Gründen in gewissem Maße zu hoch aus. Wie zu erwarten steigt die relative Abweichung durch einen geringeren Wärmebedarf im Sommer an.

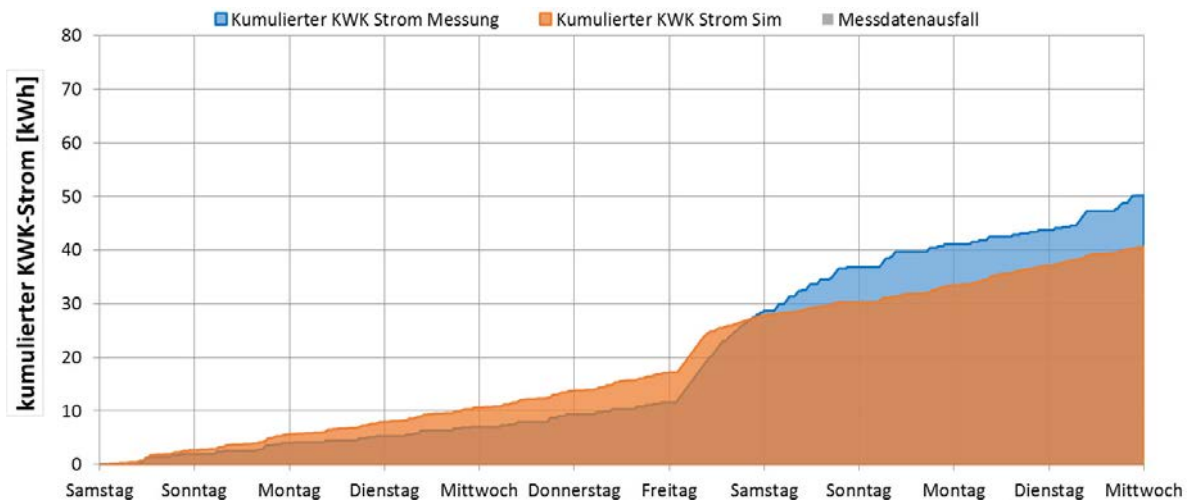


Abbildung 123: Kumulierte KWK-Stromproduktion in der Nichtheizperiode

Der zeitliche Verlauf der elektrischen KWK-Leistung zeigt durch die oben beschriebenen Wärmeverluste höhere Betriebszeiten in den Nicht-Beheizungszeiträumen auf. Wie anhand des beschriebenen Heizverhaltens zu erwarten ergeben sich in der Simulation niedrigere Laufzeiten der KWK-Anlage für den beheizten Zeitraum zwischen Freitag und Montag (siehe Abbildung 124). Analog zum Brenngasverbrauch weist die simulierte kumulierte KWK-Stromproduktion für die Nicht-Heizperiode einen größeren Gradienten (siehe Abbildung 123) auf als die Messdaten. Von Beginn des Zeitraums bis Freitag 0:00 Uhr ergibt sich daher eine positive Abweichung von absolut 5,6 kWh bei 11,6 kWh in der Messung zu 17,2 kWh in der Simulation. Diese Abweichung von 0,93 kWh pro Tag liegt bei etwa 50 % der angenommenen Verluste des thermischen Speichers. Bei Annahme weitere Verluste an der KWK-Anlage, einer erhöhten Raumtemperatur und einer im Sommer reduzierten Hauptspeichertemperatur, erscheinen die in dieser Größenordnung zu hoch angenommenen Wärmeverluste und daraus resultierende Wärme- bzw. Stromproduktion durch die KWK-Anlage plausibel. Bei einem höheren Wärmebedarf fallen diese Abweichungen relativ als auch absolut, wie im Übergangszeitraum beschrieben, wesentlich geringer aus.

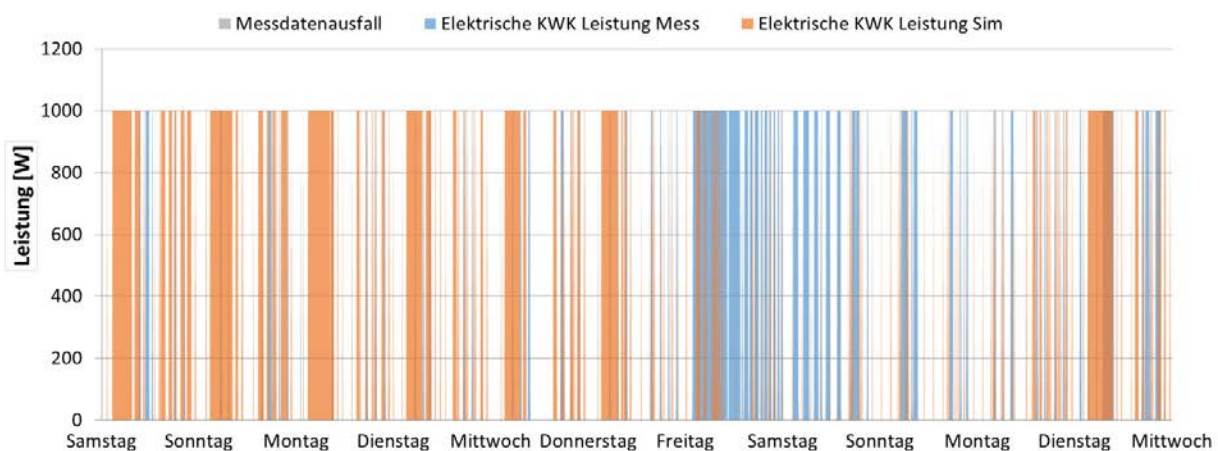


Abbildung 124: Elektrische Leistung der KWK-Anlage in der Nicht-Heizperiode

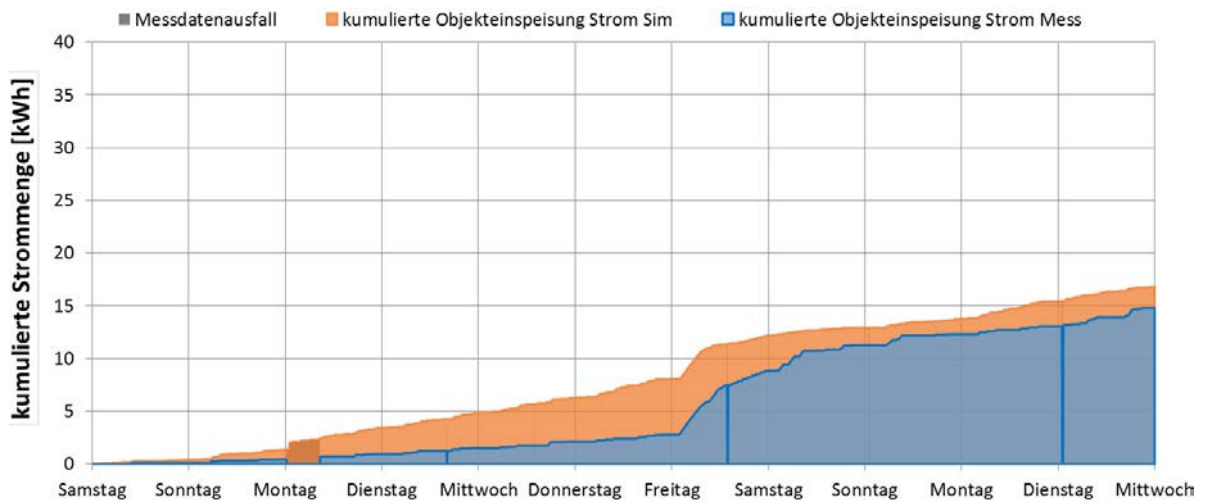


Abbildung 125: Stromeinspeisung in der Nicht-Heizperiode

Entsprechend der höheren KWK-Stromproduktion im Betrachtungszeitraums bis Freitag stellt sich simulativ auch eine im Vergleich höhere Einspeisung von 5,3 kWh in das Stromnetz dar (siehe Abbildung 125). Die Abweichungen zwischen KWK-Stromproduktion und Einspeisung von 0,3 kWh stellen sich auch hier vermutlich durch die abweichenden Betriebszeiten des KWK-Modells mit der Messung und durch die Stromkorrektur dar. Gleiches gilt für den Objektbezug in Höhe von 145 kWh der Messung zu 148 kWh der Simulation, welcher sich bis auf den Messfehler bedingt qualitativ sehr repräsentativ darstellt (siehe Abbildung 126).

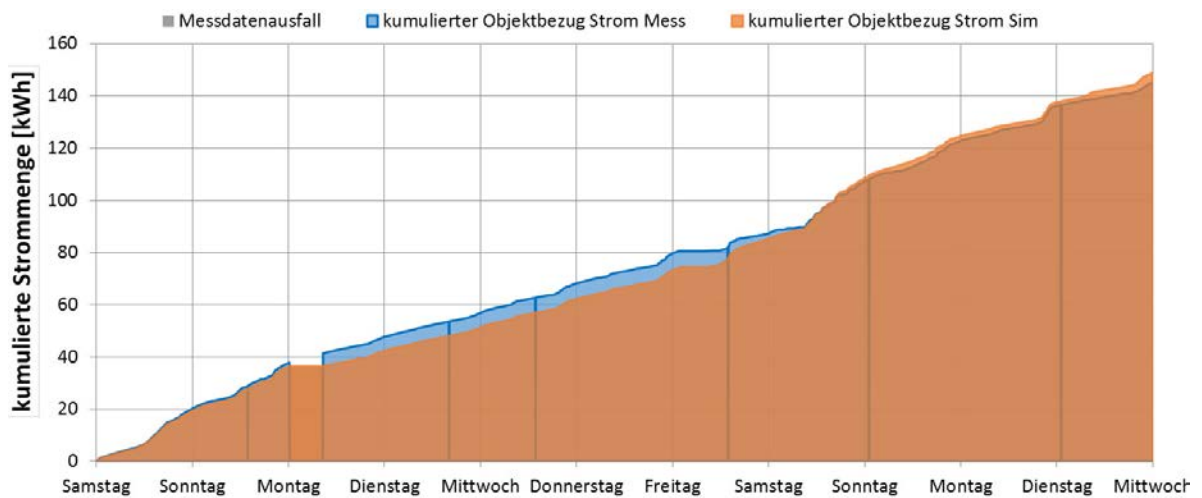


Abbildung 126: Strombezug in der Nicht-Heizperiode

3.4.1.2 Mehrfamilienhaus

Im Folgenden erfolgt die Validierung des Mehrfamilienhauses mit der Objekt-ID 227.

ID 227 – Heizperiode (Winter)

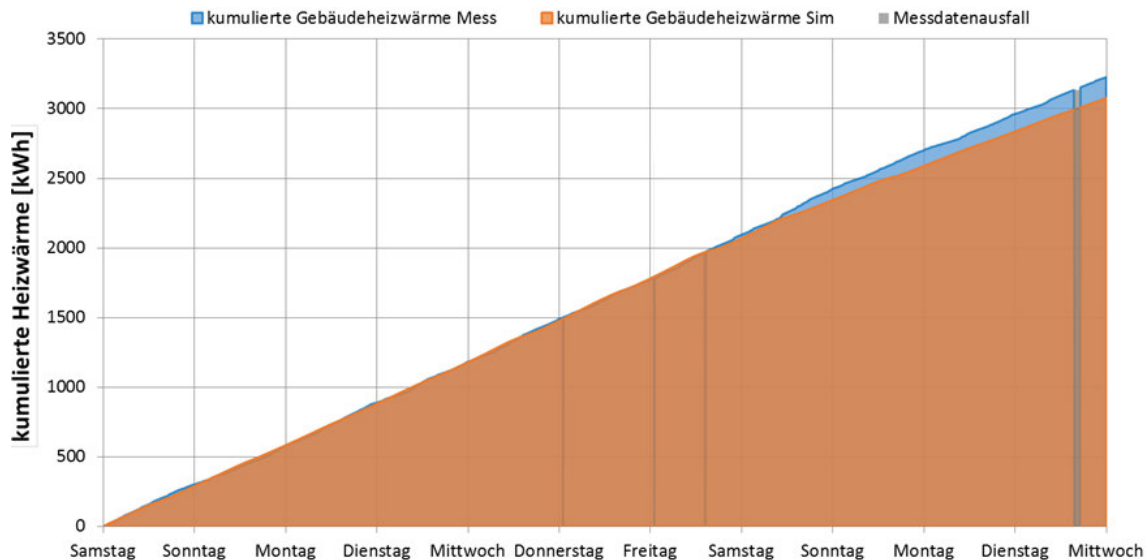


Abbildung 127: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf in der Heizperiode

Der in Abbildung 127 dargestellte kumulierte Heizwärmebedarf sowie die Heizleistung in Abbildung 128 zeigen jeweils ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung auf. Vom Beginn des Betrachtungszeitraumes bis Samstag 10:00 Uhr verläuft der Tagesheizwärmebedarf bei durchschnittlich 301 kWh pro Tag. Die im Tagesverlauf auftretenden Abweichungen belaufen sich in dieser Zeit mit maximal 30 kWh auf unter 10 % (siehe Abbildung 128).

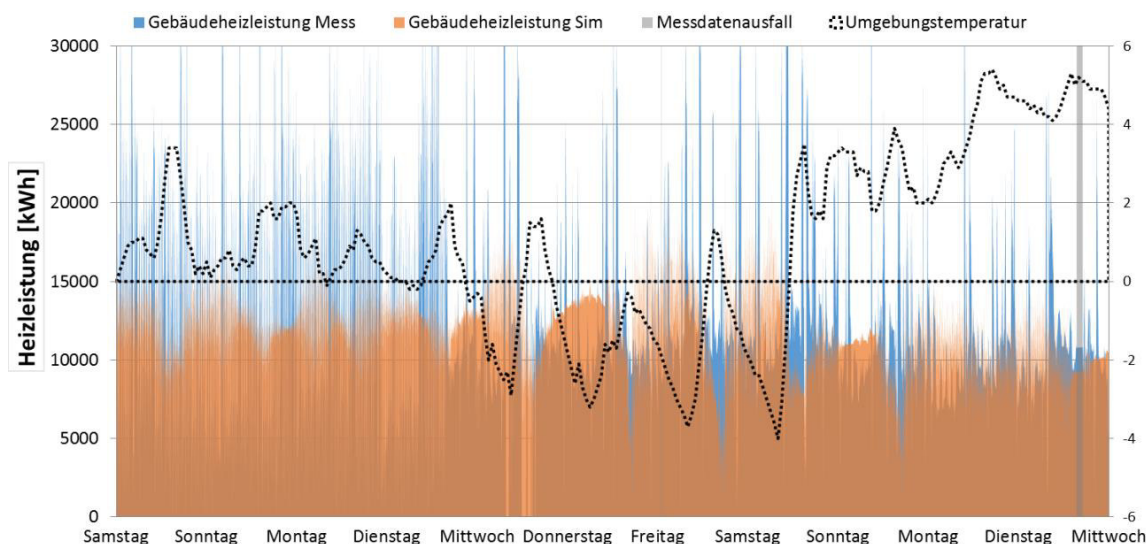


Abbildung 128: Gebäudeheizleistung des MFH in der Heizperiode

Auf die ab Freitagmittag bis zum Ende des Betrachtungszeitraums deutlich wärmere Wetterlage (siehe Abbildung 128) reagiert das Modell entsprechend der Theorie mit einem reduzier-

ten Wärmebedarf. Das Realobjekt reagiert hier, vermutlich durch das abweichende Nutzerverhalten am Wochenende bedingt, mit einem unveränderten und sogar teils höheren Wärmebedarf als in den kälteren Tagen zuvor. Dieses auch vom ersten Wochenende abweichende Verhalten konnte aufgrund von konstant angenommenen Raumtemperaturen und Luftstraten durch das Modell nicht abgebildet werden. Wie in Abbildung 129 erkennbar bezieht das Gebäudemodell somit in der Simulation ab Freitagmittag bis zu 16 % weniger Wärme als das Realobjekt. So kommt es zum Ende des Zeitraums zu einer Abweichung von 4,7 % bei 3.226 kWh der Messung zu 3.078 kWh in der Simulation. Speziell im Hinblick auf die maximalen Heizleistungen ist zu beobachten, dass anhand der Messdaten wesentlich höhere Spitzenleistungen erkennbar sind als bei kumuliert näherungsweise gleich großen Wärmemengen. Dies lässt darauf zurückschließen, dass es in der Realität entgegengesetzt der Erwartungen zu einer wesentlich größeren Gleichzeitigkeit der Einzelheizereignisse gekommen ist als in der Solltemperaturregelung der einzelnen Zonen definiert wurde. Diese geringfügige Abweichung kann durch eine messtechnische Erfassung der Einzelheizphasen in den Wohnungen ohne großen Aufwand in die Heizphasenregelung des Gebäudemodells integriert werden.

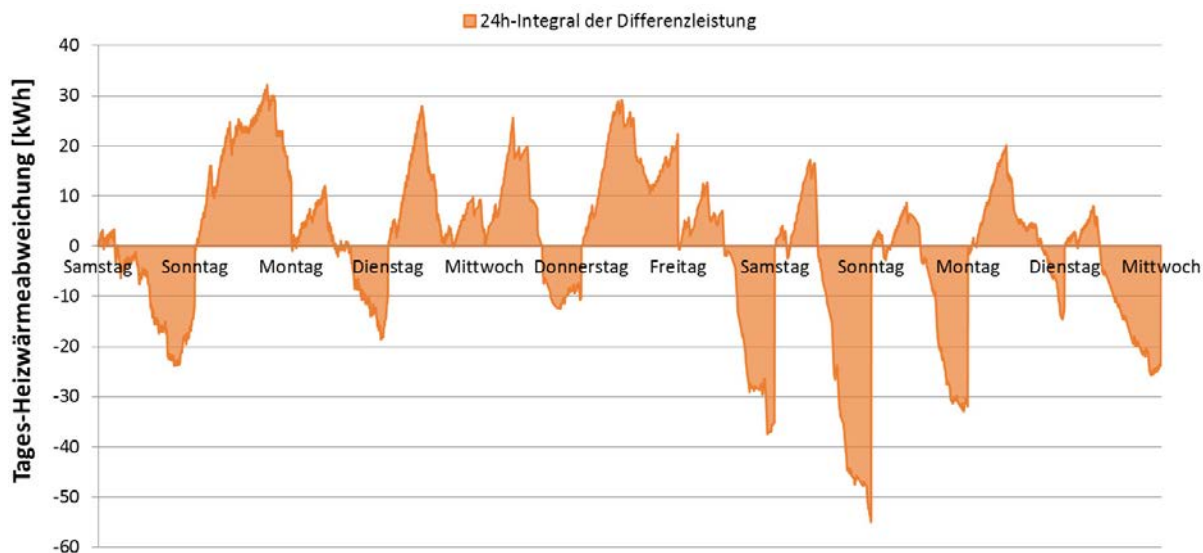


Abbildung 129: Kumulierte Heizwärmeabweichung in der Heizperiode

Der reale Brauchwarmwasserbedarf des Mehrfamilienhauses kann annähernd durch eine Speicherbilanz beschrieben werden. Die somit in Abbildung 130 auftretende systematische Abweichung der Simulation ist unter anderem mit Wärmeverlusten des Speichers zu begründen, welche vom Hersteller mit 4 kWh pro Tag nach DIN EN 12897 beschrieben und in der Simulation berücksichtigt werden. Nach elf Tagen ergibt sich somit ein Wärmeverlust von 44 kWh, welcher die kumulierte Abweichung des Brauchwarmwasserbedarfs von der Speicherbilanz auf 11 % senkt. Darüber hinaus kann nicht geprüft werden ob der angesetzte Norm-Brauchwasserbedarf mit 2 kWh pro Person und Tag für die Warmwasserbereitung zu niedrig angesetzt ist. Es besteht insbesondere eine Unsicherheit in der Abweichung von der Norm durch ein veränderliches Bewohnerverhalten. Verteilungs- und Zirkulationsverluste unbekannter Höhe sind zudem in der Norm nicht berücksichtigt. Somit stellt die Modellierung des Brauchwarmwasserbedarfs dennoch eine gute Näherung an den Realzustand dar.

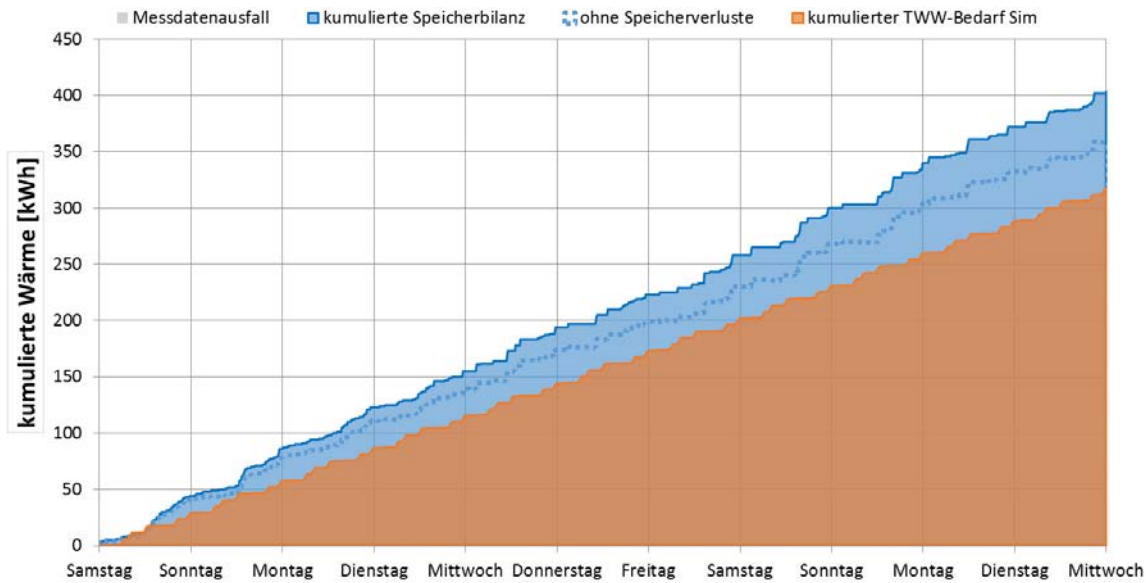


Abbildung 130: kumulierter Brauchwasserwärmebedarf in der Heizperiode nach Norm im Vergleich zur Speicherbilanz mit und ohne Wärmeverluste des Speichers nach DIN EN 12897

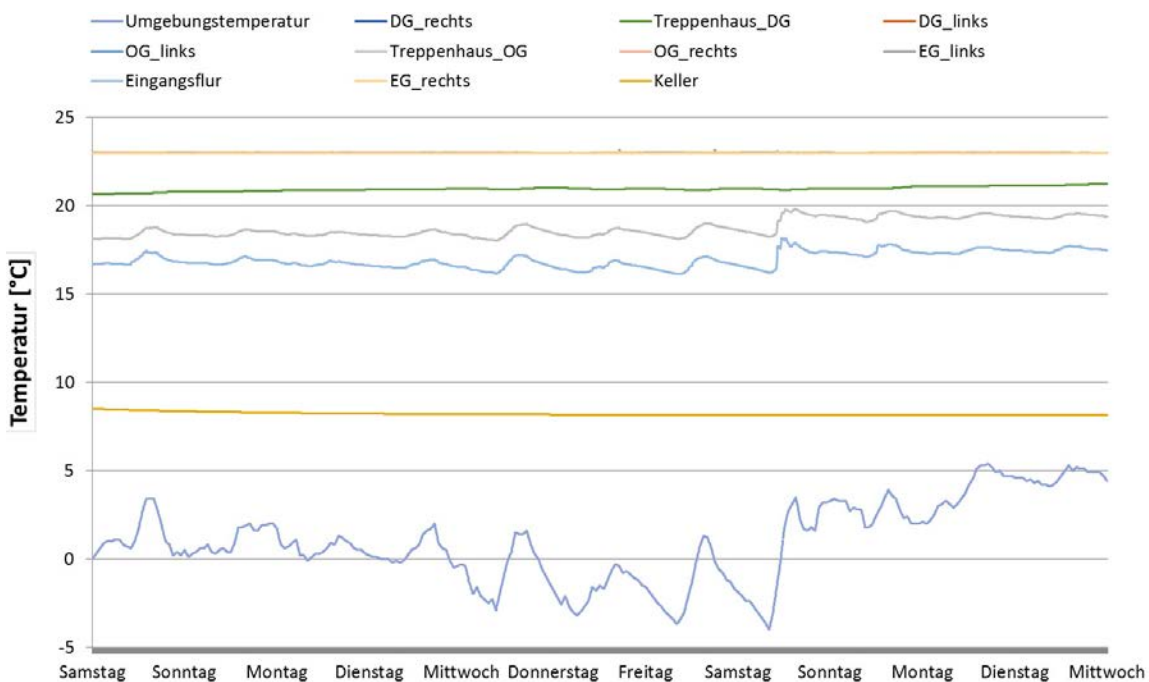


Abbildung 131: Zonentemperaturen des MFH in der Heizperiode

Des Weiteren verhalten sich die in Abbildung 131 dargestellten beheizten Zonen des Mehrfamilienhauses thermisch bei 23 °C wie gefordert. Das Treppenhaus nimmt wie erfahrungsgemäß zu erwarten vom Erd- zum Dachgeschoss an Temperatur zu und liegt unter der Temperatur der beheizten Zonen.

Da sich der Heiz- wie auch Brauchwasserwärmebedarf und die Raumtemperaturen des Gebäudes wie zuvor beschrieben repräsentativ verhalten, kann im Folgenden die Versorgungsanlage mit guter Näherung betrachtet werden. Wie in Abbildung 133 ersichtlich ist die KWK-

Anlage erst im Laufe des Dienstags in Betrieb gegangen. Die Ursache hierfür lag in einer Störung der KWK-Anlage begründet. In diesem Zeitraum stand nur das Zusatzheizgerät für die Deckung des Wärmebedarfs zur Verfügung. Beim Vergleich der kumulierten Wärmemengen des Zusatzheizgeräts erfolgt dies mit einer hohen Vergleichbarkeit mit den Messdaten. Bis zum Ende des Betrachtungszeitraumes ergibt sich somit für das ZHG eine kumulierte Abweichung von -7 % bedingt durch den reduzierten Heiz- und Brauchwasserwärmebedarf.

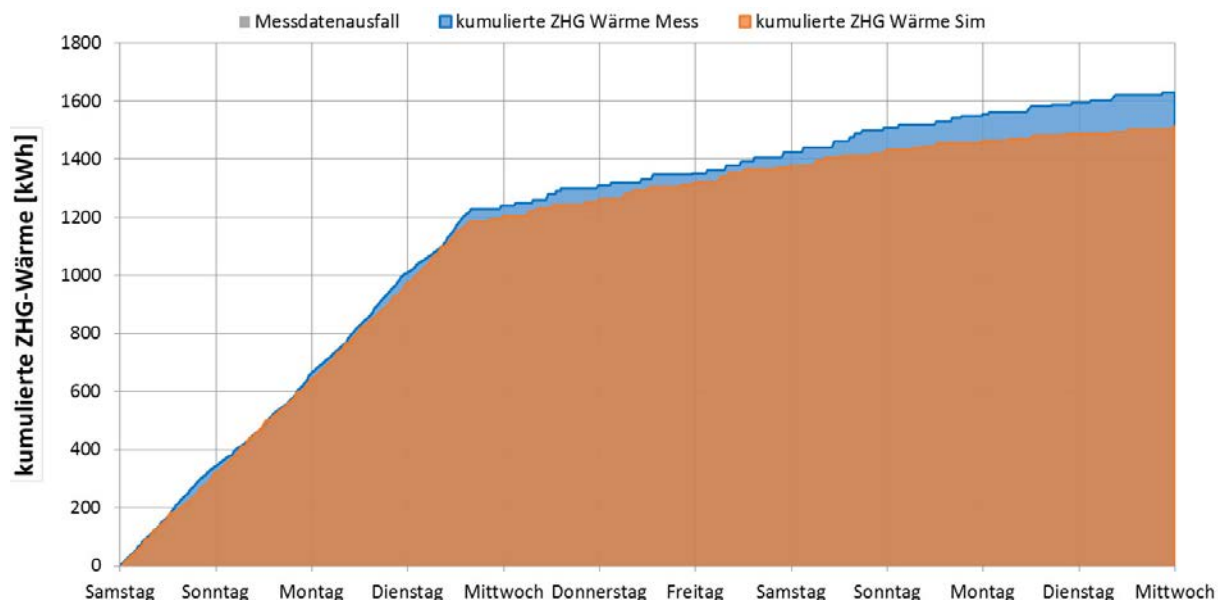


Abbildung 132: Kumulierte ZHG-Wärme des MFH in der Heizperiode

Die KWK-Anlage zeigt bis zum Beginn des erhöhten Heizwärmebedarfs am zweiten Wochenende ebenfalls ein nahezu identisches Verhalten und darüber hinaus abschließend eine Abweichung von -3,9 %. Diese Abweichung korreliert mit der vergleichbaren Abweichung im Heizverhalten von -4,7 %. Dieser hohe Grad der Übereinstimmung der Ergebnisse auf Seiten des ZHG und der KWK-Anlage weist eine korrekte Verteilung der Wärmebereitstellung auf die beiden Systeme nach.

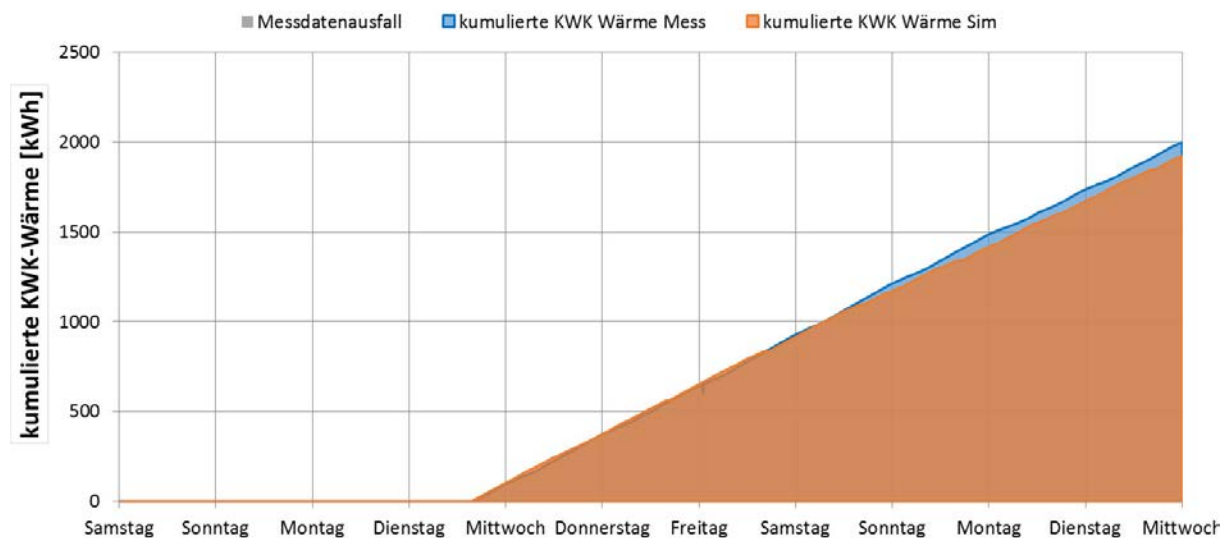


Abbildung 133: Kumulierte KWK-Wärme des MFH in der Heizperiode

Das an die Wärmebereitstellung gekoppelte elektrische Verhalten der KWK-Anlage stellt sich nach Abbildung 134 und Abbildung 135 als sehr gut vergleichbar dar. Die Gesamtabweichung über den Betrachtungszeitraum beträgt 0,2 % bei 722 kWh bereitgestelltem Strom. Aufgrund der Abweichung im thermischen Verhalten wäre eine geringere Stromproduktion zu erwarten. Aufgrund der Vernachlässigung der Leistungsmodulation der KWK-Anlage (siehe Abbildung 135) fällt die Gesamtproduktion etwas höher aus, welches im Durchschnitt zu einem geringfügig besseren elektrischen Wirkungsgrad führt und veränderte Betriebszeit bewirken kann.

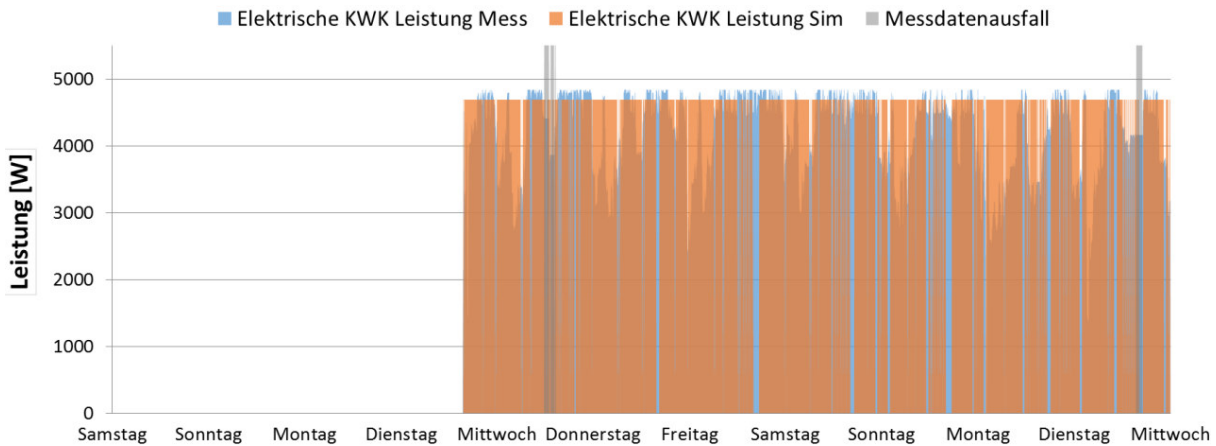


Abbildung 134: Elektrische Leistung der KWK-Anlage im MFH in der Heizperiode

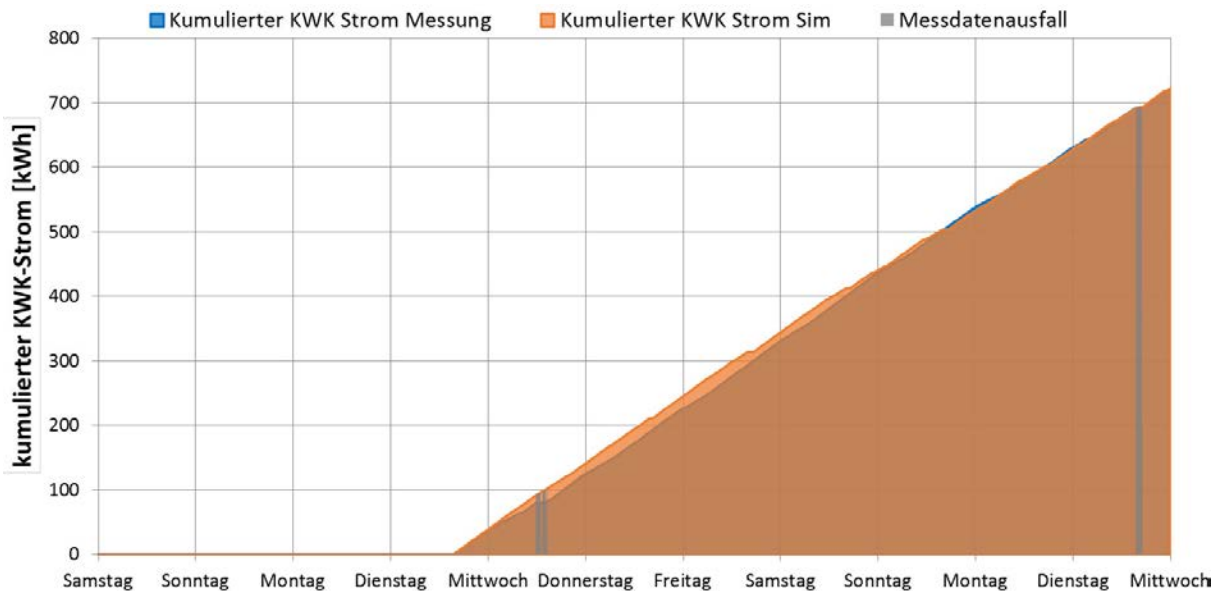


Abbildung 135: Kumulierter KWK-Strom des MFH in der Heizperiode

Resultierend ergibt sich ein kumulierter Gasverbrauch von simulierten 471,6 m³ zu gemessenen 533,1 m³ (siehe Abbildung 136). Die resultierende Abweichung von 11,5 % ergibt sich sowohl aus Ungenauigkeiten des Wärmemengenzählers in Höhe von bis zu 5 %, Abweichungen der Erdgasbrennwerte über den Zeitraum (Schwankung der Gasbeschaffenheit) als auch im Durchschnitt zu hoch angenommener thermischer Wirkungsgrade aufgrund von vernach-

lässiger Leistungsmodulation. Weitere thermische Verluste während Stillstandszeiten an der KWK-Anlage und dem ZHG konnten ebenfalls im Modell nicht berücksichtigt werden. Dennoch ergibt sich aufgrund des abgebildeten Ereignisverhaltens eine gute Übereinstimmung der Brennstoffmengen. Weiterhin ist erkennbar, dass der Brennstoffverbrauch bei zuschalten der KWK-Anlage am Dienstagabend ansteigt.

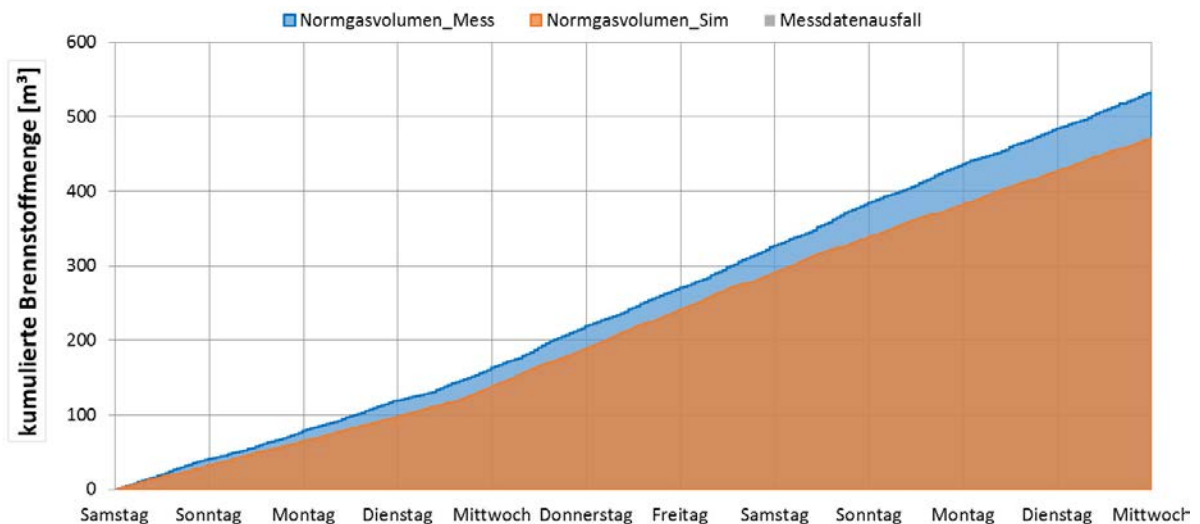


Abbildung 136: Kumulierte Brennstoffverbräuche des MFH in der Heizperiode

ID 227 – Übergangszeitraum

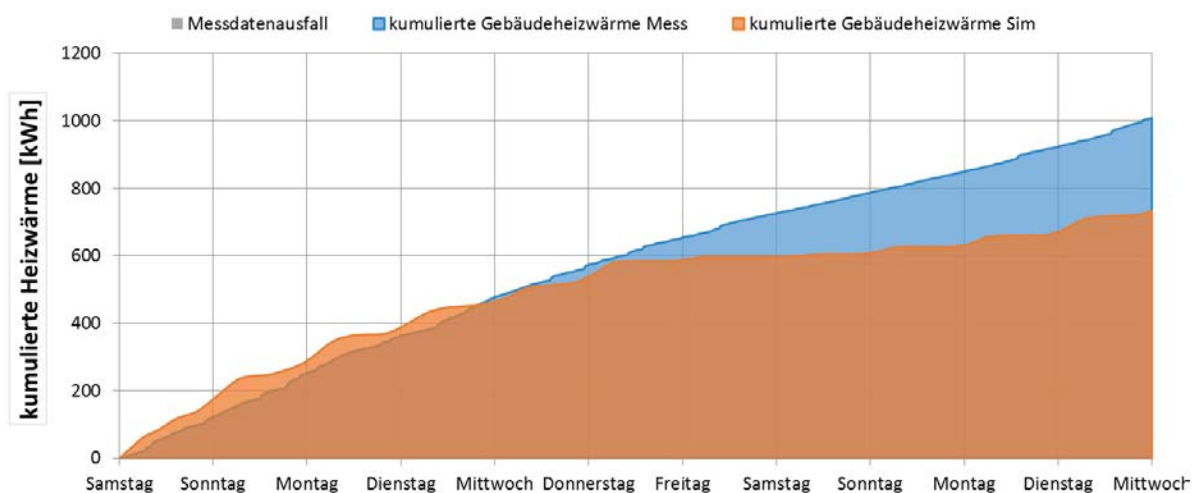


Abbildung 137: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf des MFH im Übergangszeitraum mit Abweichung durch nicht darstellbares Bewohnerverhalten

Im Referenzzeitraum “Übergang“ ist eine sehr große Spreizung bei den Umgebungstemperaturen von 7 bis 32 °C zu beobachten, welches deutliche Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf des Modells hat. Das Objekt weicht in der Messung allerdings von der Annahme ab, dass bei Temperaturen von über 15 °C keine Beheizung mehr stattfindet. Tatsächlich erfolgt bei einer Umgebungstemperatur von 32 °C am Freitagmittag eine zeitunabhängige Beheizung mit vergleichbarer Leistung wie an Tagen mit Höchsttemperaturen von unter 20 °C (siehe Abbildung 138). Das Modell reagiert an den warmen Tagen zwischen Donnerstag und Sonn-

tag mit einer Tagesheizwärme von unter 20 kWh im Vergleich zu den kälteren Tagen bei etwa 100 kWh pro Tag, wohingegen der Heizbedarf des Objekts nur um 20 kWh auf 80 kWh pro Tag sinkt (siehe Abbildung 137). Es ist bei einer durchschnittlichen Heizleistung von 2,5 bis 4 kW des Objekts anzunehmen, dass nur noch vereinzelte Wohnparteien heizen. Dieses Bewohnerverhalten ist durch die Annahme einer konstanten und über alle Zonen gleichverteilten Solltemperatur und Luftaustauschrate allerdings nicht darstellbar.

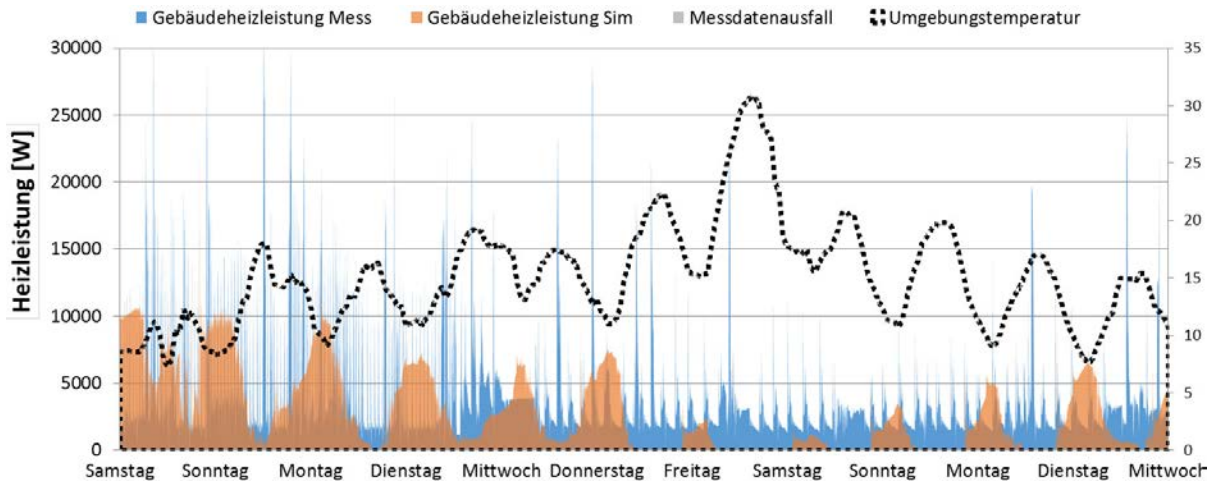


Abbildung 138: Gebäudeheizleistung des MFH im Übergangszeitraum

Für eine weitere Präzisierung der Temperaturregelung des Modells sind somit weitere Messdaten zur Evaluierung des Bewohnerverhaltens von Nöten. Die in Abbildung 139 dargestellten Zonentemperaturen verlaufen mit durchschnittlich 23 bis 25 °C noch im erweiterten sommerlichen Behaglichkeitsbereich und das Dachgeschoss stellt wie zu erwarten die wärmste Zone dar. Es ist zudem ein deutlicher Solarstrahlungseinfluss erkennbar, da sich die Zonen auch bei Umgebungstemperaturen unterhalb der Solltemperatur von 23 °C weiter erwärmen. Die Verschattung durch Rollos wird im Modell bisher nicht berücksichtigt und kann zu einem erhöhten Wärmeeintrag durch die Solarstrahlung im Modell führen.

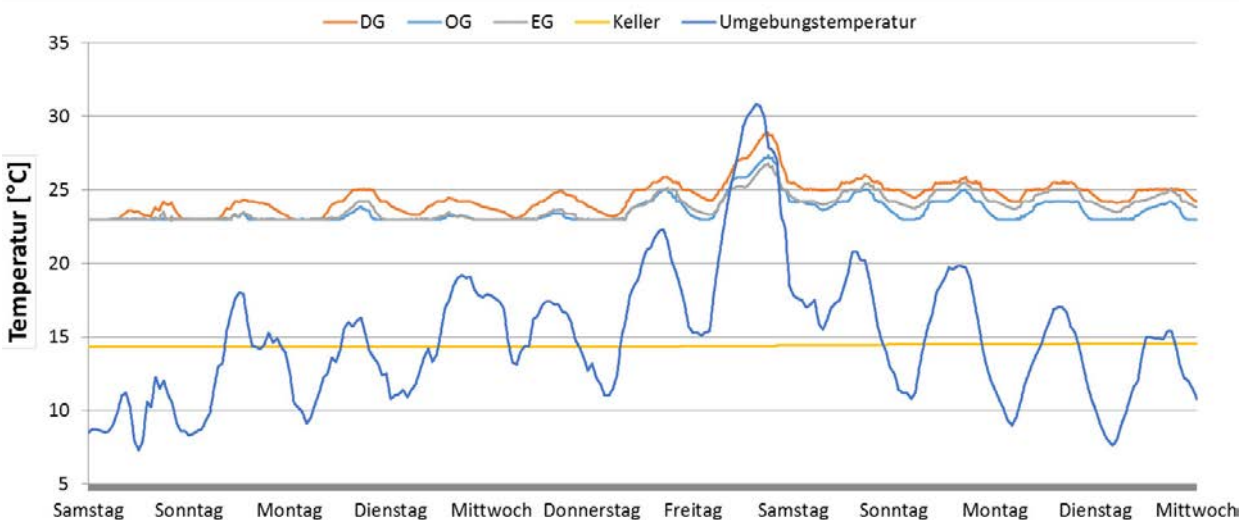


Abbildung 139: Zonentemperaturen des MFH im Vergleich zur Umgebungstemperatur mit erkennbarem Solarstrahlungseinfluss im Übergangszeitraum

Der Brauchwasserwärmebedarf stellt sich mit 345 kWh der Speicherbilanz zu 310 kWh der Norm als repräsentativ gegenüber (siehe Abbildung 140). Ohne Speicherverluste nach DIN EN 12897 sinken die Abweichungen von -11 % auf +7 %. Da es im Nichtheizzeitraum zu einer nur teilweisen Beladung des Schichtspeichers kommen kann, fallen die Verluste und somit die Abweichung möglicherweise noch geringer aus. Somit konnte über die Korrektur eine gute Vergleichbarkeit des Brauchwarmwasserbedarfs erreicht werden. Geringe, tageweise Abweichungen sind durch das Benutzerverhalten gegeben und nicht darstellbar.

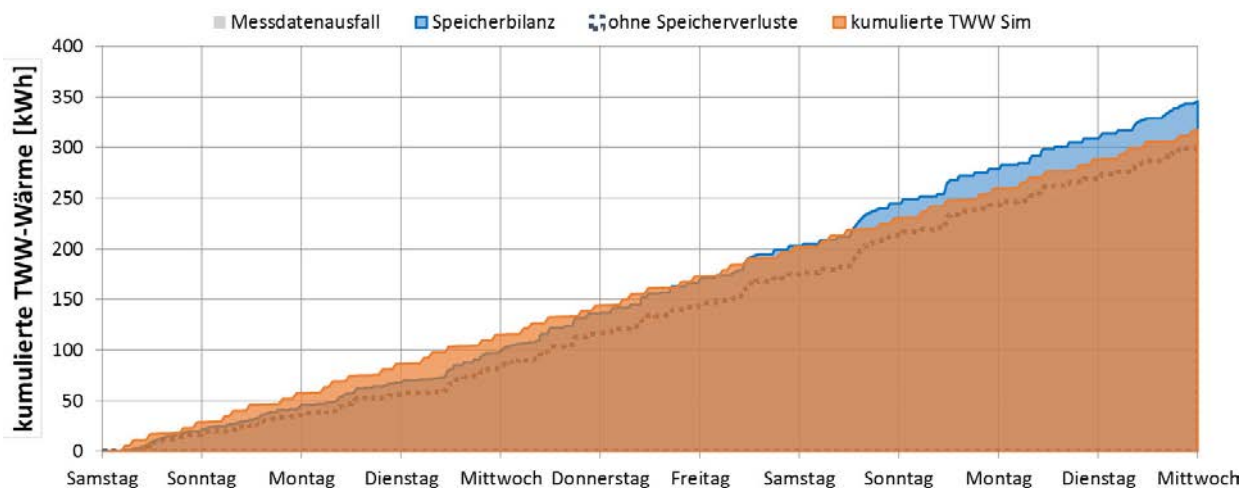


Abbildung 140: Kumulierter Brauchwasserwärmebedarf des MFH nach Norm im Vergleich zur Speicherbilanz mit und ohne Wärmeverluste des Speichers nach DIN EN 12897 im Übergangszeitraum

Aufgrund einer Betriebsstörung kommt es wie in Abbildung 141 ersichtlich zu einem verspäteten Einsetzen der Wärmebereitstellung durch die KWK-Anlage. Die Abweichungen des Modells von 420 kWh zur Messung bei 715 kWh sind mit dem geringeren simulierten Wärmebedarf der thermischen Gebäudehülle zu begründen und führen für diesen Zeitraum zu wenig repräsentativen Ergebnissen. Das Verhalten der KWK-Wärmebereitstellung ist ebenso in der Strombereitstellung mit einer vergleichbar reduzierten Stromproduktion zu erkennen.

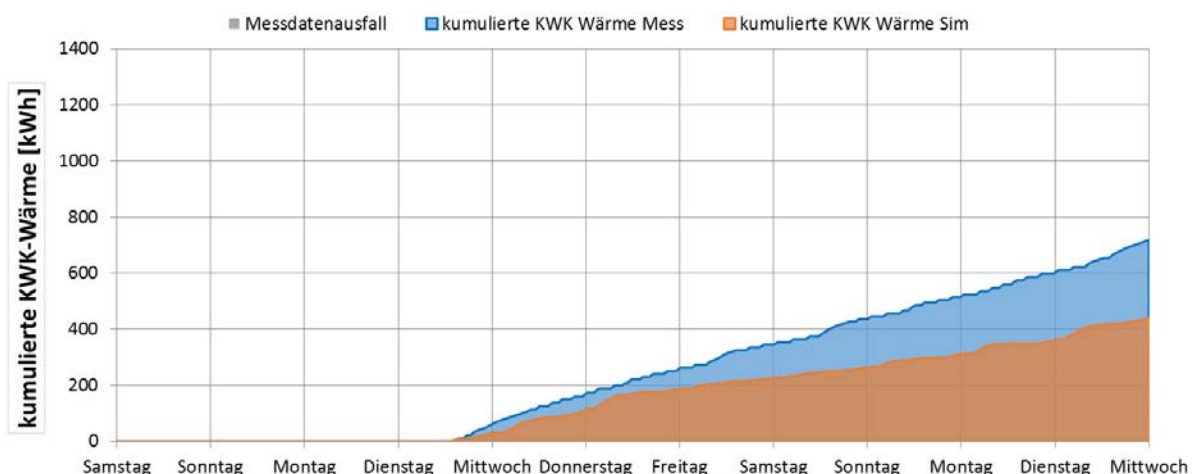


Abbildung 141: Kumulierte KWK-Wärme des MFH im Übergangszeitraum mit erkennbar reduziertem Heizwärmebedarf des Gebäudemodells

In der kumulierten Wärmebereitstellung ist die Störung der KWK-Anlage von Beginn des Zeitraums bis Dienstagmittag eindeutig erkennbar. Der erhöhte Wärmebedarf des Modells in dem folgenden Zeitraum ist ebenso zu erkennen. Auf den Brenngasverbrauch wirkt sich der reduzierte Heizbedarf des Modells durch eine ab Dienstagmittag fortschreitende Abweichung vom Messwert aus. Zum Ende des betrachteten Zeitraums beträgt die kumulierte Abweichung -29 % bei gemessenen 197 m³ zu 140 m³ in der Simulation (siehe Abbildung 142). Bei einem Brennwert von 10,3 kWh/m³ ergibt dies eine Abweichung von 587 kWh. Diese setzt sich mit 280 kWh anteilig aus dem reduzierten Heizwärmebedarf, Abweichungen im Brauchwarmwasserbedarf und weiteren nicht berücksichtigten Wärmeverlusten zusammen.

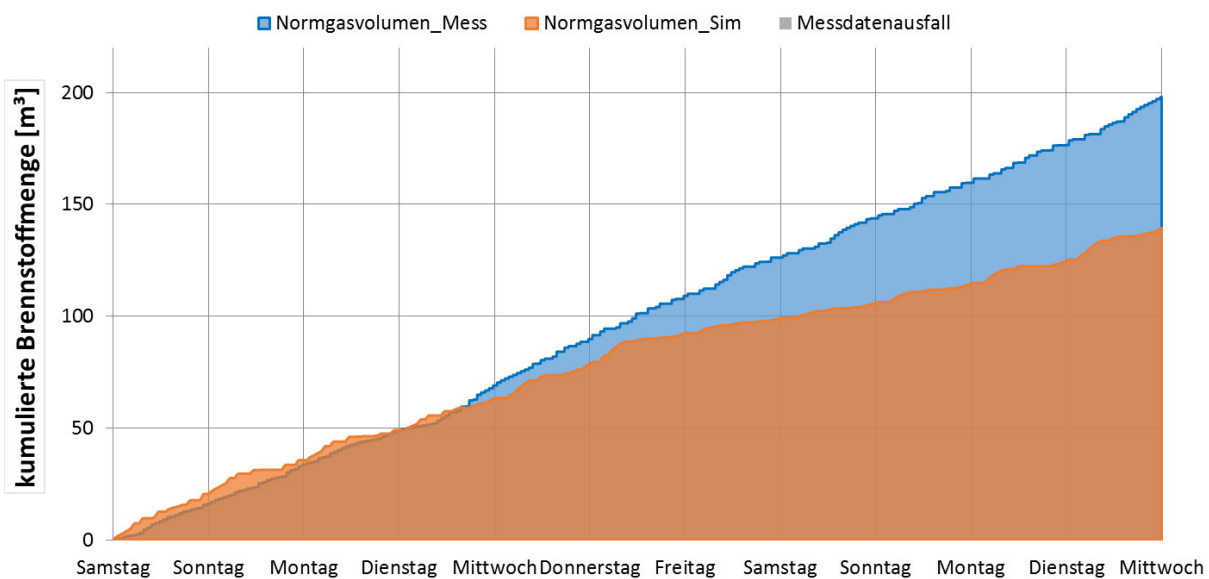


Abbildung 142: Kumulierter Brennstoffverbrauch des MFH mit erkennbar reduziertem Heizwärmebedarf des Modells im Übergangszeitraum

ID 227 – Nichtheizperiode (Sommer)

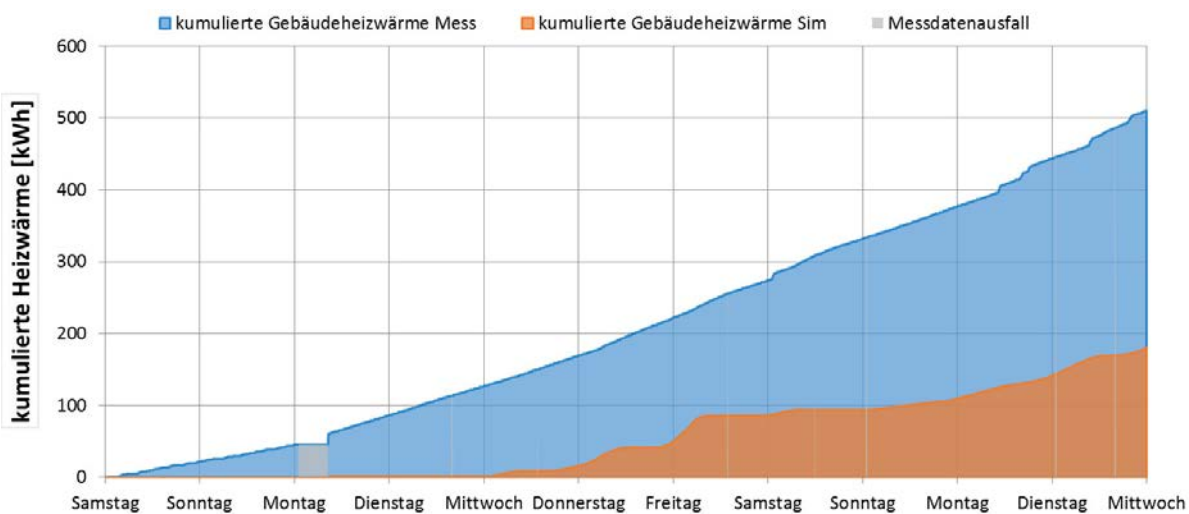


Abbildung 143: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf des MFH in der Nichtheizperiode mit deutlicher Abweichung aufgrund des nicht darstellbaren Bewohnerverhaltens

Im Sommerzeitraum ergibt sich eine ebenfalls deutliche Abweichung des Heizwärmebedarfs mit -65 % bei 510 kWh zu 180 kWh in der Simulation (siehe Abbildung 143). Das Modell reagiert entsprechend der Theorie auf Umgebungstemperaturen von über 15 °C mit einer Einstellung des Heizbetriebs, wohingegen die Messung auch bei Tagesmitteltemperaturen von 20 bis 25 °C und Spitzentemperaturen von über 30 °C (siehe Abbildung 144) eine konstante Beheizung von kumuliert 20 bis 50 kWh pro Tag nachweist. Dieses unerwartete, durch die Bewohner hervorgerufene Heizverhalten ist in der Simulation bei konstant geforderter Raumtemperatur und Luftwechselraten nicht darstellbar.

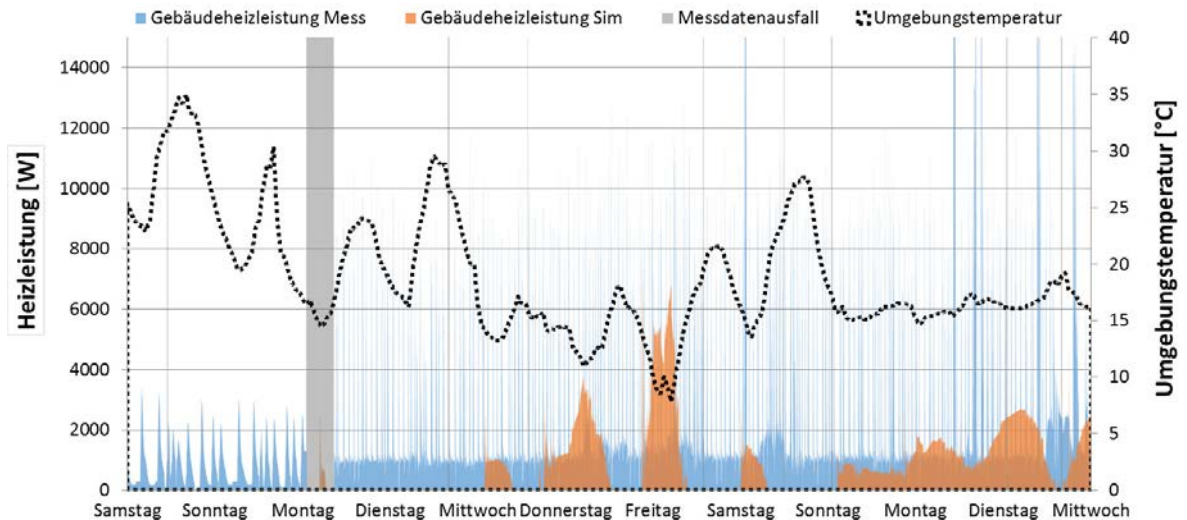


Abbildung 144: Gebäudeheizleistung des MFH in der Nichtheizperiode mit erkennbarer Reaktion des Modells um 15 °C und unerwartet durchgängiger Beheizung des Objekts bei > 15 °C

Die simulierten Temperaturen in den einzelnen Zonen verlaufen wie erwartet über 23 °C und das Dachgeschoss stellt den wärmsten Bereich mit maximal 32 °C bei 35 °C Umgebungsspitzen-temperatur dar. Zu Zeiten kälterer Umgebungstemperaturen als der Solltemperatur ist der Einfluss der Solarstrahlung durch Erwärmen der Räume zu erkennen.

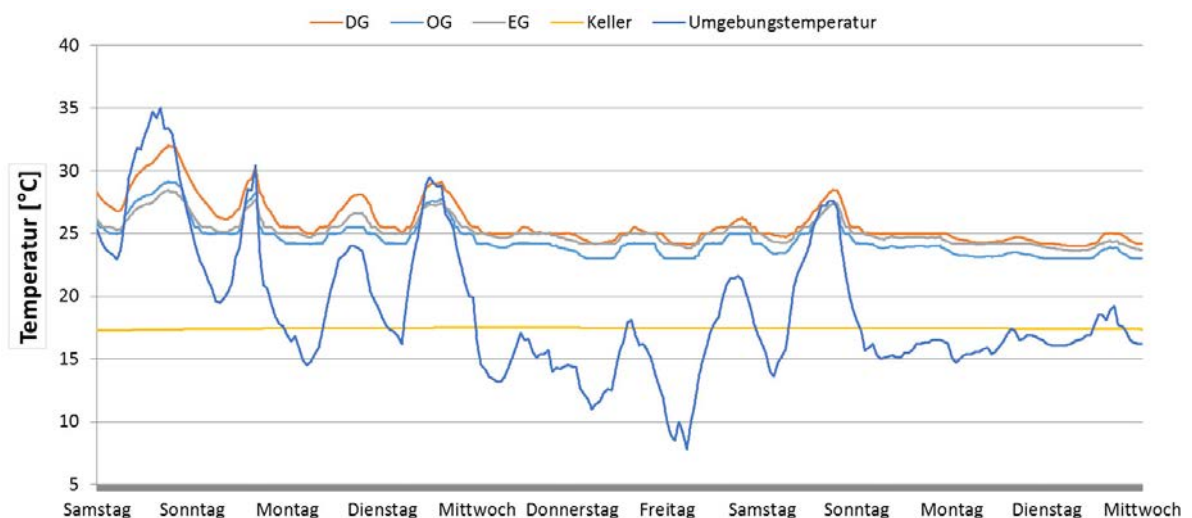


Abbildung 145: Zonentemperaturen des MFH in der Nichtheizperiode mit Vergleich zur Umgebungstemperatur

Die ermittelte Brauchwasserwärme weicht mit 250 kWh gegenüber simulierten 310 kWh um ca. 19 % ab. Ohne die Berücksichtigung der Speicherverluste würde sich am Ende des Betrachtungszeitraums eine absolute kumulierte Wärmemenge von nur 206 kWh ergeben. Zu der gewöhnlich, im Sommer nicht vollständigen Speicherbeladung und somit reduzierten Wärmeverlusten liegt der Betrachtungszeitraum auch innerhalb der Ferienzeit. Der reduzierte Brauchwarmwasserbedarf dürfte daher auch durch eine reduzierte Bewohnerzahl in der Haupturlaubszeit zu erklären sein.

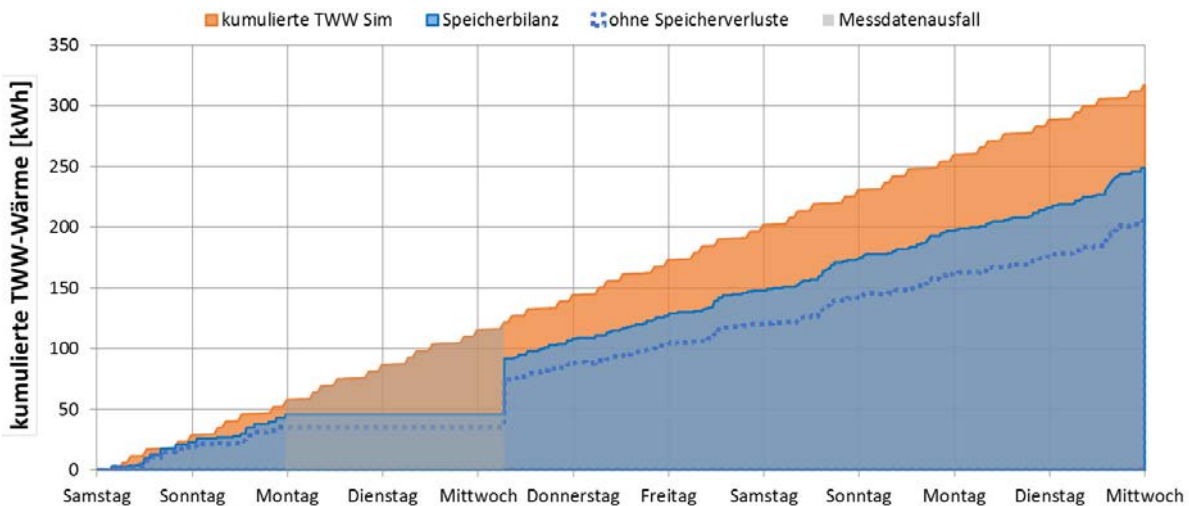


Abbildung 146: Kumulierter Brauchwasserwärmebedarf nach Norm im Vergleich zur Speicherbilanz mit negativer Abweichung vermutlich aufgrund Ferienzeit

Durch eine Störung der KWK-Anlage während des Betrachtungszeitraums wurde der Wärmebedarf überwiegend durch das Zusatzheizgerät gedeckt. Ergänzt um den reduzierten Heizwärmebedarf des Modells ist die Vergleichbarkeit daher stark eingeschränkt. Auf die Strombereitstellung wirkt sich dies wie zu erwarten in vergleichbarem Maße aus, wie auch auf die Wärmebereitstellung des Zusatzheizgerätes (siehe Abbildung 148).

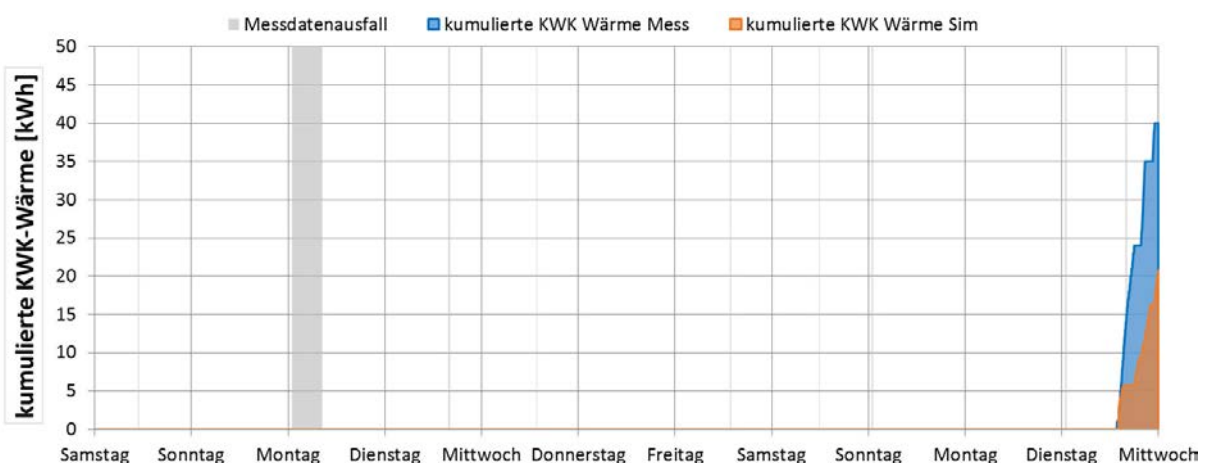


Abbildung 147: Kumulierte KWK-Wärme des MFH in der Nichtheizperiode mit nur sehr geringer Betriebszeit aufgrund einer Störung der Anlage

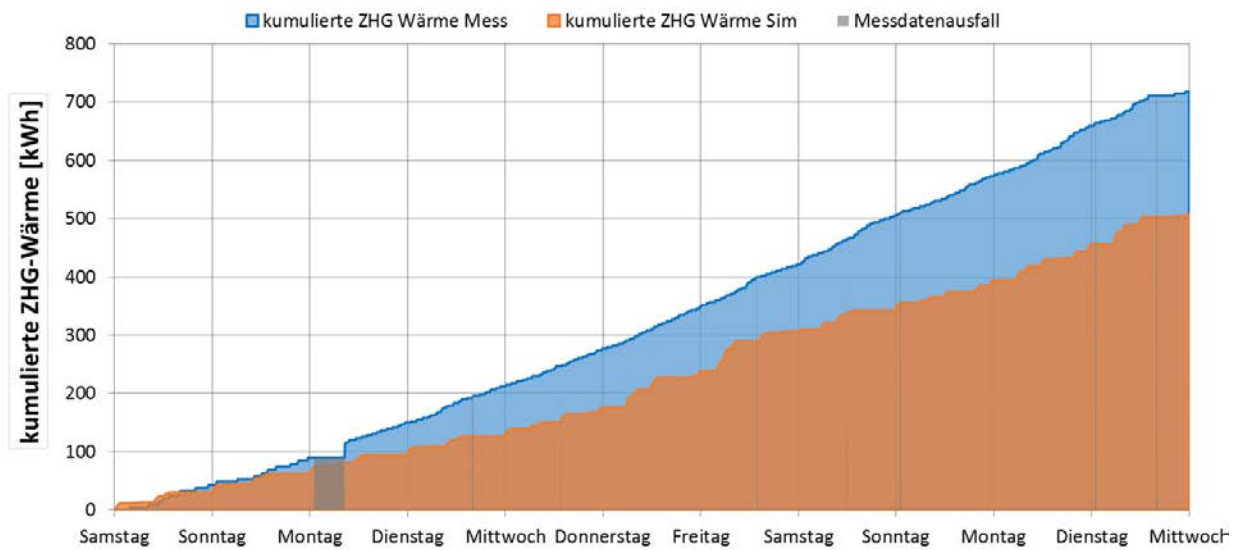


Abbildung 148: Kumulierte ZHG-Wärme des MFH in der Nichtheizperiode mit abweichender Wärmeproduktion aufgrund reduziertem Heizverhalten und erhöhtem Brauchwarmwasserbedarfs

Resultierend fällt der Gasverbrauch mit 89,6 kWh in der Messung zu simulierten 55,1 kWh erwartungsgemäß deutlich höher aus. Eine Repräsentativität der Ergebnisse ist für diesen Zeitraum aufgrund der unerwarteten Beheizung bei Tagesmitteltemperaturen von 25 °C für das Mehrfamilienhaus nicht gegeben.

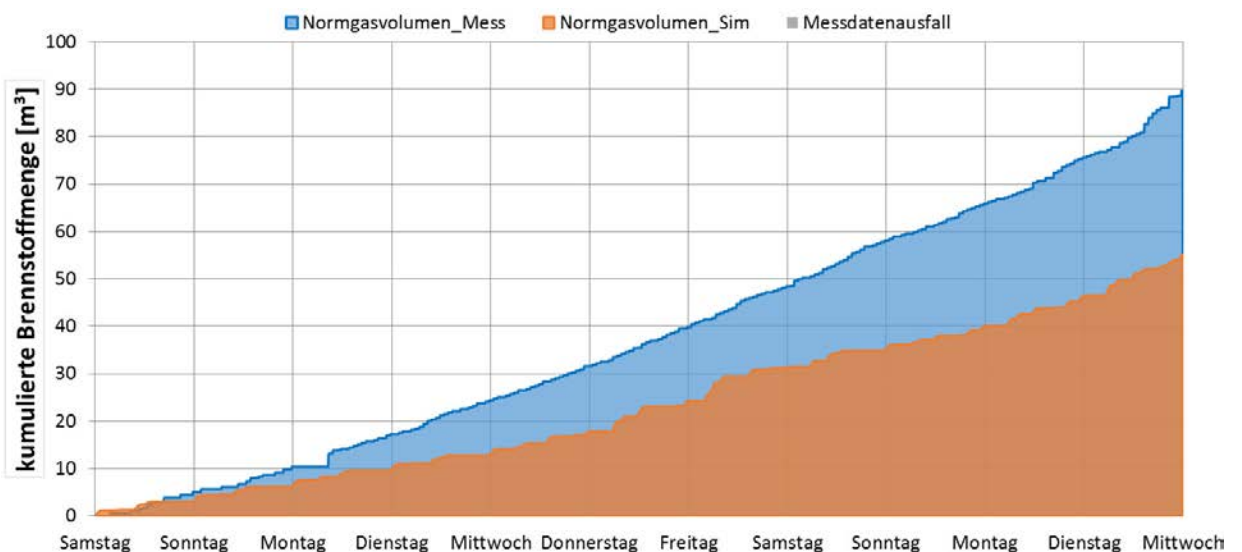


Abbildung 149: Kumulierter Brennstoffverbrauch des MFH in der Nichtheizperiode mit erkennbar reduziertem Heizwärmebedarf des Gebäudemodells

3.4.2 Einzonenmodell: Jahressimulation

Um das dynamische Verhalten des Einfamilienhauses mit der Objekt-ID 004 im entwickelten Einzonenmodell inklusive der Heiztechnik über ein ganzes Jahr bewerten zu können, werden Ganzjahressimulationen mit den betrachteten Systemen durchgeführt. Hier wird insbesondere die Wärmebereitstellungsmenge in Abhängigkeit von der Außentemperatur betrachtet. Der monatliche Wärmebedarf des Gebäudes sowie die Wärmebereitstellungsmengen der KWK-Anlage werden in diesem Kapitel ebenfalls ausgewertet. Auch die Innentemperaturen des Gebäudes werden für die Beurteilung des thermischen Verhaltens hinzugezogen.

Die Validierung der Jahressimulationen wird für eine detaillierte Analyse unter Berücksichtigung von drei saisonalen Zeiträumen durchgeführt. Hierbei sollen die Unterschiede zwischen den Perioden Winter, Übergangszeit und Sommer ausgearbeitet werden. Die Zeiträume orientieren sich an den Außentemperaturen, die anhand der Wetterdaten der TRY 2010 definiert wurden, siehe Tabelle 48.

Tabelle 48: Aufteilung eines Jahres in drei Zeiträume

Zeitraum	Außentemperaturen [°C]	Intervall
Winterzeit	$T_a \leq 10$	01.01-30.04 & 01.11-31.12
Übergangszeit	$15 \geq T_a \geq 5$	01.05-15.05 & 01.09-31.10
Sommerzeit	$T_a \geq 10$	16.05-31.08

In Abbildung 150 sind die Ergebnisse des simulierten Wärmebedarfs gemeinsam mit den vorliegenden mittleren Außentemperaturen dargestellt. Hierbei stellen die orangenen Balken den simulierten monatlichen Wärmebedarf und die blaue Linie den gemittelten Außentemperaturverlauf des simulierten Jahres dar. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Gebäude während der kälteren Monate wie z. B. Januar einen erheblich höheren Wärmebedarf als in den wärmeren Monaten aufweist. Die Simulationen des Wärmebedarfs im entwickelten Einzonenmodell bilden somit die Temperaturabhängigkeit des Wärmebedarfs sehr gut ab.

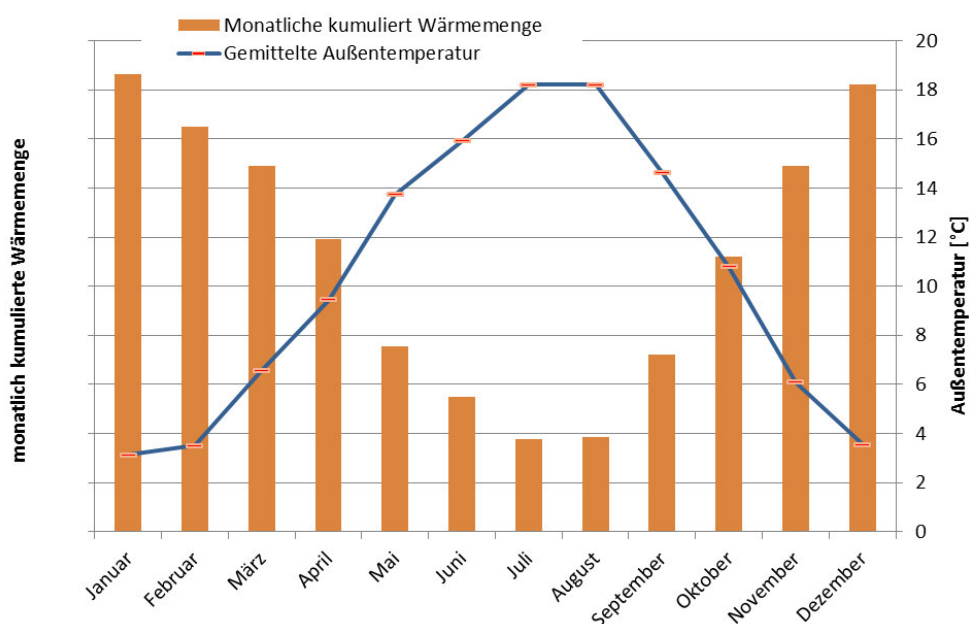


Abbildung 150: Qualitativer Wärmebedarf eines Gebäudes über einen Jahreszeitraum

Um den Wärmebedarf des Gebäudes in Abhängigkeit von den drei verschiedenen saisonalen Zeiträumen zu analysieren, ist in Abbildung 151 die simulierte Heizleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur farblich aufgetragen. Die Verteilung der Simulationsergebnisse zeigt deutlich, wie die mittlere Heizleistung mit abnehmender Temperatur zunimmt. In dem rot gekennzeichneten Bereich zwischen 0 bis 500 W ist zu erkennen, dass für alle drei betrachteten Zeiträume Simulationen vorliegen. Diese Simulationsergebnisse spiegeln Zeitpunkte wider, in denen kein Wärmebedarf aufgrund des Nutzerverhaltens vorlag. Die Tatsache, dass der Wärmebedarf in den Simulationen nicht vollständig entfällt (Werte bis 500 W), liegt darin begründet, dass aufgrund des Erhalts von Stetigkeitsbedingungen bei der Modellierung der Volumenstrom innerhalb des Gebäudes nicht auf null gesetzt werden kann. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, ist in Abbildung 152 die Heizlast für zwei Tage gezeigt. In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass trotz der Nachtabsenkung eine geringe Wärmemenge in das System fließt (rot skizzierten Zonen).

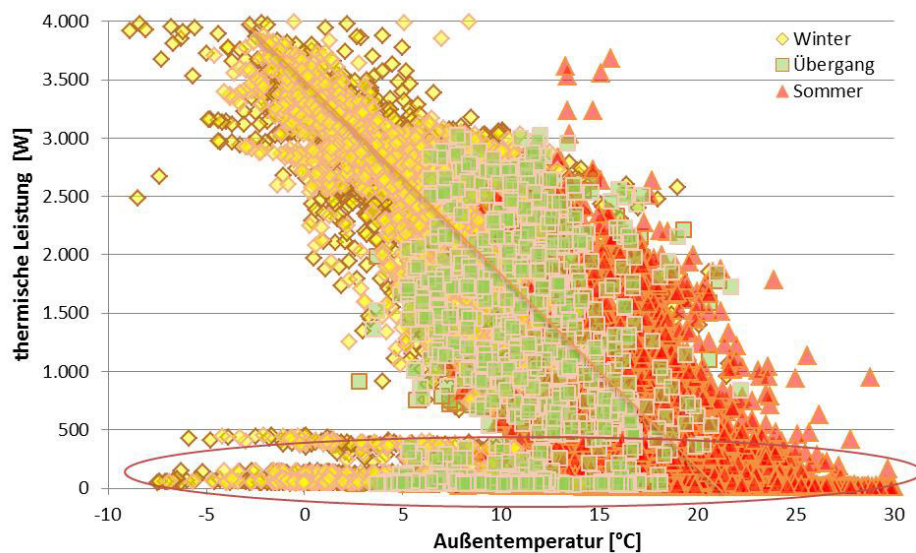


Abbildung 151: Verteilung der simulierten thermischen Leistung

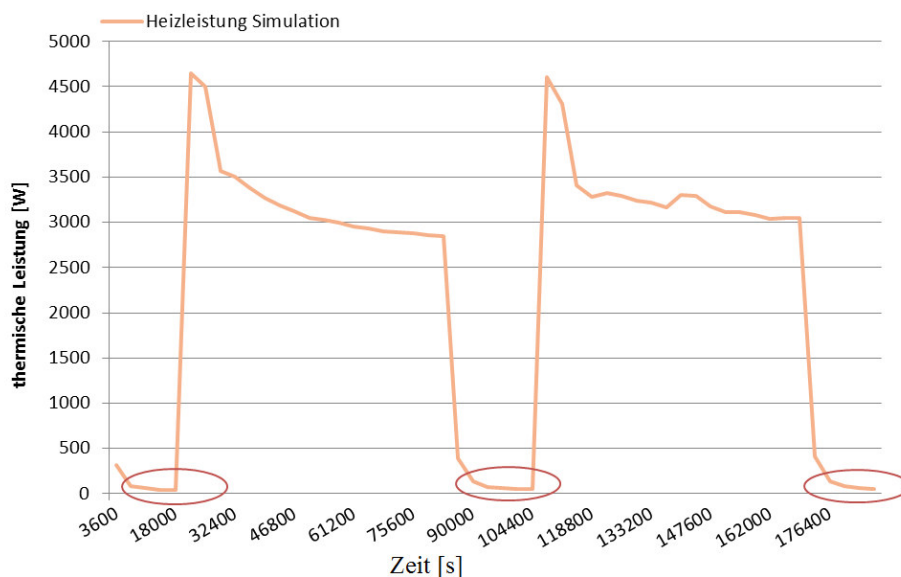


Abbildung 152: Darstellung der thermischen Leistung im Gebäude vom 01. bis 02. Januar

Die Auswertung des kumulierten Wärmebedarfs zeigt, dass für die Simulationen unter Hinzunahme der TRY 2010 Wetterdaten der Wärmebedarf bei 18,3 MWh/a liegt. Aus der Messung ergibt sich hingegen ein Wärmebedarf von 15,8 MWh/a, sodass die Abweichung 16 % beträgt.

Aus den erstellten Simulationen kann weiterhin abgeleitet werden, wie groß der Deckungsanteil der reinen KWK-Wärmebereitstellung am Wärmebedarf des Gebäudes ist. In Abbildung 153 ist hierfür der Anteil der KWK-Wärmebereitstellung dem Wärmebedarf des Gebäudes gegenübergestellt. Des Weiteren ist in der Abbildung der monatliche generierte KWK-Strom angefügt. Es ist zu erkennen, dass in den kälteren Zeiträumen das Zusatzheizgerät zur Abdeckung der erhöhten Wärmebedarfsanforderung zugeschaltet werden muss. Das bedeutet, dass der KWK-Anteil im kälteren Zeitraum im Vergleich zu der gesamten Menge pro Monat geringer ist als im Übergangs- sowie Sommerzeitraum.

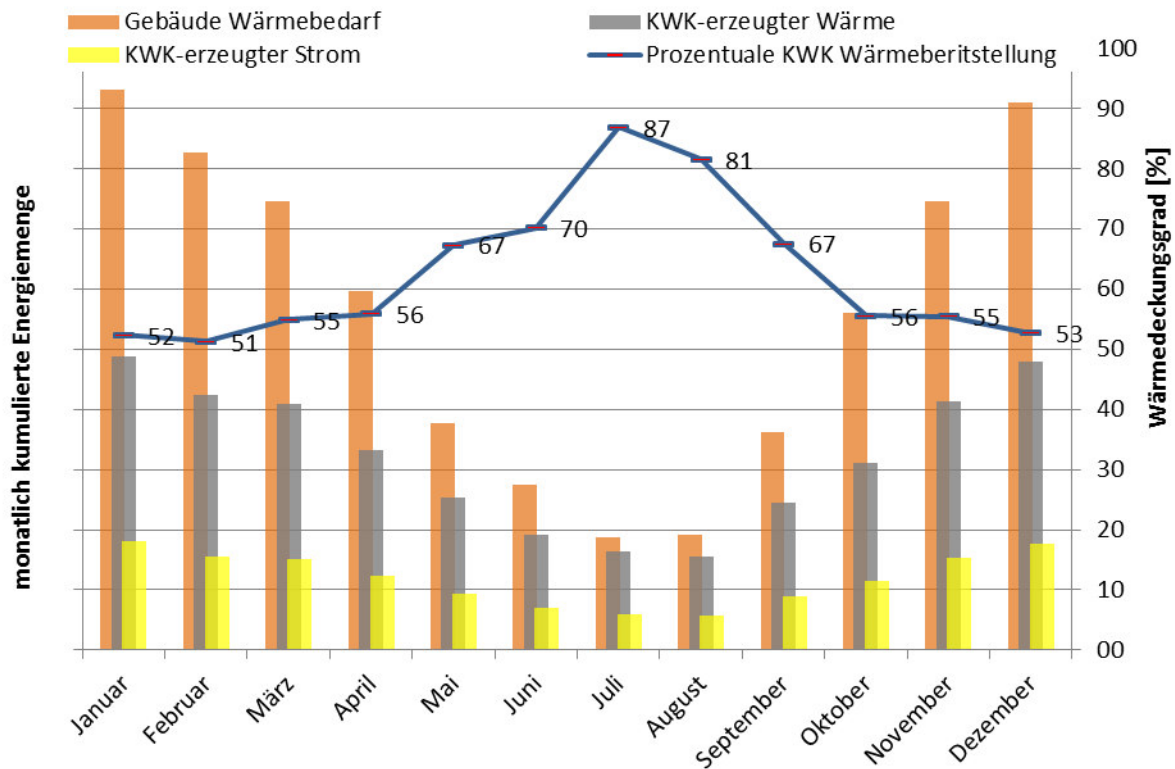


Abbildung 153: Qualitative Darstellung des monatlichen Anteils der KWK-Wärme- und Strombereitstellung im Vergleich zu dem gesamten Wärmebedarf des Gebäudes

3.4.3 Zusammenfassung

Die vorangegangenen Betrachtungen konnten aufzeigen, dass das thermische Verhalten der abgebildeten Gebäude sehr gut der Theorie entspricht. Speziell im Hinblick auf die Einenzonen und Mehrzonen-Simulationsergebnisse des Einfamilienhauses konnten sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Nicht nur die kumulierten bilanziellen Ergebnisse weisen eine gute Übereinstimmung auf, sondern auch das Auftreten von anlagenseitigen regelungstechnischen Ereignissen. Somit kann sowohl für die thermische Gebäudehülle als auch für das Versorgungssystem eine erfolgreiche Validierung festgestellt werden. Dies ist speziell im Hinblick für die Simulation von zukünftigen Szenarien ein wichtiges Ergebnis. Die in Abbildung 154 dargestellten relativen und absoluten Abweichungen der KWK-Stromproduktion aus der Mehrzonensimulation des Einfamilienhauses zeigen, dass speziell in den durch die Witterungsverhältnisse geprägten Phasen eine sehr gute Übereinstimmung mit der Realität erreicht werden konnte. Die Nichtheizperiode weist sowohl absolut als auch relativ die größten Abweichungen auf. Es kann jedoch anhand der Messdaten festgestellt werden, dass die auftretenden Abweichungen nicht auf einen Fehler im Modell zurückzuführen sind, sondern dass von Bewohnerseite ein nicht abbildbares Verhalten vorlag.

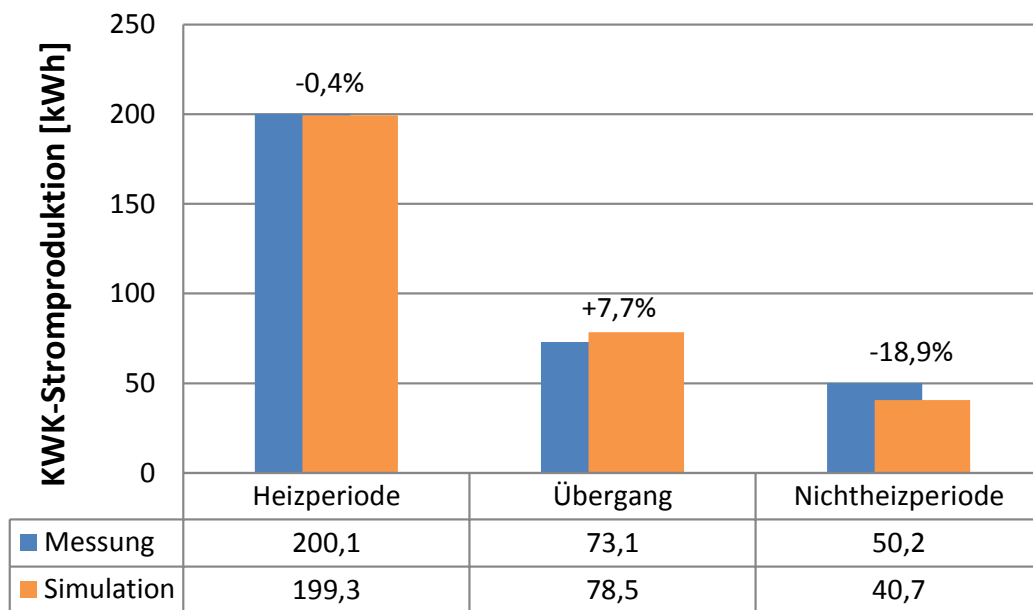


Abbildung 154: Absolute und relative Abweichung der KWK-Stromproduktion

Im Hinblick auf den Erdgaseinsatz stellen sich die Verhältnisse etwas anders da. Wie in Abbildung 155 zu erkennen ist, weist die Heizperiode über den Betrachtungszeitraum hinweg eine relative Abweichung von 20,2 % auf. Bei genauerer Betrachtung des Referenzzeitraums fällt jedoch auf, dass die Abweichung ursächlich vom stark veränderten Verhalten der Bewohner ab dem zweiten Wochenende innerhalb des Betrachtungszeitraums herrührt. Wie erwähnt, kann dieses stark vom Normalzustand abweichende Verhalten nicht ohne Weiteres abgebildet werden. Im restlichen Zeitraum hingegen weicht der Normgasverbrauch nur um ca. 6 % ab, welches ein sehr gutes Ergebnis ist, da auch Faktoren wie der schwankende Heizwert des genutzten Erdgases sowie die geringeren Wirkungsgrade im Anfahr- und -Abfahrvorgang nicht abgebildet wurden.

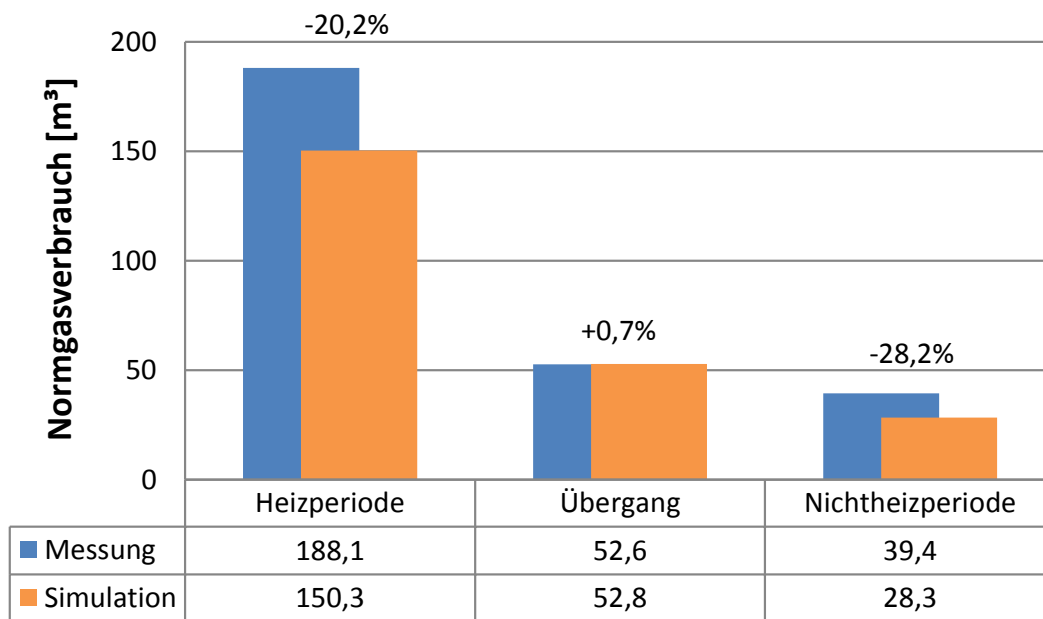


Abbildung 155: Absolute und relative Abweichung des Normgasverbrauchs

Im Hinblick auf den Abgleich der Mehrfamilienhäuser wird es nötig sein die Validierung für die kommenden drei Referenzzeiträume erneut durchzuführen. Der Grund hierfür liegt in technischen Störungen im Monitoring-System sowie anfänglich auftretende Störungen der KWK-Anlagen. Es lagen für die drei gewählten Referenzzeiträume nur für Objekt 227 die vollständigen Daten vor. Wie im vorangegangenen Abschnitt zu erkennen, waren die Messdaten dieses Objekts nur bedingt geeignet für eine Validierung, da es anfänglich zu technischen Störungen auf Seiten der KWK-Anlage kam und zu nicht reproduzierbaren Fahrweisen der Anlage. Die erhaltenen Messdaten widersprachen zu großen Teilen vollständig der Theorie. Als Beispiel sei hier die durchgehende Heizung bei Außentemperaturen von 25 bis 30 °C genannt. Das erstellte Modell stellte jedoch die zu erwartende Fahrweise sehr gut dar. Es ist sehr gut zu beobachten wie in der Simulation ab ca. 15 °C Außentemperatur die Heizgrenztemperatur erreicht ist. Darüber hinaus ist der Einfluss des Bewohnerverhaltens deutlich geworden und eine erweiterte Messdatenerfassung zur Evaluierung des wechselnden menschlichen Einflusses wird in Betracht gezogen.

3.5 Erweiterte Analysen und Optimierungen

3.5.1 Bewertung des Netzeinflusses

3.5.1.1 Quantitative Darstellung des Netzeinflusses

Das Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ bietet über die Erfahrungen und Messdaten des einzelnen Objekts hinaus die Möglichkeit der Darstellung und Untersuchung des Verhaltens von größeren Gruppen von KWK-Systemen. Derartige Gruppen können sowohl als Schwarm oder im Falle der aktiven Steuerung von außen auch als virtuelle Kraftwerke bezeichnet werden. Im Falle der 100 KWK-Anlagen handelt es sich in der ersten Phase um KWK-Anlagen, die wärmegeführt betrieben werden und keinem netzseitigen Einfluss unterworfen sind. Im Folgenden werden die 100 KWK-Anlagen als Schwarm betrachtet, dessen Verhalten sich ausschließlich aufgrund des Bewohnerverhaltens und der annähernd gleichen wärmegeführten Einzelanlagenregelungen ergibt. Die Analyse des Verhaltens des 100 KWK-Schwarms ermöglicht somit Aussagen über das generelle Verhalten von großflächig eingesetzten KWK-Systemen im gemischten, häuslich geprägten Bestand. Hierbei sei erwähnt, dass zwar gewisse Aussagen anhand einer reinen Einzelobjekt-Betrachtung möglich sind, jedoch Aussagen zur Gleichzeitigkeit von Ereignissen und Bewohnerverhalten aus der Einzelbetrachtung nur bedingt oder überhaupt nicht ableitbar sind. Diese Informationen sind von besonderem Interesse speziell im Hinblick auf die zu erwartenden netzseitigen Peak-Leistungen und dem generell veränderten Strombezug über das Jahr hinweg.

Anhand der bereits definierten Referenzzeiträume soll im Folgenden eine bilanzielle Analyse des netzseitigen Einflusses eines häuslich geprägten KWK-Schwarms durchgeführt werden. Der betrachtete Schwarm besteht aus 25 KWK-Anlagen mit elektrischen Leistungen von 1 bis 4,7 kW.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist es unter Rücksichtnahme auf die aktuellen Rahmenbedingungen sinnvoller, den von der KWK-Anlage bereitgestellten Strom innerhalb des Gebäudes für die Eigennutzung zu verwenden. Indikatoren für eine effiziente Einbindung des generierten KWK-Stroms sind durch die Faktoren Stromeigennutzungs- sowie Stromdeckungsanteil gegeben. Der Stromdeckungsanteil definiert dabei zu welchem Grad der Strombedarf durch eigene KWK-Stromproduktion gedeckt werden kann. Der Stromeigennutzungsanteil hingegen definiert inwieweit Stromproduktion und Strombedarf zeitlich korrelieren und der produzierte Strom auch vor Ort genutzt oder eingespeist wird.

Der Stromdeckungsanteil hängt bei einer wärmegeführten Fahrweise stark von den gegebenen Witterungsverhältnissen bzw. der Jahreszeit ab. Dies liegt darin begründet, dass sich bei einem wärmegeführten System die Fahrweise der KWK-Anlage nach dem Wärmebedarf des Gebäudes orientiert. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs ist in Abbildung 156 die KWK-Stromproduktion des betrachteten Schwarms in den drei Referenzzeiträumen dargestellt. In der Analyse spiegelt sich die erhöhte Strombereitstellung der KWK-Anlagen mit abnehmender Lufttemperatur (erhöhter Wärmebedarf) deutlich wider.

Des Weiteren sind für die jeweiligen Zeitspannen die mittleren Lufttemperaturen angeführt (schwarz gestrichelte Graphen). Der Vergleich zwischen der kalten, Übergangs- und warmen Woche zeigt anschaulich, wie die Strombereitstellung mit zunehmender Temperatur bzw. verringertem Wärmebedarf abnimmt.

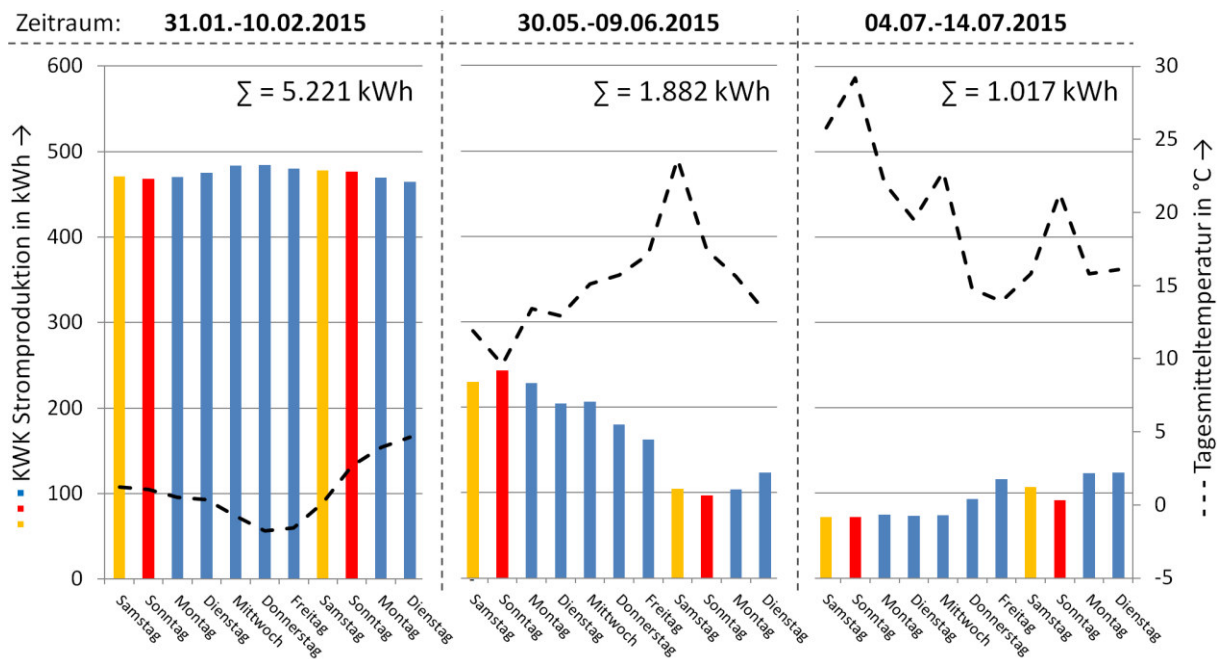


Abbildung 156: KWK-Strombereitstellung von insgesamt 25 KWK-Anlagen für drei Zeitspannen mit verschiedenen Witterungsverhältnissen sowie die mittleren Lufttemperaturen (schwarz gestrichelte Graphen)

In der kalten Woche wurden insgesamt 5.112 kWh, in der Übergangswoche 1.882 kWh und in der warmen Woche nur noch 1.017 kWh Strom bereitgestellt. Die Nettostromproduktion des Schwarms sinkt somit ausgehend von der Heizperiode hin zur Nichtheizperiode um ca. 80 % ab. Die generelle Temperaturabhängigkeit der Strombereitstellung ist auch außerhalb der gewählten Intervalle zu erkennen, sodass der angeführte Temperaturverlauf annähernd dem inversen Verlauf der Strombereitstellung über dem jeweiligen Zeitraum entspricht. Eine Abweichung hierzu stellen die Wochenenden dar, in denen ein leicht erhöhter Wärmebedarf aufgrund des Nutzerverhaltens besteht.

Im Hinblick auf die Stromeinspeisung (siehe Abbildung 157) stellt sich eine ähnliche Abhängigkeit von der Temperatur dar, wie hinsichtlich der Stromproduktion. Analog zur generellen Produktion fällt die Einspeisung um 79 % vom Winterzeitraum hin zum Sommerzeitraum ab. Die sich ergebende Schlussfolgerung ist, dass das Verhältnis der produzierten zur eingespeisten Strommenge und damit der Stromeigennutzungsanteil über das Jahr hinweg nahezu konstant bleibt und temperaturunabhängig ist. Darüber hinaus können anhand der dargestellten Daten Rückschlüsse auf den, für den zu deckenden Wärmebedarf, verantwortlichen Gebäudebestand gezogen werden. Dies ist möglich über die bereits in vorangegangenen Kapiteln erwähnte Grenzheiztemperatur, welche direkt von der Bausubstanz und somit der Baualterklasse abhängig ist. Anhand von Abbildung 156 und Abbildung 157 ist speziell in der Nichtheizperiode zu erkennen, dass der Schwarm erst ab Temperaturen unter 15 °C eine Re-

aktion auf die Außentemperatur aufweist. Oberhalb dieser Temperatur stellen die KWK-Systeme folgerichtig nur die nahezu außentemperaturunabhängige Brauchwasserwärme zur Verfügung. Eine Heizgrenztemperatur von 15 °C deckt sich dabei sehr gut mit der Typologie der 100 KWK-Anlagen, da diese zu 60 % von Gebäuden erbaut vor 1984 geprägt ist.

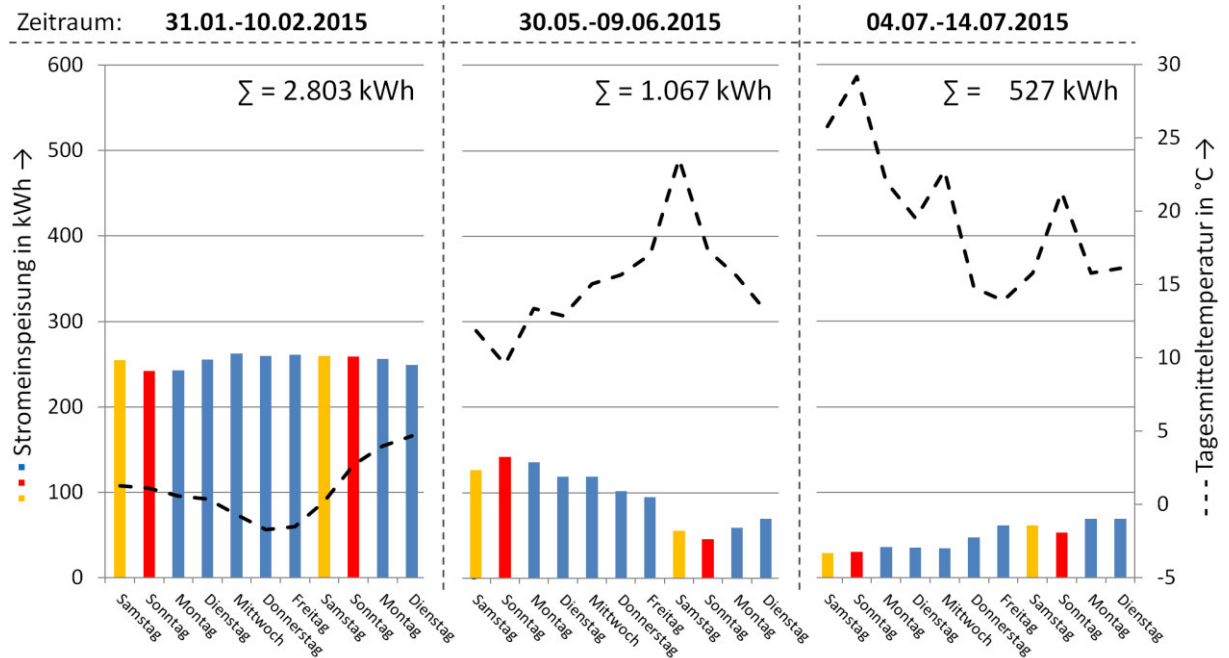


Abbildung 157: KWK-Stromeinspeisung von insgesamt 25 KWK-Anlagen für drei Zeitspannen mit verschiedenen Witterungsverhältnissen sowie die mittleren Lufttemperaturen (schwarz gestrichelte Graphen)

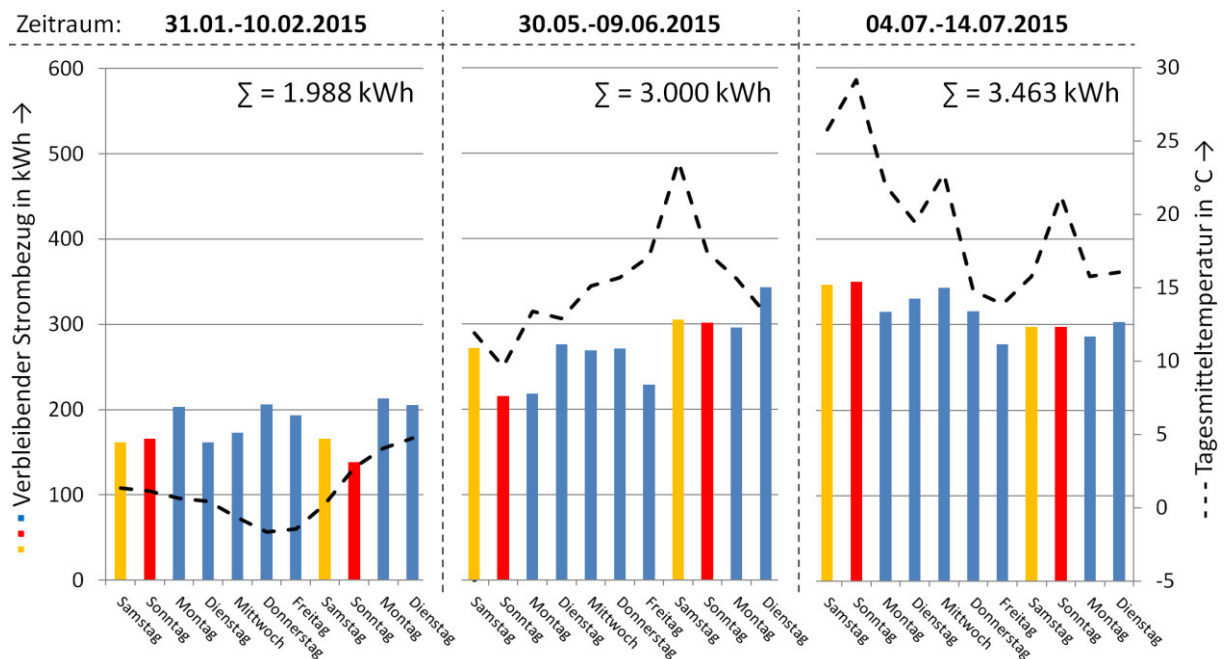


Abbildung 158: KWK-Strombezug von insgesamt 25 KWK-Anlagen für drei Zeitspannen mit verschiedenen Witterungsverhältnissen sowie die mittleren Lufttemperaturen (schwarz gestrichelte Graphen)

Der Strombedarf der schwarmzugehörigen Gebäude ist nur geringfügig von den Witterungsverhältnissen abhängig und im stärkeren Maße vom Verhalten der Bewohner und den jahreszeitlich bedingten Lichtverhältnissen. Basierend auf dieser Tatsache und der mit steigender Außentemperatur sinkenden KWK-Stromproduktion ergibt sich über das Jahr hinweg eine der Stromeinspeisung entgegengesetzte Charakteristik. Ausgehend von der Heizperiode steigt der netzseitige Strombezug hin zur Nichtheizperiode um ca. 74 % an. Der Stromdeckungsanteil nimmt hingegen stark mit abnehmender KWK-Strombereitstellung ab, sodass dieser von der Jahreszeit bzw. dem Wärmebedarf abhängig ist. In dem hier ausgewerteten Datensatz (siehe Tabelle 49) liegt der Stromdeckungsanteil des gesamten Schwarms in der kalten Woche bei 40 %, in der Übergangswoche bei 21 % und in der warmen Woche bei nur noch 12 %. Der Stromeigennutzungsanteil hingegen weist hier noch einmal zusammengefasst nur eine Schwankungsbreite von maximal 5 % über die drei Zeiträume auf.

Tabelle 49: Stromeigennutzungs- und Stromdeckungsanteil der 25 KWK-Anlagen

Witterung	Stromeigennutzungsanteil	Stromdeckungsgrad
Kalte Woche	46 %	40 %
Übergangswoche	43 %	21 %
Warme Woche	48 %	12 %

Der geringe Stromdeckungsanteil in warmen Perioden verbirgt im wirtschaftlichen Sinne ein gewisses Potenzial zur kostenoptimierten Fahrweise von KWK-Anlagen. Zu beachten ist allerdings, dass eine Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils in kalten Perioden aufgrund der wesentlich höheren KWK-Strombereitstellung einen bedeutenderen ökonomischen Ertrag mit sich führt.

In Zusammenfassung der vorangegangenen Betrachtungen ergibt sich eine qualitative Charakteristik in dem Verhalten des Schwarms, welche ins Verhältnis zur netzseitigen Ist-Situation gestellt werden muss. Anhand der Ausführungen ist erkennbar, dass der Einsatz von wärmegeführten KWK-Systemen zu einer Verschiebung des Strombezugsmaximums führt. Das kumulierte Maximum des Strombezugs im häuslichen Sektor ohne den Einsatz von KWK ist in den Winter- und Frühjahrsmonaten verortet. Der Einsatz von KWK-Systemen führt netzseitig nicht nur zu einer absoluten Verringerung des Strombezugs, sondern auch zu einer Verschiebung des Bezugsmaximums in die Nichtheizperiode, wenn die KWK-Anlage aufgrund des minimierten Wärmebedarfs selten läuft. Dieses sich ergebende Profil verhält sich gegenläufig zur allgemeinen Stromerzeugung in Deutschland, wie in Abbildung 159 dargestellt ist. Anhand der Darstellung kann nachvollzogen werden, dass die Verringerung des Strombezugs in den Zeitraum des Maximums der konventionellen Stromerzeugung fällt.

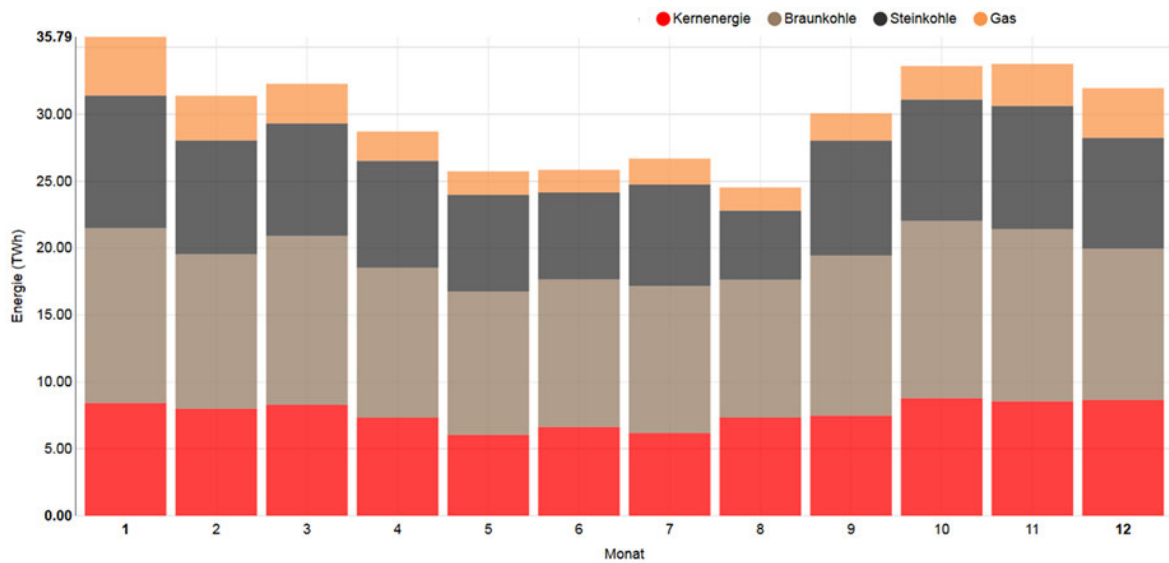


Abbildung 159: Monatliche Stromerzeugung in Deutschland für das Jahr 2014 [45]

Unter Einbeziehung der sich aus der KWK-Stromproduktion ergebenden Einspeisung ergibt sich eine weitere Potenzierung des zuvor beschriebenen Phänomens. Ein Abgleich des beschriebenen netzseitigen Profils eines wärmegeführten Schwarms mit der monatlichen Stromerzeugung aus den erneuerbaren Energien (siehe Abbildung 160) zeigt sich ergänzende Maxima auf. In Zeiten bisheriger maximaler konventioneller Stromerzeugung wird der Strombezug im gemischten Bestand um ca. 74 % reduziert und das Maximum verlagert sich in den Zeitraum der maximalen erneuerbaren Stromproduktion. Die sich ergebende Schlussfolgerung ist somit, dass wärmegeführte KWK-Systeme im häuslichen Sektor über das Jahr hinweg nicht nur temporär konventionelle Stromerzeugung substituieren können, sondern darüber hinaus auch das Potenzial besitzen in Ergänzung zu erneuerbaren Energien fossile Kraftwerke in der Grundlast zu ersetzen.

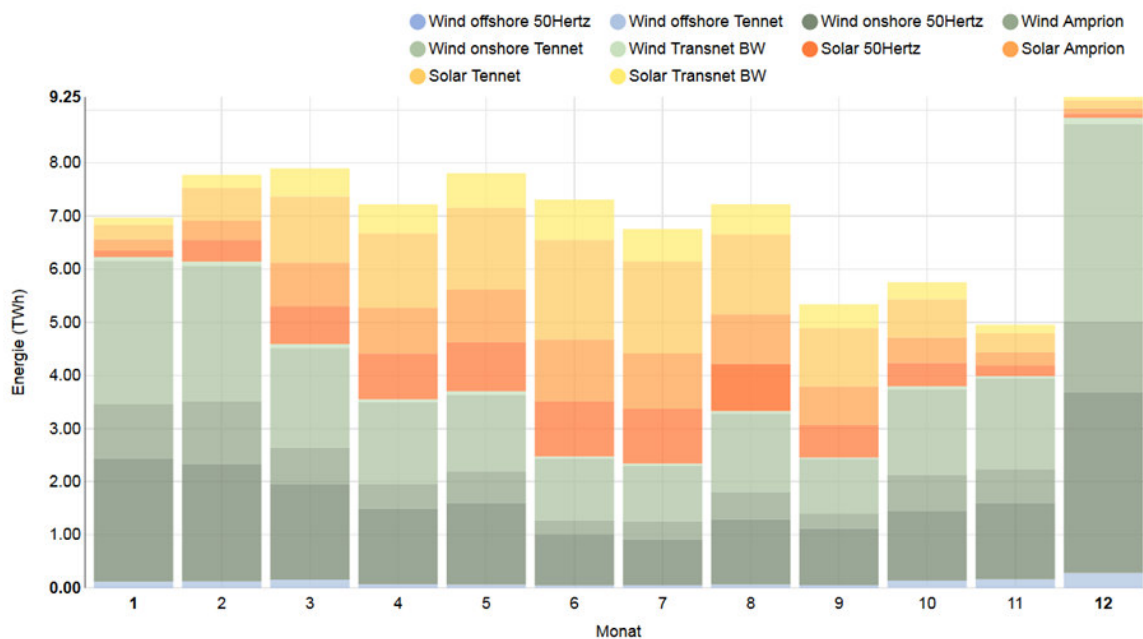


Abbildung 160 Monatliche Stromerzeugung (EE) in Deutschland 2014 [45]

3.5.1.2 Auswirkungen auf die Netzqualität

Zur Beurteilung der Auswirkungen auf die Netzqualität wurde eine detaillierte Langzeitmessung an einem Einphasen-Nano-BHKW durchgeführt. Die Messung erfolgte im Zeitraum vom 29.10.2015 um 17:33:27 Uhr bis 02.11.2015 um 09:03:25 Uhr für das in Referenzgebäude RH1 installierte Brötje EcoGen WGS mit einer elektrischen Nennleistung von 1 kW.

In Abbildung 161 sind für den 31.10.2015 exemplarisch die Netzspannung sowie die Profile von Wirk- und Blindleistung (BHKW-Erzeugung) dargestellt, die auf Phase A gemessen wurden. Es ist erkennbar, dass es in Zeiten des BHKW-Betriebs zu einer leichten Erhöhung der Netzspannung am Anschlusspunkt kommt. Wenn das BHKW unter Volllast läuft (ca. 950 W) beträgt die erzeugte Blindleistung ca. 400 VAR (siehe Abbildung 161).

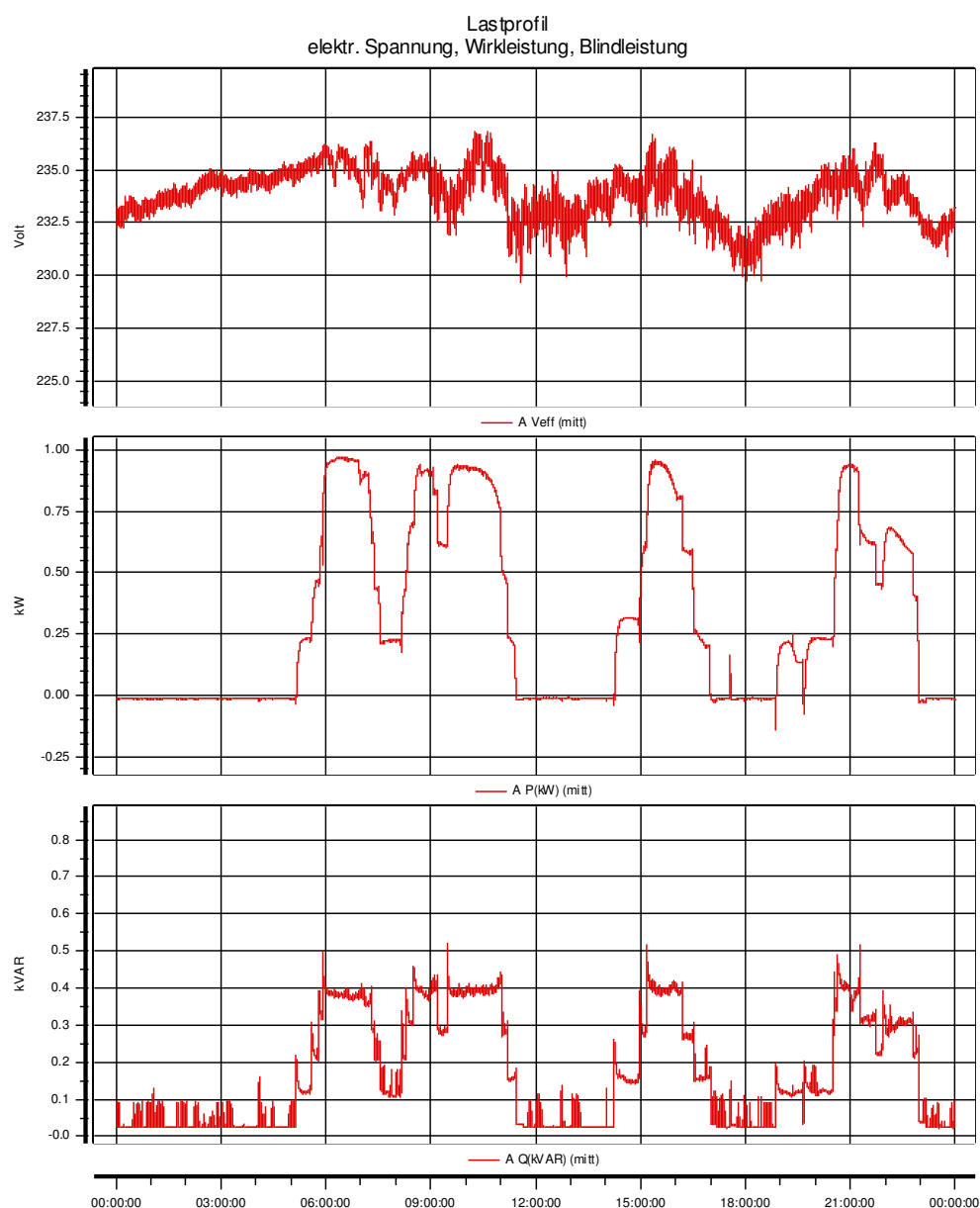


Abbildung 161: Profile von Netzspannung, Wirkleistung und Blindleistung; gemessen am 31.10.2015 am Einphasen-Nano-BHKW „Brötje EcoGen WGS“ (1 kW) in Referenzgebäude RH1

In Abbildung 162 ist die Häufigkeitsverteilung der drei Größen über den gesamten Messzeitraum als Histogramm und als (kumulative) Verteilungsfunktion dargestellt.

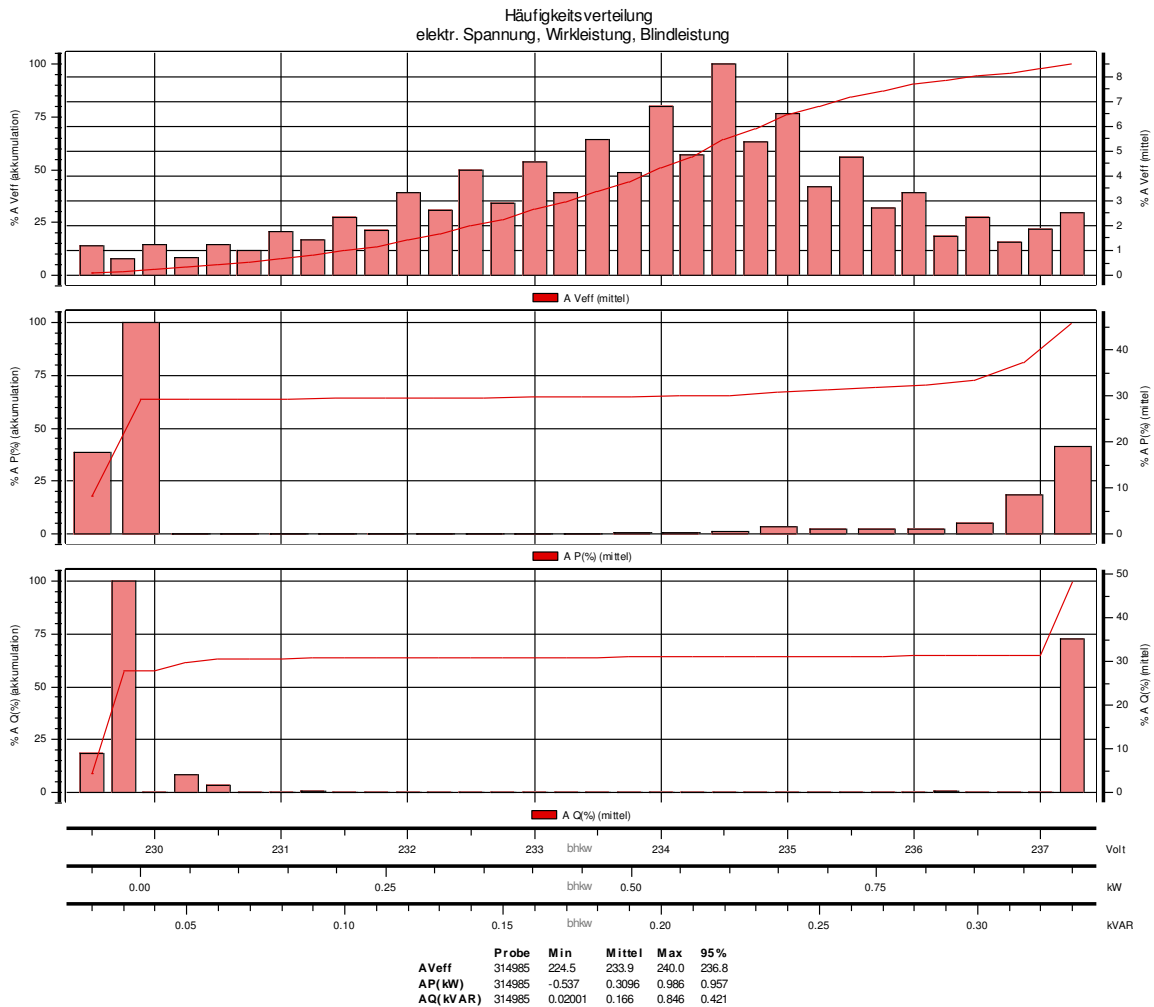


Abbildung 162: Häufigkeitsverteilung und kumulative Verteilungsfunktion von Netzspannung sowie Wirk- und Blindleistung des Einphasen-Nano-BHKW „Brötje EcoGen WGS“ über den gesamten Messzeitraum (29.10.15 17:33 Uhr – 02.11.15 09:03 Uhr)

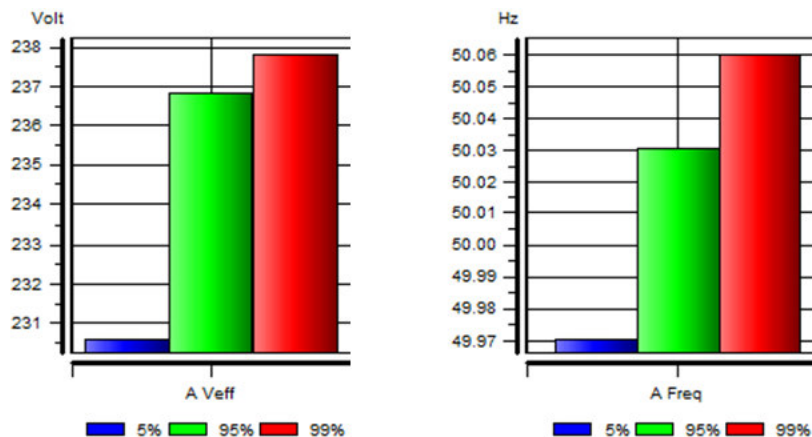


Abbildung 163: Netzqualität (Netzspannung und Netzfrequenz) im gesamten Messzeitraum

Tabelle 50: Statistische Kenngrößen der Netzqualität (Netzspannung und Netzfrequenz) sowie des Leistungsfaktors im gesamten Messzeitraum

Netzfrequenz				
	Min	Hz	49,88	am 29.10.2015 um 21:03:15 Uhr
	Max	Hz	50,11	am 30.10.2015 um 08:04:12 Uhr
	Median	Hz	50,00	
	Durchschnitt	Hz	50,00	
Netzspannung				
	Min	Volt	224,50	am 31.10.2015 um 17:54:13 Uhr
	Max	Volt	240,00	am 30.10.2015 um 16:28:38 Uhr
	Median	Volt	234,10	
	Durchschnitt	Volt	233,90	
Leistungsfaktor				
	Min		0,000	
	Max		0,950	
	Median		0,373	
	Durchschnitt		0,564	

Die von der Mess-Software erstellte "Zusammenfassung schlimmster Ereignisse" zeigt, dass im gesamten Messzeitraum weder Spannungseinbrüche noch Spannungserhöhungen und auch keine Spannungsunterbrechungen registriert wurden. Spannungstransienten wurden ebenfalls nicht aufgezeichnet, da der Toleranzbereich zu keiner Zeit überschritten wurde. Eine Auswertung der Harmonischen (Oberschwingungen) ist in Tabelle 51 aufgelistet.

Tabelle 51: Harmonische (alle Zahlen sind 95 %-Werte)

	Grenze (% von Un)	A	B	C	Status
THD	< 8,00	1,00 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H02	< 2,00	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H03	< 5,00	1,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H04	< 1,00	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H05	< 6,00	1,90 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H06	< 0,50	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H07	< 5,00	1,14 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H08	< 0,50	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H09	< 1,50	0,52 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H10	< 0,50	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H11	< 3,50	0,51 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H12	< 0,50	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H13	< 3,00	0,38 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H14	< 0,50	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H15	< 0,50	0,30 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H16	< 0,50	0,04 %	N/A	N/A	BESTANDEN
H17	< 2,00	0,17 %	N/A	N/A	BESTANDEN

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Netzqualität an der Anschlussstelle des Einphasen-Nano-BHKW „Brötje EcoGen WGS“ zu jeder Zeit den Anforderungen entspricht.

3.5.2 Potenzialabschätzung zur Integration von E-Mobility

Anhand erster gemittelter Daten wurden im Rahmen des Projekts erste Hochrechnungen zu Potenzialen der KWK-Technologie im E-Mobility-Sektor vorgenommen. Zur Veranschaulichung soll im Folgenden eine beispielhafte Hochrechnung aus gemittelten gemessenen und simulierten Ergebnissen dargestellt werden. Als Referenzobjekt wird ein Einfamilienhaus aus den 1980er Jahren betrachtet, welches von zwei Erwachsenen und einem Kind bewohnt wird. Der gemittelte Jahreswärmebedarf beträgt ca. 17.000 kWh und der gemittelte Strombedarf liegt bei ca. 4.500 kWh. Des Weiteren wird in den Referenzzeiträumen der Heizperiode und der Übergangsperiode eine typische Woche ausgewählt. Es wird angenommen, dass innerhalb dieser zwei Wochen von 8 Uhr bis 17 Uhr gearbeitet wird und somit niemand anwesend ist. Es wird festgelegt, dass ein etwaig vorhandenes Elektro-Auto nur dann geladen werden kann, wenn die Bewohner des Hauses anwesend sind und der produzierte KWK-Strom nicht selber verbraucht wird. Daraus folgt, dass nur ein Teil des normalerweise eingespeisten Stroms für die E-Mobility verwendet werden kann, da die Bedingung der Anwesenheit einschränkend wirkt. In der folgenden Abbildung sind exemplarisch die kumulierten 5-Minutenwerte für eine typische Winterwoche dargestellt. In grün ist die Einspeiseleistung aufgetragen und grauhinterlegt ist die für diesen Fall angenommene Anwesenheit der Bewohner kenntlich gemacht.

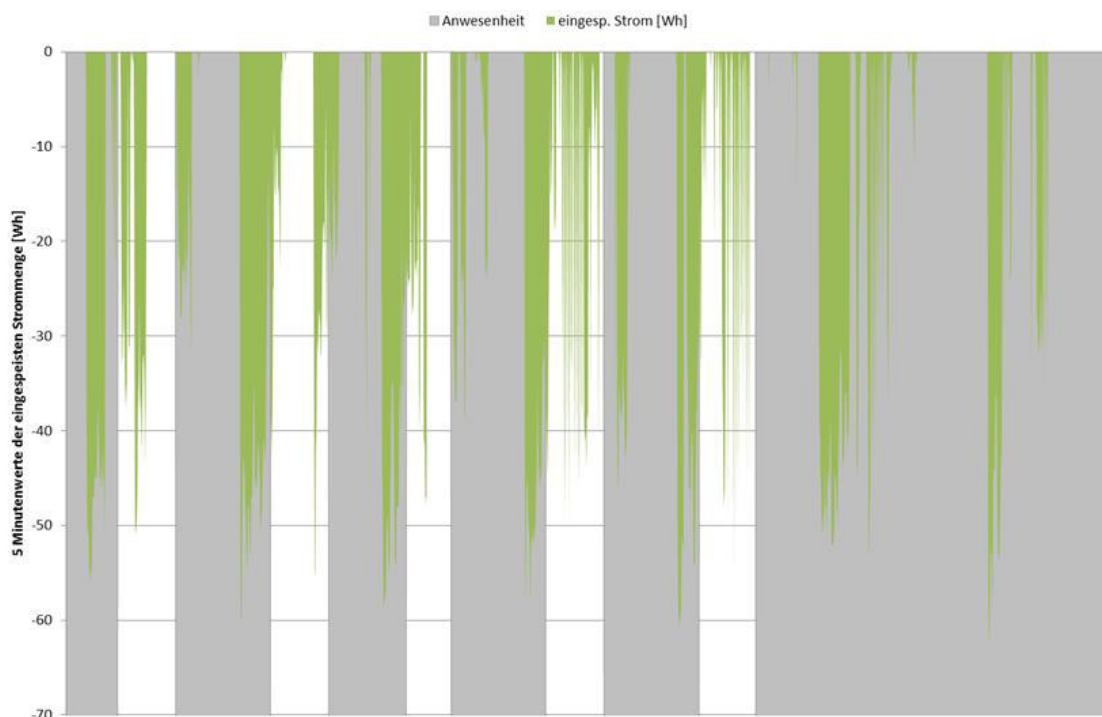


Abbildung 164: Exemplarische 5-Minutenwerte der KWK-Einspeiseleistung in einer Winterwoche ergänzt durch die mögliche Anwesenheit eines Elektroautos

Unter Annahme der aufgeführten Bedingungen ergeben sich für die zu betrachtenden Zeiträume nutzbare Energiemengen, welche zur Ladung eines Elektroautos genutzt werden können. Diese Energiemenge kann in Abhängigkeit vom gewählten Auto zu unterschiedlich großen zurücklegbaren Distanzen führen. Um diesen Faktor abbilden zu können, wurden entsprechende Verbräuche und Reichweiten der unterschiedlichen Modelle recherchiert. In

Abbildung 165 sind für die gängigsten, rein batteriebetriebenen Elektroautos die Reichweite pro kWh (orange) und der Verbrauch in kWh/100 km (grau) aufgetragen.

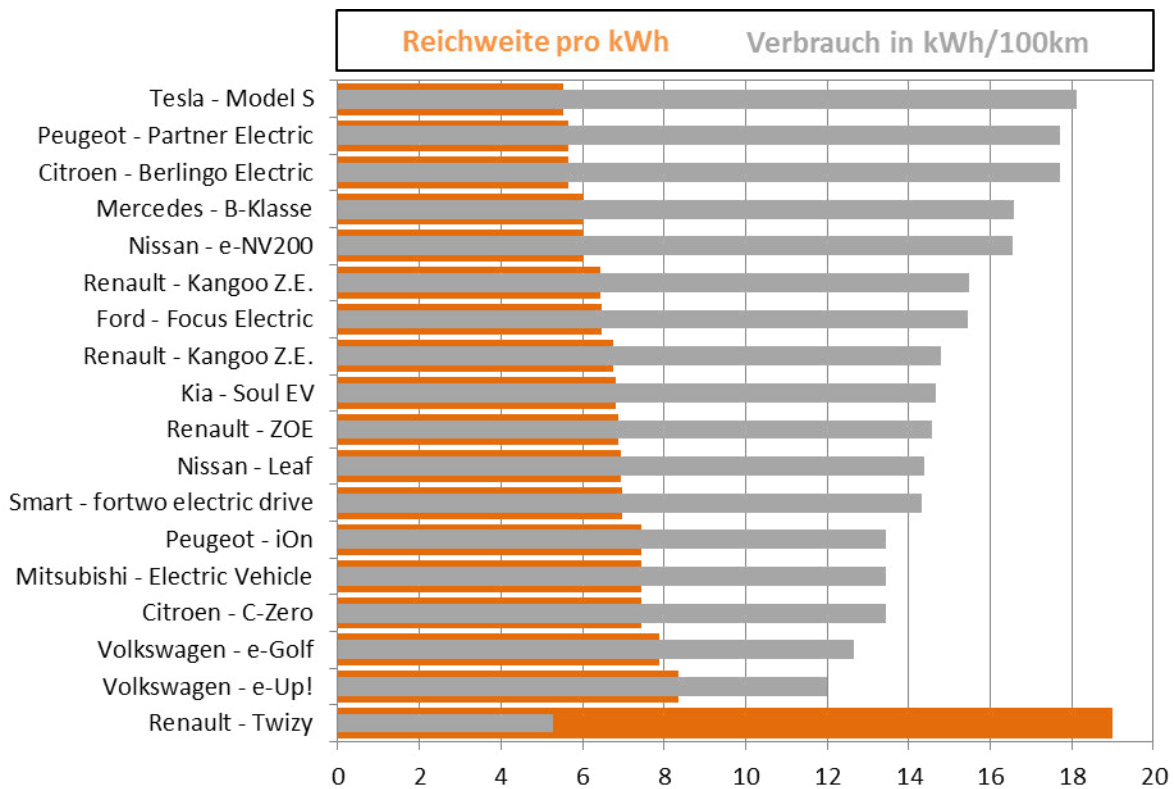


Abbildung 165: Reichweite (orange) und Verbrauch (grau) verschiedener Elektroautos

Für die folgenden Betrachtungen wird eine Verbrauchsspanne von ca. 12 kWh (VW-e-Up!) bis 20 kWh (Tesla Model S - sportliche Fahrweise) pro 100 km angenommen. Der Renault Twizy wird in dieser ersten Betrachtung aus Gründen der begrenzten Klimatisierbarkeit und damit begrenzten Komfort speziell im Winter außen vor gelassen, obwohl dieser die besten Verbrauchswerte aufweist.

Die sich ergebenden und zur Verfügung stehenden Strommengen sowie die resultierenden E-Mobility-Kilometer sind in Tabelle 52 zusammengetragen. Für die Heizperiode werden durch die KWK-Anlage in dem exemplarischen Einfamilienhaus ca. 25 kWh pro Woche in das Netz eingespeist. Von diesen 25 kWh sind ca. 18 kWh real zur Ladung eines Elektroautos einsetzbar. Analog ergeben sich für den Übergangszeitraum 10,6 kWh als nutzbarer Ladestrom.

Tabelle 52: Zur Verfügung stehenden Strommengen sowie die resultierenden E-Mobility-Kilometer

Zeitraum	KWK		E-Mobility	
	Einspeisung in kWh/Woche	Nutzbarer Ladestrom in kWh/Woche	Reichweite in km/Woche	Reichweite in km/d
Heizperiode	25,0	18,0	90 - 150	13 - 21
Übergang	12,2	10,6	53 - 89	7,6 - 12,7

Unter Berücksichtigung der gewählten Verbrauchswerte ergeben sich im Winter pro Woche 90 bis 150 km und pro Tag 13 bis 21 km E-Mobility-Reichweite. Entsprechend der generell verringerten KWK-Stromproduktion im Übergangszeitraum ergeben sich für eine typische Herbst- oder Frühlingswoche ca. 53 bis 89 km pro Woche und 7,6 bis 12,7 km pro Tag. Zur Verdeutlichung der möglichen KWK-E-Mobility-Pendler-Distanz ist in Abbildung 166 für die Winterwoche jeweils die tägliche KWK-E-Mobility-Reichweite am Beispiel Bottrops dargestellt. Der innerste Kreis entspricht dem Pendlerradius eines Tesla Model S von 6,5 km (Gesamttagesstrecke 13 km) hin und zurück zur Arbeitsstätte. Der nächstgrößere Radius entspricht dem Pendlerradius eines VW-e-Up! von 10,5 km (Gesamttagesstrecke 21 km), welcher bereits komplett Bottrop einschließt und den Pendlerverkehr zwischen Bottrop und Essen ermöglichen würde. Der äußerste Kreis zeigt die Einwegdistanz eines VW-e-Up! auf, welcher zur Arbeitsstätte fährt und dort wieder während der Arbeitszeit aufgeladen wird. Auf diesem Weg wären sogar Pendlerstrecken von Bottrop bis Bochum möglich.

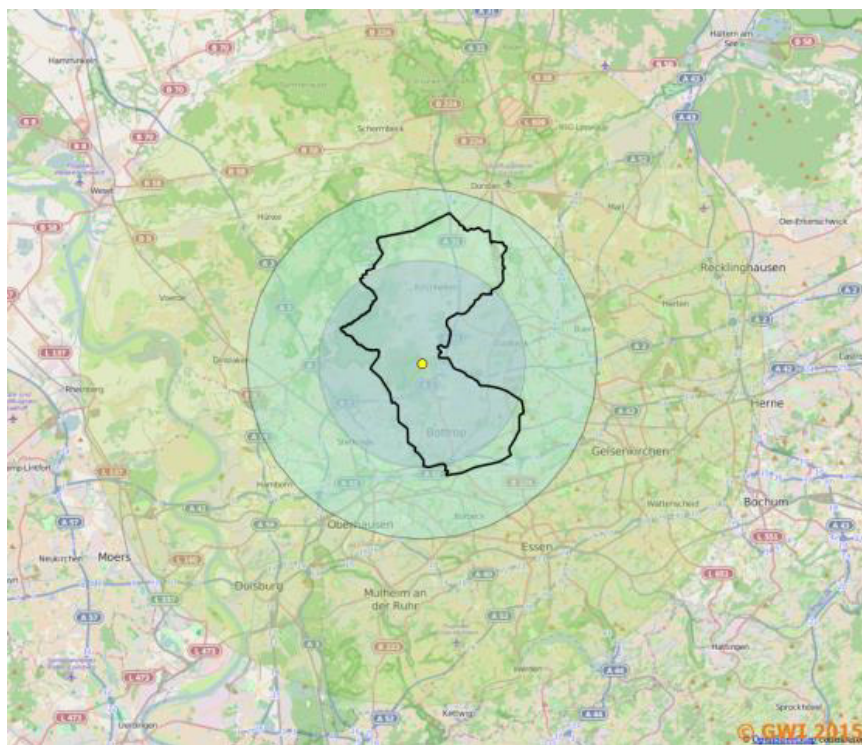


Abbildung 166: Tägliche KWK-E-Mobility-Reichweite am Beispiel Bottrop (von innen nach außen: 13/2 km; 21/2 km; 21 km One Way)

Diese ersten Auswertungen zeigen somit auf, dass in der Kombination von KWK und E-Mobility große Potenziale liegen und es auch energiewirtschaftlich sinnvoll ist den Eigenstromverbrauch durch den Einsatz von E-Mobility zu steigern. Darüber hinaus besteht auch ein großes Potenzial in der Vermeidung von CO₂-Emissionen im Mobilitätssektor. Die CO₂-Emissionen von herkömmlichen PKW (Benzin und Diesel) können durch den Einsatz von mit KWK-Strom betriebenen Elektrofahrzeugen um bis zu 80 % gesenkt werden.²⁴

²⁴ Einsparungsermittlung auf Grundlage der IEA-Methode (International Energy Agency). Je nach Wahl der Allokationsmethode können die resultierenden Einsparungen zum Teil deutlich niedriger ausfallen.

3.5.3 Stromorientierung des KWK-Betriebs

3.5.3.1 BHKW-Betriebsverhaltens im wärmegeführten Betrieb

In Abbildung 167 ist für fünf der 10 Referenzgebäude dargestellt, welcher Anteil des erzeugten BHKW-Stroms im Gebäude selbst verbraucht wurde. Es sind jeweils die monatlichen Eigenverbrauchsquoten dargestellt, die auf Grundlage der GWI-Messwerte im wärmegeführten Betrieb für den Zeitraum von Dezember 2014 bis August 2015 ermittelt wurden.

Die Eigenverbrauchsquote wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Eigenverbrauchsquote} = \frac{\text{Stromerzeugung}_{\text{BHKW}} - \text{Stromeinspeisung}}{\text{Stromerzeugung}_{\text{BHKW}}} \quad (3-21)$$

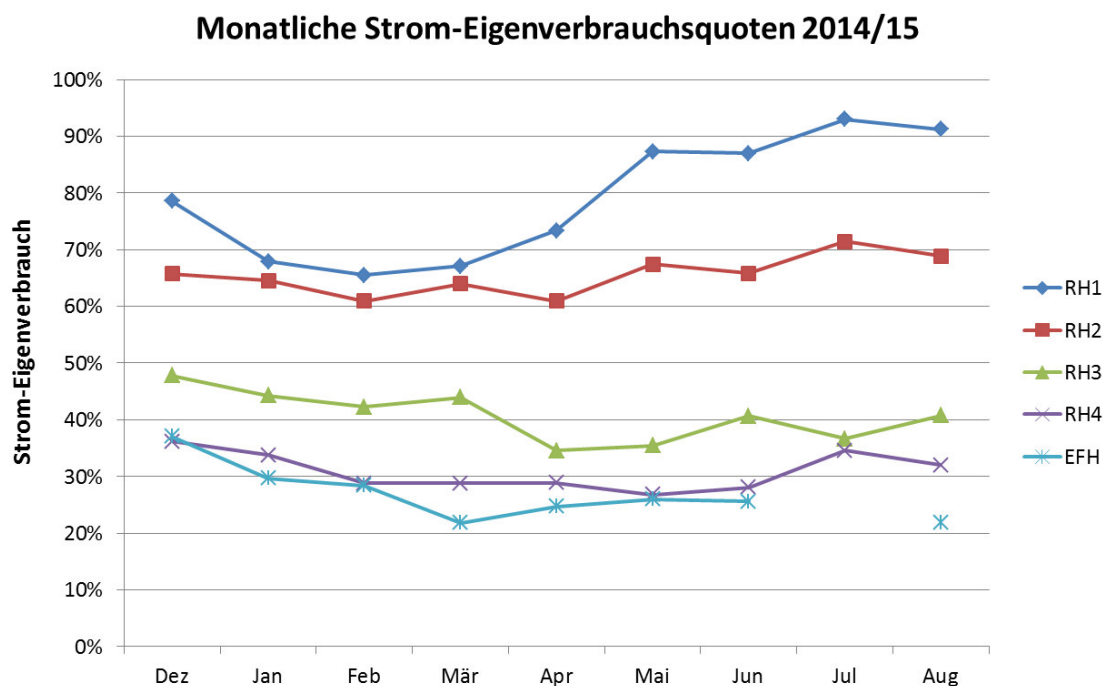


Abbildung 167: Eigenverbrauchsquoten für den erzeugten BHKW-Strom im Zeitraum Dezember 2014 bis August 2015

In den Doppelhäusern / Reihenendhäusern (RH) und dem Einfamilienhaus (EFH) sind folgende BHKW installiert:

- | | |
|---------------------------|---------------|
| 🔥 Brötje EcoGen WGS 20.1 | RH1, RH2, RH3 |
| 🔥 Viessmann Vitotwin 300W | RH4 |
| 🔥 Vaillant ecoPower 1.0 | EFH |

Abbildung 167 zeigt, dass sich die monatlichen Strom-Eigenverbrauchsquoten in den verschiedenen Objekten sehr stark voneinander unterscheiden. Sie variieren zwischen 21,9 % (EFH, März) und 93,0 % (RH1, Juli). Im jahreszeitlichen Verlauf ändern sich die Eigenverbrauchsquoten nur vergleichsweise gering. In der Tendenz kann der Strom-Eigenverbrauch im Verlauf von der kalten zur warmen Jahreszeit leicht steigen (RH1), leicht abnehmen (RH3, EFH) oder weitgehend unverändert bleiben (RH2, RH4). Die unterschiedlichen Trends liegen in der Beschaffenheit der Stromverbrauchsprofile in den jeweiligen Gebäuden begründet.

RH1 und RH2

In RH1 und RH2 lag der durchschnittliche Stromeigenverbrauch in jedem Monat über 60 % und erreichte Werte bis über 90 %. Begründet sind die Werte beider Gebäude in einer hohen Grundlast. Exemplarisch sind in Abbildung 168 die Stromprofile von RH1 an einem Sommertag abgebildet, an dem der Strom-Eigenverbrauch bei ca. 89 % lag (und damit geringer war als im Durchschnitt der Monate Juli und August).

Die Stromprofile basieren auf den Messdaten des GWI, sodass die Datenpunkte der Profile jeweils die Durchschnittsleistung eines 5-Minuten-Intervalls repräsentieren. Mit diesem Umstand lässt sich auch die kleine Stromeinspeisung während des BHKW-Betriebs am frühen Morgen (ca. 6:00 Uhr bis 6:40 Uhr) erklären. Obwohl die BHKW-Stromerzeugung in keinem 5-Minuten-Intervall über dem Gebäudestromverbrauch des gleichen Zeitraums lag, ist aufgrund der Schwankungen innerhalb des 5-minütigen Zeitraums eine kleine Stromeinspeisung ins Netz (und auch ein kleiner Strombezug aus dem Netz) zu verzeichnen.

Stromprofile von RH1 am 01.07.2015

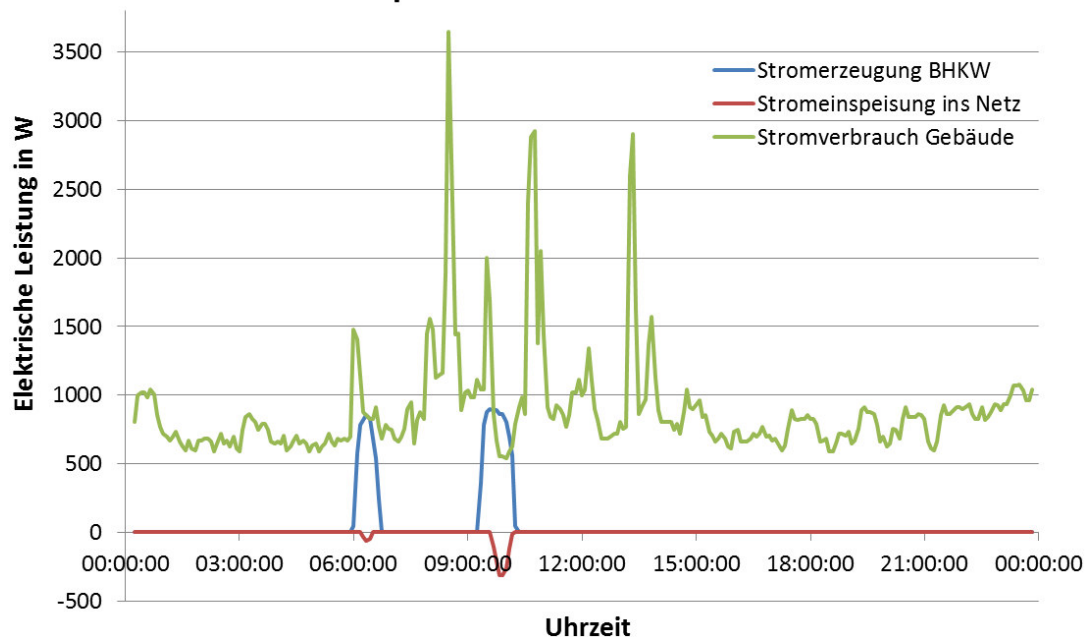


Abbildung 168: Profile der BHKW-Stromerzeugung, der Stromeinspeisung ins öffentliche Stromnetz und des Gebäudestromverbrauchs von RH1 am 01.07.2015. Auffällig ist der hohe Grundlastbedarf des Gebäudes, der zu einem hohen Strom-Eigenverbrauch von ca. 89 % an diesem Tag führt, da nur sehr wenig Strom ins Netz eingespeist werden muss.

In den Gebäuden RH1 und RH2 lohnt sich aufgrund der hohen Grundlast der Betrieb der installierten BHKW²⁵. Der Bedarf für ein Energiemanagement mit dem Ziel der Eigenverbrauchsoptimierung ist dementsprechend eher gering. Während eine flexible stromorientierte Betriebsweise in diesen Gebäuden leicht umsetzbar ist, steht vergleichsweise wenig überschüssiger Strom für Elektrofahrzeuge zur Verfügung.

²⁵ Diese Aussage bezieht sich auf den reinen Betrieb der Anlage, d.h. dass die Kosten für Erdgasbezug und Wartung durch die eingesparten Kosten für Strombezug und Wärmebereitstellung überkompensiert werden.

EFH

Im untersuchten Einfamilienhaus (EFH) lag der Stromeigenverbrauch in jedem Monat von Januar 2015 bis August 2015 unter 30 %. In Abbildung 167 sind exemplarisch die Stromprofile an einem Wochentag im März dargestellt. An diesem Tag lief das BHKW von 3:40 Uhr morgens bis 22:25 Uhr abends ununterbrochen. Aufgrund der geringen Grundlast im Gebäude wurden nur 24 % des erzeugten BHKW-Stroms im Gebäude selbst verbraucht, die übrigen 76 % mussten in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Diese Werte entsprechen ungefähr den durchschnittlichen Eigenverbrauchsquoten, die für das EFH im Jahr 2015 in den Monaten März bis August registriert wurden (siehe Abbildung 167).

Stromprofile von EFH am 04.03.2015

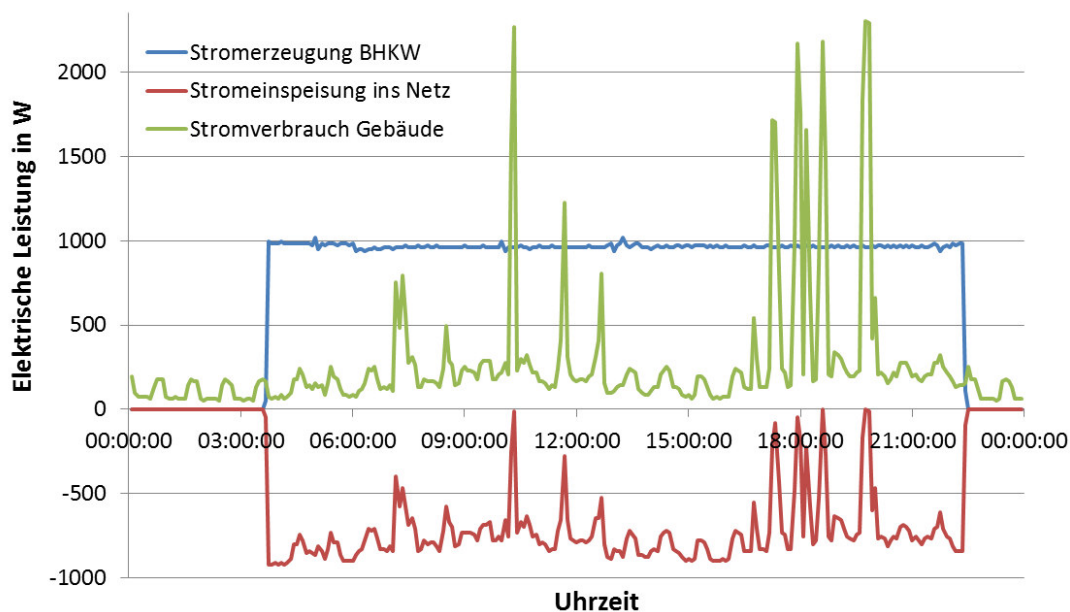


Abbildung 169: Profile der BHKW-Stromerzeugung, der Stromeinspeisung ins öffentliche Stromnetz und des Gebäudestromverbrauchs von EFH am 04.03.2015.

RH3 und RH4

Die Stirling-motorischen KWK-Anlagen, das Brötje EcoGen WGS 20.1 und Viessmann Vitotwin 300 W, erreichen Eigenverbrauchsquoten von durchschnittlichen ca. 30 % in RH4 und 40 % in RH3.

Fazit

In Gebäuden wie EFH, RH3 und RH4, in denen dauerhaft deutlich unter 50 % des erzeugten BHKW-Stroms selbst genutzt werden, besteht somit sehr großer Bedarf für ein Energiemanagement zur Eigenverbrauchserhöhung. Auf der einen Seite kann der Betrieb des BHKW zeitlich auf jene Zeiträume eingeschränkt werden, in denen Strom benötigt wird. Ein weiterer Ansatzpunkt ist, flexible Stromverbraucher wie z. B. Waschmaschine oder Geschirrspüler gezielt zu jenen Tageszeiten zu betreiben, in denen auch das BHKW laufen soll. Zusätzlicher Strombedarf zum Laden von Elektrofahrzeugen wirkt sich in Gebäuden mit geringen Eigenverbrauchsquoten sehr positiv auf die Systemauslastung aus.

Anteil des selbst verbrauchten BHKW-Stroms am Gebäudeverbrauch (Autarkiequote)

Die Autarkiequote beschreibt, welcher Anteil des Gebäudestromverbrauchs durch den eigenverbrauchten BHKW-Strom bereitgestellt wird. Sie kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\text{Autarkiequote} = \frac{\text{Stromerzeugung}_{\text{BHKW}} - \text{Stromeinspeisung}}{\text{Gebäudestromverbrauch}} \quad (3-22)$$

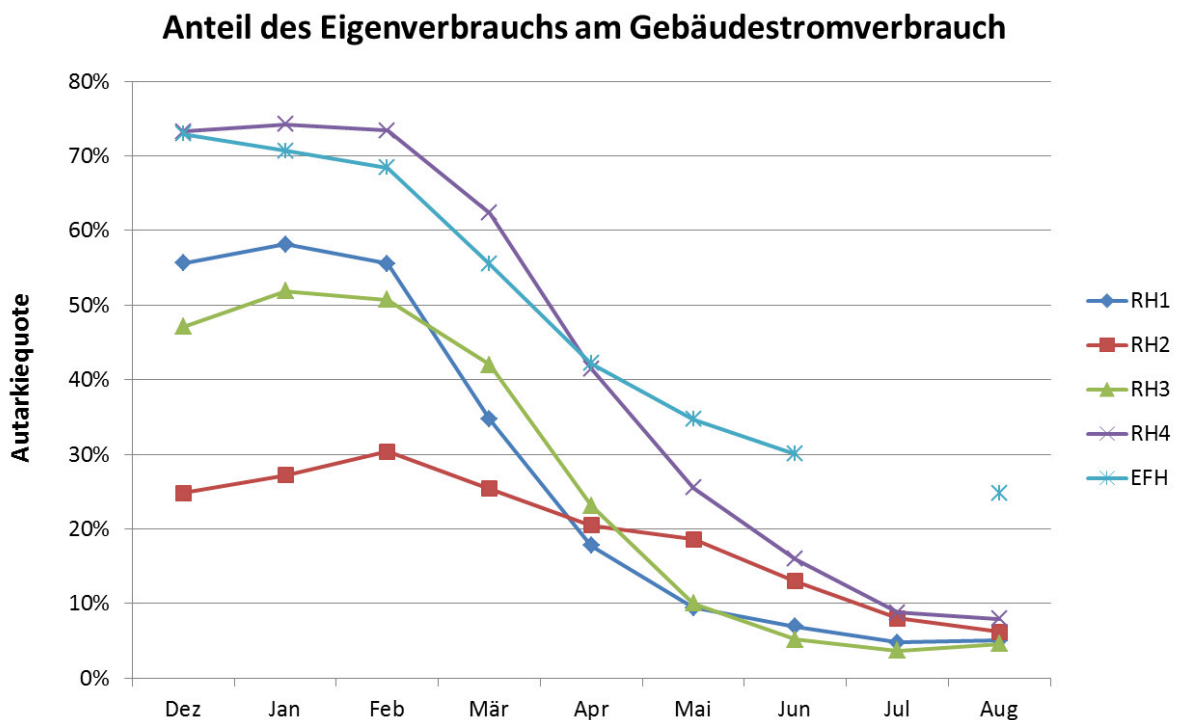


Abbildung 170: Monatliche Autarkiequoten von Dezember 2014 bis August 2015

Während in den Wintermonaten meist zwischen 50 % und 75 % des Stromverbrauchs in den Gebäuden durch eigenverbrauchten BHKW-Strom bereitgestellt werden konnten, geht die Autarkiequote mit steigenden Außentemperaturen und entsprechend kürzeren BHKW-Laufzeiten stark zurück und liegt in den Sommermonaten meist unter 10 % (siehe Abbildung 170). Ausnahmen von diesen Werten wurden in Gebäude RH2 (max. 30 % Autarkiequote in den Wintermonaten) und im EFH (sehr hohe Autarkiequoten von 25 bis 30 % in den Sommermonaten) erfasst. Beide Ausnahmen lassen sich jedoch durch Sondereffekte erklären.

Das im EFH installierte BHKW ecoPower 1.0 hat eine thermische Leistung von lediglich 2,5 kW, weshalb es pro Betriebsstunde weniger als die Hälfte der Wärmemenge erzeugt, die von den anderen BHKW im gleichen Zeitraum erzeugt wird. Aus diesem Grund benötigt das ecoPower 1.0 mehr als doppelt so lange Laufzeiten, um den Wärmebedarf des Gebäudes zu decken (im Sommer insbesondere Warmwasserbereitung). Folglich erzeugt es mehr als die doppelte Strommenge, die andere BHKW bei der gleichen Wärmeerzeugung produzieren würden. Darüber hinaus lag im Sommer 2015 zeitweise ein erhöhter Raumwärmebedarf im

EFH vor, der durch ein falsch konfiguriertes Heimautomationssystem hervorgerufen wurde. Auch deshalb erreichte der selbstverbrauchte BHKW-Strom im EFH einen ungewöhnlich hohen Anteil am Gebäudestrombedarf (Autarkiequote).

In RH2 ist die ungewöhnlich niedrige Autarkiequote im Winter 2014/15 auf mehrere Effekte zurückzuführen, die an den Strom- und Wärmeprofilen des Gebäudes abgelesen werden können (siehe Abbildung 171 und Abbildung 172):

- ⦿ Die messtechnisch erfasste Leistung des BHKW mit einer elektrischen Nennleistung von 1 kW liegt im Bereich von 660 bis 850 W.
- ⦿ Der Strombedarf des Gebäudes zeichnet sich durch viele und zum Teil sehr hohe Leistungsspitzen von bis zu 4.000 bis 5.000 W aus. Stromverbräuche oberhalb von 1.000 W können generell nicht mit Anlagen dieser Leistungsklasse abgedeckt werden.
- ⦿ Das BHKW wurde am 12.01.2015 lediglich 7:45 h lang betrieben, obwohl der Wärmebedarf des Gebäudes eine deutlich längere Betriebszeit zugelassen hätte (das Zusatzheizgerät lief mindestens 4 h und stellte einen großen Teil der benötigten Wärme bereit). Eine Ausweitung der Betriebszeiten des eingesetzten BHKW Brötje EcoGen WGS kann daher als Optimierungspotenzial identifiziert werden.

Stromprofile von RH2 am 12.01.2015

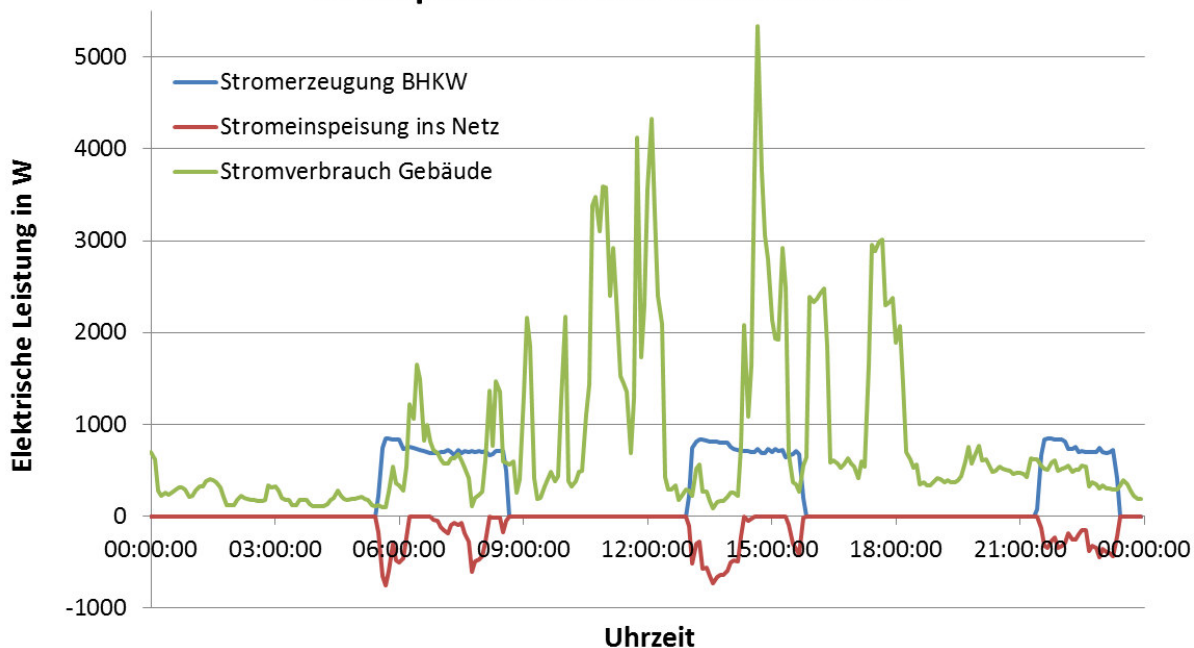


Abbildung 171: Stromprofile von RH2 am 12.01.2015. An diesem Tag wurden lediglich ca. 19 % des Gebäudestromverbrauchs durch selbstverbrauchten BHKW-Strom bereitgestellt (Autarkiequote).

Wärmebedarf und Wärmeerzeugung in RH2 am 12.01.2015

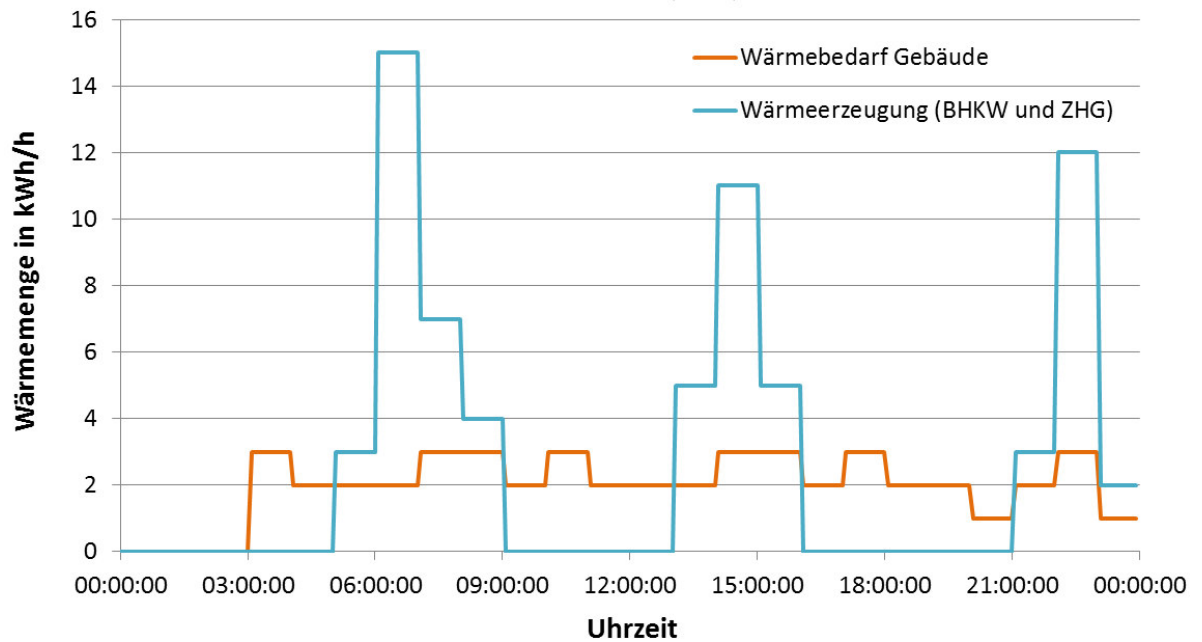


Abbildung 172: Profil des Wärmebedarfs und der Wärmeerzeugung am 12.01.2015 in RH2. Da die Wärmemengen nur mit einer Auflösung von 1 kWh gemessen wurden, werden sie auf der y-Achse in der Einheit kWh/h dargestellt.

3.5.3.2 Wärmespeicher und deren Kapazität

a) Bewertung der Wärmekapazität des Pufferspeichers

Die Wärmekapazität des Pufferspeichers kann in guter Näherung über die Wärmekapazität des Pufferspeicherwassers bestimmt werden. Die folgende Gleichung stellt den Zusammenhang zwischen einer in den Pufferspeicher eingebrachten Wärmemenge ΔQ und der daraus resultierenden Temperaturerhöhung ΔT mit $c_p \approx 4,18 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ und $\rho \approx 0,99 \text{ kg/l}$ dar:

$$\Delta Q = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad (3-23)$$

In den Referenzgebäuden kommen vorwiegend Pufferspeicher mit einem nominalen Volumen von 774 l zum Einsatz. Da es jedoch Randbereiche des Speichers gibt, die möglicherweise nicht (vollständig) an der Speicherung teilnehmen, wird bei den folgenden Berechnungen von einem aktiven Pufferspeichervolumen von 750 l ausgegangen.

Tabelle 53: Wärmekapazität eines 750 l-Pufferspeichers

Wärmemenge ΔQ [kWh]	Temperaturanstieg ΔT [K]	Betriebsdauer [h] eines BHKWs mit einer thermischen Leistung von		
		2,5 kW	5,3 kW	12,5 kW
5	5,7	2,0	0,9	0,4
10	11,5	4,0	1,9	0,8
15	17,2	6,0	2,8	1,2
20	23,0	8,0	3,8	1,6
25	28,7	10,0	4,7	2,0

In Tabelle 53 ist der Temperaturanstieg im Pufferspeicher aufgeführt, der sich einstellt, wenn eine bestimmte Wärmemenge in den Speicher eingebracht wird. Des Weiteren werden auch die Betriebszeiten der verschiedenen BHKW aufgelistet, die zur Bereitstellung der entsprechenden Wärmemenge erforderlich ist. Diese Zeiten geben somit an, welche wärmeseitige Flexibilität der Pufferspeicher dieser Größenordnung für den BHKW-Betrieb ermöglicht.

- 🔥 2,5 kW – Vaillant ecoPower 1.0
- 🔥 5,3 kW – Stirling-BHKWs (Brötje EcoGen WGS und Viessmann Vitotwin)
- 🔥 12,5 kW – Vaillant ecoPower 4.7

Die vom Hersteller angegebenen Pufferspeicherverluste betragen 3,64 kWh/d. Dies entspricht einer kontinuierlichen Wärmeabgabe von ca. 152 W. Diese Werte beziehen sich gemäß DIN EN 12897 auf eine Temperaturdifferenz von 45 K zwischen dem Wasser im Pufferspeicher und der Raumluft am Aufstellort. Die Pufferspeicherverluste hängen linear von dieser Temperaturdifferenz ab und summieren sich im Falle von $\Delta T = 45 \text{ K}$ auf ungefähr 110 kWh/Monat. An dieser Stelle muss hinzugefügt werden, dass die Wärmeverluste des Pufferspeichers nicht zwingend auch Wärmeverluste für das Gebäude bedeuten. Der Pufferspeicher kann vielmehr als ein Heizkörper betrachtet werden, der seine Umgebung erwärmt.

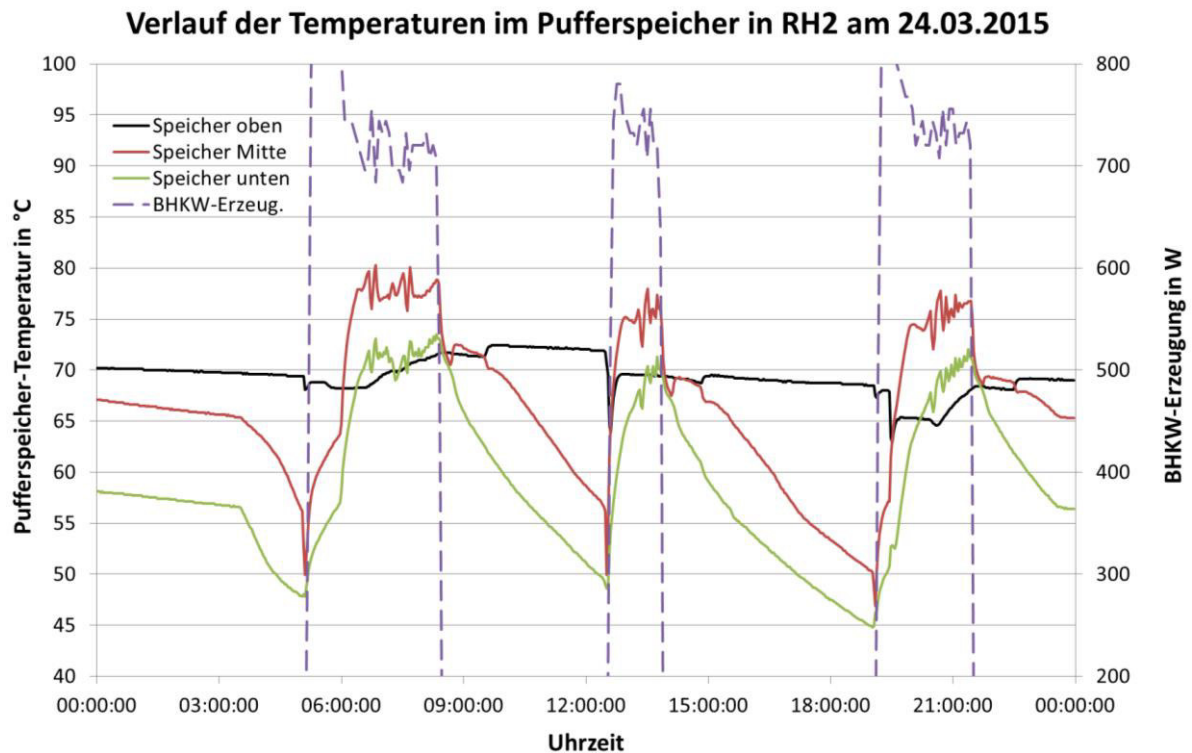


Abbildung 173: Verlauf der Temperaturen im Pufferspeicher (oben, Mitte, unten) in RH2 am 24.03.2015. Auf der sekundären y-Achse ist die BHKW-Stromerzeugung dargestellt, um die Laufzeiten des BHKW anzuzeigen.

In Abbildung 173 ist exemplarisch für einen Pufferspeicher dargestellt, wie sich die Temperatur an verschiedenen Stellen in diesem Pufferspeicher über einen Tag hinweg entwickelt hat. Es ist erkennbar, dass die Temperatur im unteren Teil des Speichers durchgängig etwa 5 °C kühler als im mittleren Teil des Speichers war. Das wärmegeführte BHKW startet, wenn die Temperatur im unteren Teil auf 50 bis 45 °C abgesunken ist. In der Mitte des Speichers war die Temperatur bis zum Start des BHKW zweimal auf ca. 55 °C und einmal bis auf 50 °C abgesunken.

Das Speicherwasser wurde bis auf ca. 70 °C erwärmt. Die während des BHKW-Betriebs gemessenen Temperaturwerte von zum Teil deutlich über 70 °C rühren wahrscheinlich daher, dass der Temperatursensor an einem Stutzen (Zuleitung) des Pufferspeichers und nicht auf dem Drucktank selbst angebracht war. Während des BHKW-Betriebs, d.h. in der Zeit zwischen dem Einschalten und dem Ausschalten des BHKW, wurde die Temperatur im unteren und mittleren Teil des Pufferspeichers somit um ca. 15 bis 20 °C angehoben. Für den oberen Teil des Speichers kann dagegen kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem BHKW-Betrieb erkannt werden.

b) Bewertung der Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudesubstanz

An der Hochschule Ruhr West (HRW) wurde ein thermisches Gebäudemodell entwickelt, mit dem die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudesubstanz untersucht wurde (siehe Abbildung 174). Die Substanz eines Gebäudes – Wände, Decken und Böden – kann physikalisch als ein Wärmespeicher betrachtet werden, der über eine sehr große Masse und Wärmekapazität ver-

fügt und in direktem Kontakt mit der Raumluft steht. Aus diesem Grund können die massiven Bauteile eines Gebäudes sehr große Wärmemengen aufnehmen und zwischenspeichern, wenn die Raumtemperatur gezielt um einen gewissen Betrag erhöht wird. Analog dazu kann die Wärme zu einem späteren Zeitpunkt durch Absenken der Raumtemperatur wieder ausgespeichert werden. Mit Hilfe des thermischen Gebäudemodells soll die Frage beantwortet werden, welche Wärmemenge in der Gebäudesubstanz gespeichert werden kann ohne den thermischen Komfort der Bewohner übermäßig einzuschränken.

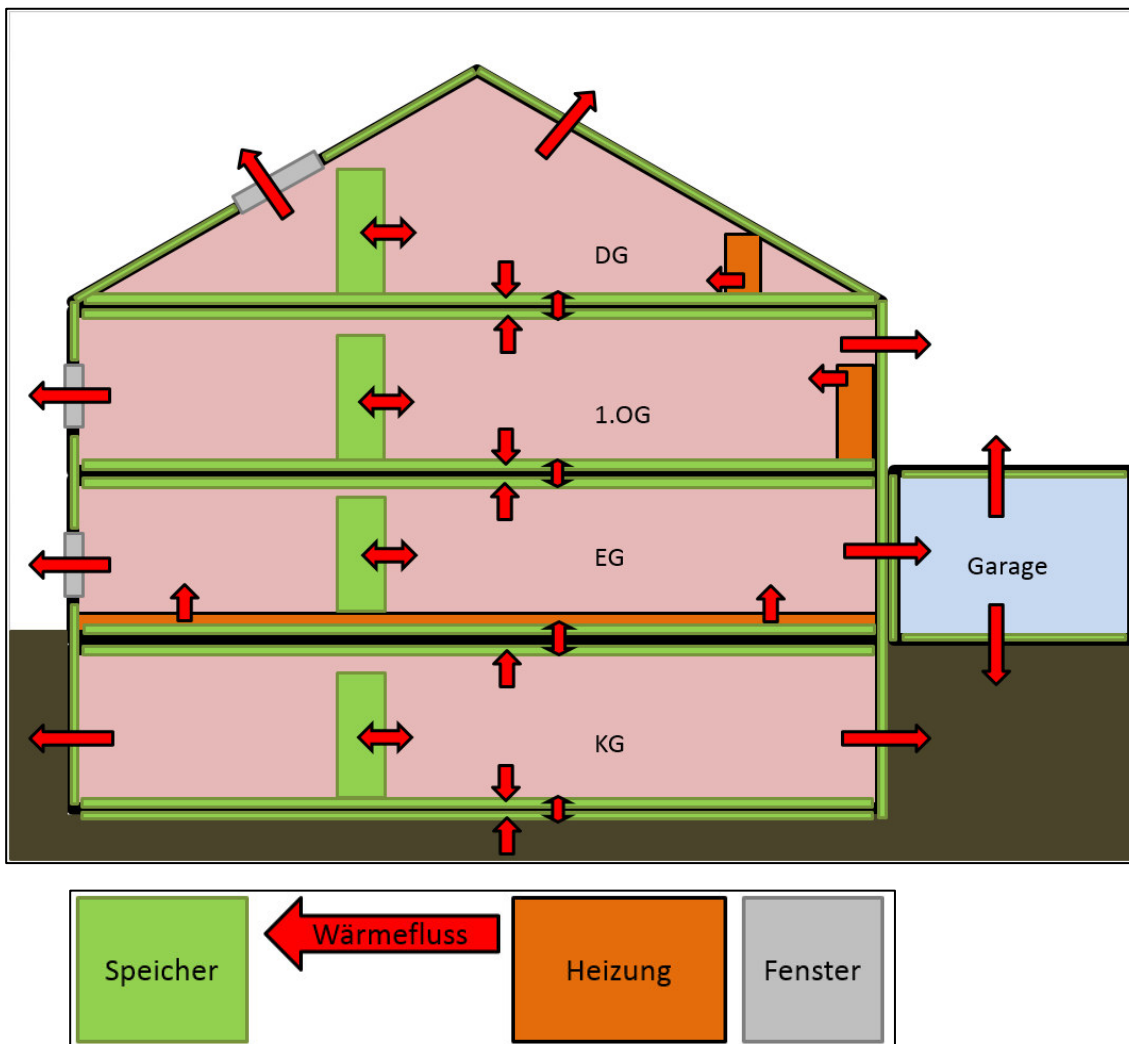


Abbildung 174: Thermisches Gebäudemodell der Doppelhaushälfte RH1 [46]

Modellaufbau

Durch das thermische Gebäudemodell wird die Doppelhaushälfte RH1 detailliert bauphysikalisch beschrieben. Wie Abbildung 174 entnommen werden kann, wird jede Etage des Gebäudes als eigene thermische Zone modelliert: Kellergeschoss (KG), Erdgeschoss (EG), 1. Obergeschoss (1. OG) und Dachgeschoss (DG). Innerhalb einer Zone wird eine homogene Temperaturverteilung angenommen. Somit wird beispielsweise allen Räumen der Zone die

durchschnittliche Raumlufthtemperatur dieser Zone zugeordnet. Auf diese Weise kann jede thermische Zone durch fünf charakteristische Temperaturen beschrieben werden:

- ↳ Temperatur der Raumlufth,
- ↳ Temperatur der Innenwände (inkl. Einrichtungsgegenstände),
- ↳ Temperatur der Außenwände,
- ↳ Temperatur der Decke und
- ↳ Temperatur des Bodens.

Die Raumlufth einer Zone steht somit mit den vier Wärmespeichern der jeweiligen Zone in direktem Kontakt – Innenwände, Außenwände, Decke und Boden – sodass ein dynamisches Gleichgewicht entsteht. Je nach Temperaturdifferenz zwischen der Raumlufth und dem jeweiligen Speicher fließen somit zu jedem Zeitpunkt vier Wärmeströme mit unterschiedlichem Betrag und Vorzeichen in die Raumlufth hinein bzw. aus der Raumlufth heraus. Hinzu kommt in jeder Zone ein Wärmestrom aus der Heizung. In der Doppelhaushälfte sind folgende Heizungen vorhanden, die auch im Gebäudemodell abgebildet sind (siehe Abbildung 174):

- ↳ eine Fußbodenheizung im EG und
- ↳ Heizkörper im 1. OG, DG sowie KG.

Die Temperatur der Raumlufth und der Speicher (Innenwände, Außenwände, Decke, Boden) ändert sich entsprechend zu den Wärmeströmen, die in sie hinein- oder herausfließen. Des Weiteren sind die Zonen über die Decke bzw. den Boden thermisch an die benachbarte Zone gekoppelt.

Das thermische Gebäudemodell wurde in Matlab / Simulink erstellt und mit Hilfe der Messdaten validiert, die im Projekt erhoben wurden. Die Details der Modellierung und der Modellvalidierung können aus [47] entnommen werden.

Simulationen und Ergebnisse

Mit Hilfe der Simulationen soll die Frage beantwortet werden, wie sich das Speichern größerer Wärmemengen in der Gebäudesubstanz auf die Temperaturen im Gebäude auswirkt. Die zwischengespeicherte Wärmemenge soll dabei eine Größenordnung erreichen, die für ein Energiemanagement im Gebäude relevant ist, um den Übergang von einer wärmegeführten BHKW-Betriebsweise zu einer stromorientierten Betriebsweise zu erleichtern.

Als Zeitraum für die Simulationen wurden zwei Wintertagen ausgewählt, an denen ein großer Heizenergiebedarf bestand. Die Simulationen erstrecken sich über 48 Stunden vom 24.02.2015 um 00:00 Uhr bis zum 25.02.2015 um 24:00 Uhr.

Ausgehend von den mit den Wärmemengenzählern gemessenen Wärmemengen, die sich in durchschnittliche Heizleistungen umrechnen lassen, wurden zunächst die Temperaturverläufe im Gebäude simuliert. Diese werden in den folgenden Abbildungen als „original“ bezeichnet. In jeder thermischen Zone wird der Verlauf von fünf Temperaturen berechnet: Raumlufth, Innenwand, Außenwand, Decke und Boden. Im Zuge der Modellvalidierung wurden die simulierten Raumlufthtemperaturen wiederholt mit den gemessenen Raumlufthtemperaturen abgeglichen. Die Parameter des Modells wurden dabei solange optimiert, bis die simulierten Raumlufthtemperaturen sehr gut mit den gemessenen übereinstimmten. Das optimierte Modell

wurde anschließend genutzt, um die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes zu untersuchen. Dazu wurde das folgende sehr einfache Szenario entworfen:

1. Am 24.02.2015 wurde die gemessene (originale) Heizleistung während des gesamten Tages um 1 kW erhöht, sodass eine zusätzliche Wärmemenge von 24 kWh in das Gebäude eingebracht wurde.
2. Am 25.02.2015 wurden dagegen 24 kWh weniger Wärmeenergie in das Gebäude eingebracht als im Original. Dazu wurde die an diesem Tag gemessene (originale) Heizleistung um 1 kW verringert. Um negative Heizleistungen während der Nachtabsenkung zu vermeiden, wurde in diesen Stunden eine „Heizleistung“ von 0 W beibehalten. Im Gegenzug wurde in der Simulation die Heizleistung tagsüber in einigen Stunden um 2 kW gegenüber der Original-Heizleistung abgesenkt, um die Reduktion von 24 kWh innerhalb der 24 Stunden des 25.02.2015 zu gewährleisten.

Über beide Tage hinweg wurde das Gebäude in der Summe somit mit der gleichen Heizenergie versorgt wie im Original.

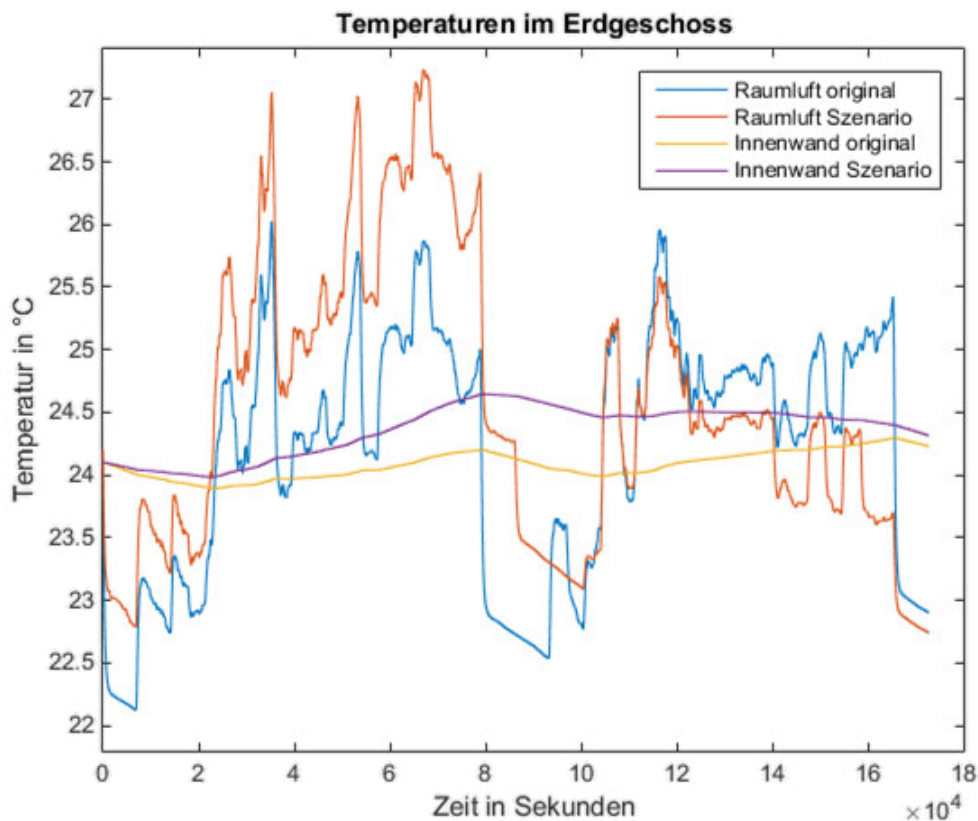


Abbildung 175: Simulierte Raumlufth- und Innenwand-Temperaturen im Erdgeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015

Im Erdgeschoss sind am 24.02.2015 im Szenario wegen der erhöhten Heizleistung folgende Veränderungen gegenüber dem Originalzustand zu beobachten (siehe Abbildung 175):

- ⌚ In den Nachtstunden (bis ca. 20.000 Sekunden) liegt die Raumlufthtemperatur um ca. 0,5 °C höher,
- ⌚ bis zum Mittag (ca. 43.000 Sekunden) wächst diese Differenz bis auf ca. 1 °C an und
- ⌚ erreicht abends (ca. 70.000 Sekunden) eine Temperaturdifferenz von 1,2 bis 1,4 °C.

Im Bereich der Nachtabsenkung in den ersten Stunden des 25.02.2015 (ca. 88.000 bis 92.000 Sek.), in denen weder im Original noch im Szenario geheizt wird, ist die Raumluft im Szenario um ca. 0,75 °C wärmer. Dies resultiert aus der Nachwärme der Fußbodenheizung und durch die zwischenzeitlich erwärmten Wände und Decke im Erdgeschoss. Die Innenwände sind zur Zeit des Tageswechsels, bis zu der das Gebäude im Szenario mit zusätzlichen 24 kWh Wärmeenergie beheizt wurde, um ca. 0,5 °C wärmer als im Original. Die Außenwände sind zu diesem Zeitpunkt ebenfalls um 0,5 bis 0,6 °C wärmer (siehe Abbildung 176).

In den Morgenstunden des zweiten Tages (ca. 100.000 bis 110.000 Sek.) sind die Raumlufttemperaturen in beiden Fällen gleich. In dieser Zeit gleichen die noch erwärmten Speicher offenbar die reduzierte Heizleistung des zweiten Tages aus. Ab den späten Vormittagsstunden fällt die Raumlufttemperatur aufgrund der nun verminderten Heizleistung immer weiter unter die Raumlufttemperatur des Originals und ist in den Abendstunden (ca. 160.000 Sek.) etwa 0,7 °C kühler.

In der letzten Stunde des zweiten Tages, in der weder im Original noch im Szenario geheizt wird, ist die Raumlufttemperatur im Szenario um ca. 0,2 °C kühler als im Original. Dies könnte auf einen, wenn auch sehr geringen, Energieverlust gegenüber dem Original hindeuten. Vermutlich hat sich der Boden im Erdgeschoss (Fußbodenheizung) am Ende des zweiten Tages gegenüber dem Original deutlich abgekühlt, da an diesem Tag deutlich weniger geheizt wurde. Die Temperatur der Außenwände befindet sich im Erdgeschoss dagegen genau auf dem Niveau des Originals (siehe Abbildung 176) während die Innenwände am Ende des zweiten Tages sogar geringfügig wärmer sind (siehe Abbildung 175).

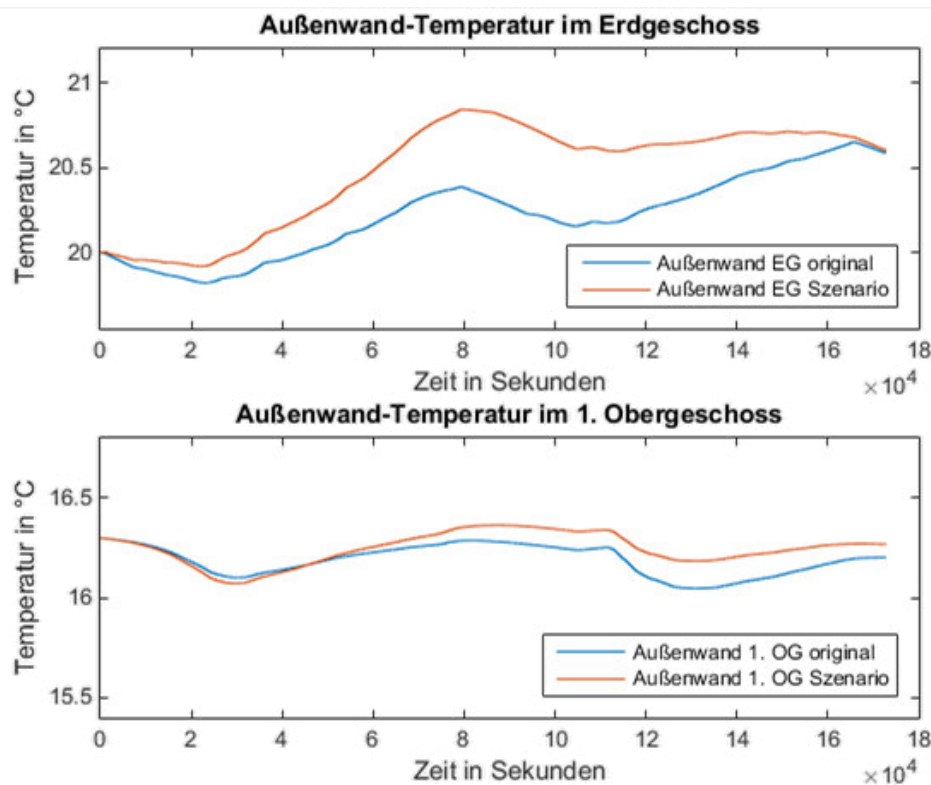


Abbildung 176: Simulierte Außenwand-Temperaturen im Erdgeschoss und 1. Obergeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015

Die Raumlufttemperaturen sind im Szenario am Ende des zweiten Tages in allen vier Etagen (Zonen) geringer als im Original, was auf einen Energieverlust im Vergleich zum Original hindeutet. Ein erhöhter Wärmeverlust in Form höherer Transmissionswärmeverluste ist erwartet worden, da die Raumluft in allen vier Etagen im Durchschnitt beider Tage auf einem höheren Temperaturniveau als im Original gehalten wurde (siehe Abbildung 175, Abbildung 177 und Abbildung 178). Auf Grund der (im Durchschnitt) wärmeren Raumluft weisen auch die Außenwände über beide Tage hinweg eine höhere Durchschnittstemperatur auf (siehe Abbildung 176), die ebenfalls zu höheren Transmissionswärmeverlusten führt.

Die Innenwände des 1. OG sind – auf Grund der im Durchschnitt höheren Raumlufttemperaturen des 1.OG – am Ende des zweiten Tages wärmer als im Original (siehe Abbildung 177) und verhalten sich somit ebenso wie die Innenwände des Erdgeschosses (siehe Abbildung 175).

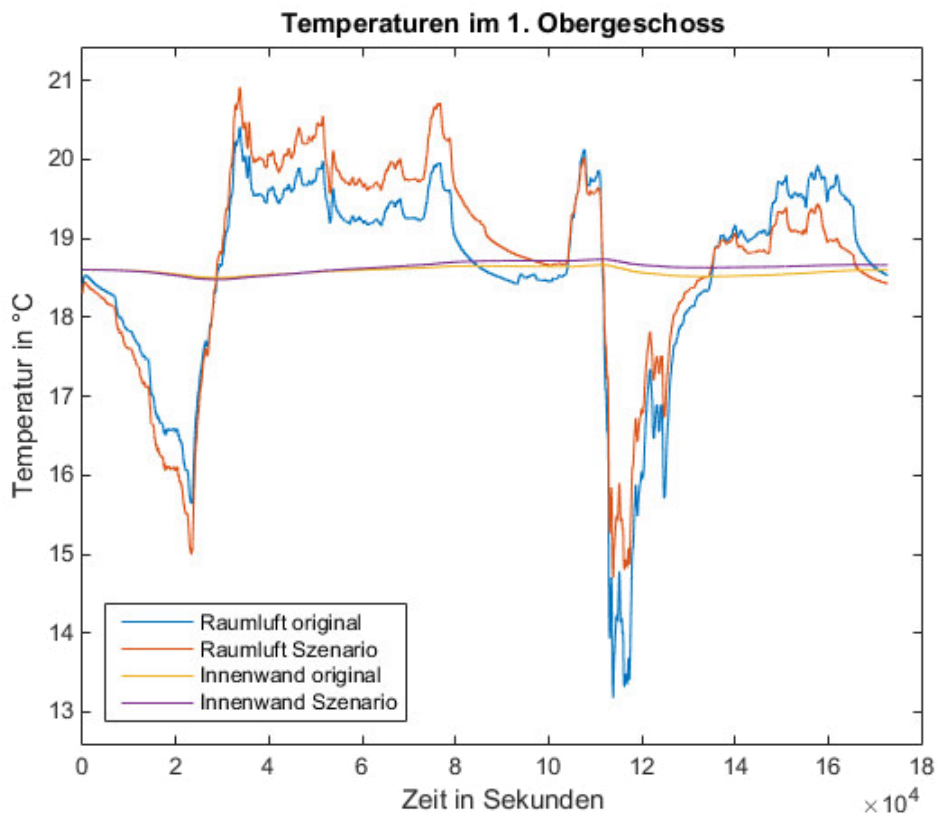


Abbildung 177: Simulierte Raumluft- und Innenwand-Temperaturen im 1. Obergeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015

Fazit

Die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudesubstanz der untersuchten Doppelhaushälfte RH1, die in Bezug auf Größe und Bausubstanz mit den anderen Doppelhaushälften unter den Referenzgebäuden sowie dem Einfamilienhaus vergleichbar ist, kann wie folgt bewertet werden:

Eine Wärmemenge von 24 kWh, die ungefähr der nutzbaren Wärmekapazität des installierten 750 l-Pufferspeichers entspricht, kann problemlos innerhalb eines Tages in der Gebäudesubstanz gespeichert werden. Wenn das Einspeichern sehr langsam erfolgt (1 kWh/h) treten nur geringe Temperaturänderungen im Gebäude auf, die den Wohnkomfort der Bewohner kaum beeinflussen.

Die Simulationen haben ergeben, dass bei dieser Speicherrate im Erdgeschoss mit einer Raumtemperaturerhöhung von durchschnittlich ca. 1 °C zu rechnen ist, die maximale Temperaturerhöhung beträgt 1,4 °C in den Abendstunden. Während der anschließenden Nachtabsenkung, bei der keine Wärme mehr eingespeichert wird, beträgt die Temperaturerhöhung der Raumluft im Erdgeschoss noch ca. 0,75 °C gegenüber dem Ausgangszustand.

Die gesamte Wärmemenge von 24 kWh ist zu dieser Zeit in den Wänden (inkl. Einrichtungsgegenständen) und Geschossdecken des Gebäudes gespeichert. Während sich die Innen- und Außenwände im Erdgeschoss durch die gespeicherte Wärme um ca. 0,5 °C erwärmen, wurde für die Innenwände im 1. OG lediglich ein marginaler Temperaturanstieg von 0,1 °C ermittelt.

Beim langsamen Ausspeichern der Wärme am Folgetag mit ebenfalls durchschnittlich 1 kWh/h zeigt sich, dass die Raumlufttemperaturen in den Morgenstunden genau denen des Originalzustands (keine Wärmespeicherung im Gebäude) entsprechen. In diesen Stunden, in denen noch ca. 15 bis 18 kWh Wärmeenergie in der Gebäudesubstanz gespeichert sind, ist die Wärmespeicherung für die Bewohner nicht spürbar.

Am Ausspeichertag liegt die Raumlufttemperatur im Erdgeschoss um maximal 0,7 °C unter der Temperatur, die ohne zwischenzeitliche Wärmespeicherung ermittelt wurde. Die maximale Temperaturabsenkung tritt in den Abendstunden des Ausspeichertages auf und dürfte unterhalb der Wahrnehmungsschwelle der Bewohner liegen.

Im 1. OG liegen die Temperaturabweichungen der Raumluft über beide Tage hinweg deutlich unter 1 °C und dürften somit nicht von den Bewohnern bemerkt werden. Im Dachgeschoss wurden mit bis zu 2,2 °C die größten Temperaturabweichungen ermittelt, die auf die Wärmespeicherung im Gebäude zurückzuführen sind.

Im untersuchten Szenario – langsames Einspeichern der Wärme im Laufe eines Tages und langsames Ausspeichern am darauffolgenden Tag – werden im Gebäude höhere Durchschnittstemperaturen erreicht als im Originalzustand. Die höheren Raumlufttemperaturen und die geringfügig wärmeren Außenwände führen zu geringfügig höheren Transmissionswärmeverlusten an die Umgebung. Die Innenflächen des Gebäudes (Innenwände und Geschossdecken zwischen zwei beheizten Zonen) stellen demgegenüber jedoch verlustfreie Wärmespeicher dar.

Prinzipiell kann die Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudesubstanz sehr vorteilhaft in ein Gebäude-Energiemanagement einbezogen werden. Selbst wenn die Bewohner lediglich Temperaturänderungen von ca. 1 °C tolerieren würden, lassen sich in einer typischen Doppelhaushälfte bereits verhältnismäßig große Wärmemengen zwischenspeichern. Voraussetzung dafür sind jedoch hinreichend kleine Ein- und Ausspeicherungsrate in der Größenordnung von 1 kWh/h. Somit ist das Ausnutzen der Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes insbesondere im Zusammenspiel mit einem Pufferspeicher sehr vielversprechend, da dieser alle größeren und kurzfristigeren Schwankungen von Wärmeerzeugung und -abnahme ausgleichen kann.

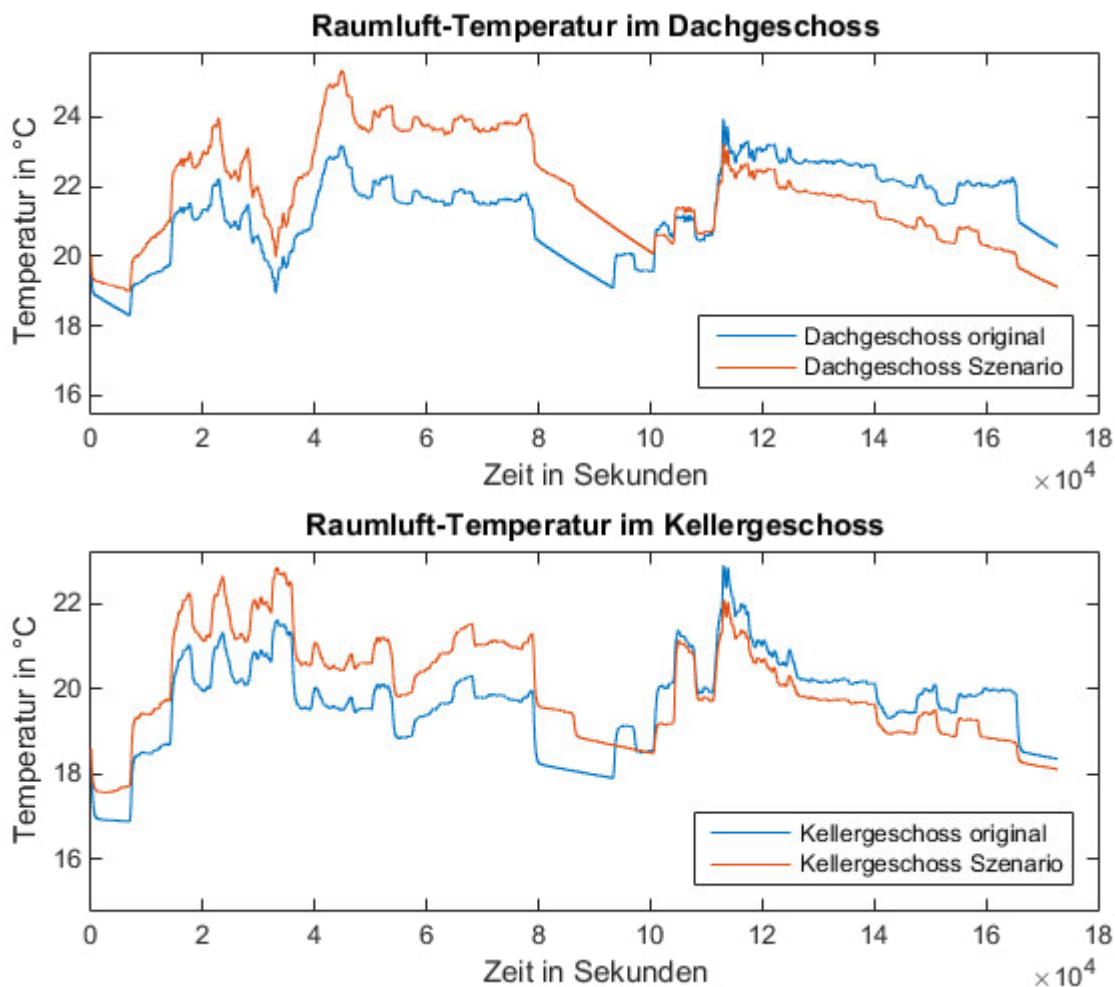


Abbildung 178: Simulierte Raumluft-Temperaturen im Dach- und Kellergeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015

3.5.4 Einsatz eines Home-Automation-Systems

3.5.4.1 Beschreibung des eingesetzten Home-Automation-Systems

An der HRW wurde ein eigenes Home-Automation-System entwickelt, mit welchem die im Projektantrag erwähnte zeitgesteuerte Einzelraum-Temperaturregelung anwenderfreundlich umgesetzt werden kann. Es versetzt die Bewohner in die Lage, für jeden entsprechend ausgestatteten Raum ein individuelles Tages- und Wochen-Temperaturprofil vorzugeben.

Das System enthält eine grafische Benutzeroberfläche, die die Bewohner unterstützen soll, ihr Lüftungs- und Heizverhalten zu optimieren. Es wird dabei das Ziel verfolgt sowohl die Raumluftqualität (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und CO₂-Gehalt) zu verbessern als auch eine Senkung des Energieverbrauchs zu erzielen.

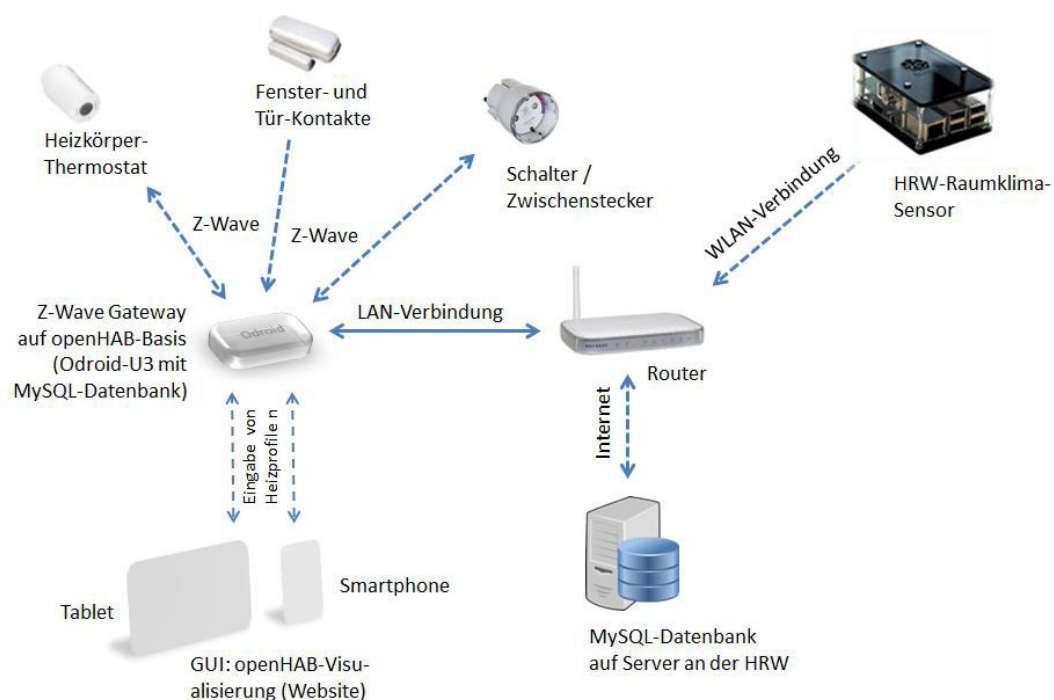


Abbildung 179: Komponenten und Kommunikationswege des an der HRW entwickelten Home-Automation-Systems auf Basis von openHAB

Die wesentlichen Komponenten des Home-Automation-Systems und deren Kommunikationswege sind in Abbildung 179 dargestellt:

- 🔥 Raumklima-Sensor (Selbstentwicklung HRW)
- 🔥 Heizkörper-Thermostate
- 🔥 Fenster- und Türkontakte
- 🔥 Schalter / Zwischenstecker
- 🔥 Z-Wave Gateway (Odroid-U3 mit Z-Wave Stick)
- 🔥 Router (Eigentum der Bewohner)
- 🔥 Datenbank auf Webserver
- 🔥 openHAB-Visualisierung (Website)

Die genutzte Plattform ist openHAB (open Home Automation Bus), eine in Java entwickelte quelloffene Softwarelösung, die die Komponenten des Home-Automations-Systems hersteller- und protokollneutral miteinander verbindet. Über die Frequenz 868,42 MHz, welche für die Kommunikation von Home-Automation-Geräten reserviert ist, kommunizieren die Fensterkontakte, Heizungsthermostate und Schalter mit dem zentralen Z-Wave Gateway (einem Odroid-Rechner mit Z-Wave-Stick).

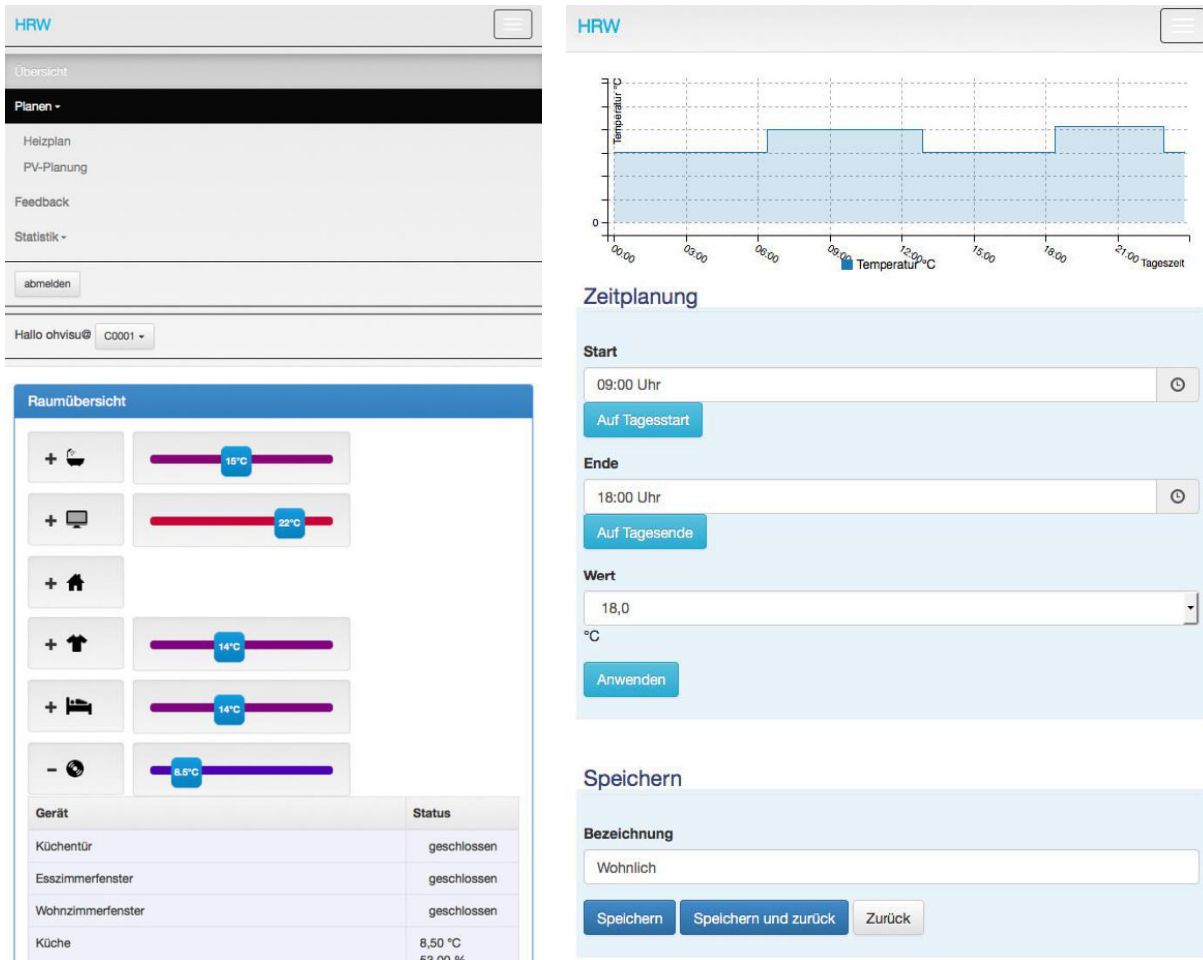


Abbildung 180: Screenshots der openHAB-Visualisierung: Schieberegler zur Veränderung der Soll-Temperatur (links) und Tages-Heizprofil für einen Raum (rechts)

Im jetzigen Entwicklungsstadium bietet das Projekt eine rudimentäre Benutzeroberfläche in Form einer Website (Abbildung 180), die auf der openHAB-Plattform aufbaut. Dabei handelt es sich um eine eigene Entwicklung der HRW, die folgende Basisfunktionen enthält:

- 🔗 Erstellung verschiedener Heizprofile (Wochentag, Uhrzeit, Temperatur)
- 🔗 Kopplung der Heizprofile an die ausgestatteten Räume
- 🔗 Veränderung der Soll-Temperatur der Thermostate anhand von Schiebereglern
- 🔗 Übersicht der aktuell am jeweiligen Thermostat eingestellten Temperatur
- 🔗 Übersicht über den Batteriezustand der Thermostate und Fensterkontakte

Die Vernetzung von Sensorik und Aktorik ermöglicht es, eine verhaltensabhängige Routine vorzugeben. So wurde beispielsweise der Zustand des Fenstersensors mit dem Heizungsthermostat gekoppelt: sobald ein Fensterkontakt den Zustand „offen“ meldet, werden die in diesem Raum befindlichen Heizungsthermostate auf die minimale Temperatur geregelt und somit das Heizen unterbrochen. Dadurch werden unnötige Heizenergieverluste während der Fensterlüftung verhindert.

Technische Umsetzung

Zur Umsetzung dieser Funktionalitäten wurde HRW-seitig eine Plattform aufgesetzt, die diese Regelung übernimmt. Die Plattform bietet als Basis eine PostgreSQL-Datenbank, in der sowohl die Nutzerdaten und -konfigurationen als auch die Messdaten persistent gespeichert werden. Darauf aufbauend wurde ein Java-Webprojekt aufgesetzt, das den kompletten Punkt der Nutzerverwaltung und -konfiguration sowie die Steuerung der Komponenten übernimmt.

Die Kommunikation zwischen openHAB und der HRW-Entwicklung wird über eine REST-API erreicht, die einen standardisierten Datenaustausch ermöglicht. Durch die Umsetzung in Java wird eine Plattform-Unabhängigkeit erreicht, sodass die Software auf jeder Plattform eingesetzt werden kann, die eine JRE bereitstellt. Neben üblichen Windows-, Linux- und Mac-Rechnern ist dies vor allem auch auf kostengünstigen ARM-basierten Embedded-Systemen möglich. So kann die entwickelte Software einfach und praktisch ohne Anpassungsaufwand übertragen werden.

3.5.4.2 Auswertung der Ergebnisse

Das an der HRW entworfene Home-Automation-System wurde seit dem 15.10.2015 in insgesamt sieben Wohnungen in den Referenzgebäuden installiert. Es ermöglicht eine Einzelraum-Temperaturregelung und wird durch regelmäßige Updates stetig in seiner Funktionalität verbessert. Die kontinuierliche Weiterentwicklung des Home-Automation-Systems und seiner Handhabung erfolgt dabei sowohl aus einem entwicklungstechnischen Antrieb der HRW heraus als auch auf Anregung der Bewohner.

In Abbildung 181 werden exemplarisch für ein Wohnzimmer das für diesen Raum vorgegebene Heizprofil und die tatsächlich gemessene Raumtemperatur gegenübergestellt. Hierbei ist anzumerken, dass die vom HRW-Raumklima-Sensor gemessene Temperatur zunächst um einen Temperatur-Offset korrigiert wurde, der durch die Abwärme des im Sensor verbauten Einplatinencomputers verursacht wird.

Das Home-Automation-System ist so programmiert, dass die Soll-Temperatur im Heizprofil eines Raums automatisch auf einen Wert $< 15\text{ °C}$ gestellt wird, sobald ein Fenster in diesem Raum geöffnet wird. In dem betrachteten Wohnzimmer war dies am 22.11.2015, dem exemplarisch dargestellten Tag, nur einmal der Fall (siehe Abbildung 181).

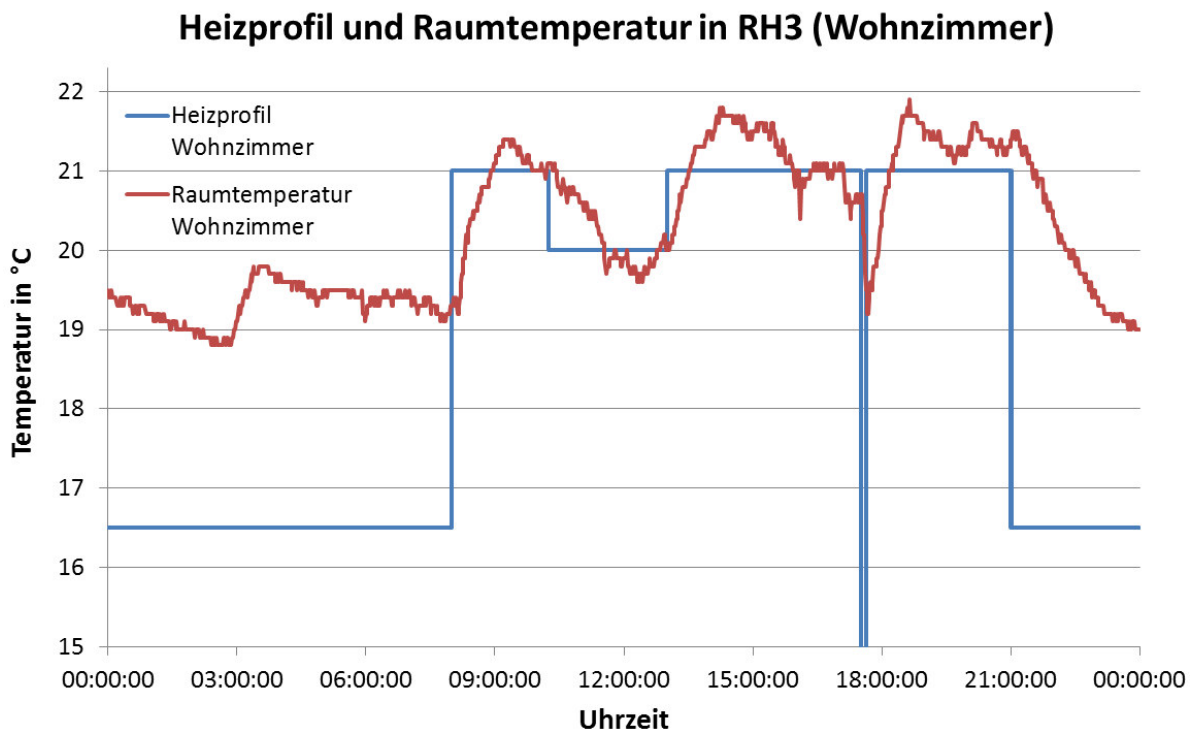


Abbildung 181: Vorgegebenes Heizprofil und gemessene Raumtemperatur im Wohnzimmer von RH3 am 22.11.2015

3.5.4.3 Energiemanagement und stromorientierter Betrieb

In diesem Kapitel werden die Vorteile und Potenziale aufgezeigt, die in einem stromorientierten BHKW-Betrieb liegen. Es wird auch auf die spezifischen Herausforderungen eingegangen, die mit dieser Betriebsweise einerseits für die verschiedenen BHKW-Typen und andererseits für unterschiedliche Gebäudekategorien verbunden sind.

Die größte Motivation, KWK-Anlagen auf einen stromorientierten Betrieb umzustellen und sie in ein Gebäude-Energiemanagement einzubinden, ist die dadurch erzielbare Erhöhung der Wirtschaftlichkeit. In dieses Energiemanagement können zukünftig auch Elektrofahrzeuge eingebunden werden, was die Auslastung der Mikro-KWK-Anlagen und deren Wirtschaftlichkeit weiter erhöht. Des Weiteren können mehrere stromorientiert betriebene BHKW zu einem virtuellen Kraftwerk zusammengeschaltet werden. Auf diese Weise kann eine Vielzahl von BHKW als „Schwarm-Kraftwerk“ Systemdienstleistungen erbringen:

- 🔗 die Bereitstellung von Regelenergie zur Frequenzhaltung im Stromnetz und
- 🔗 die Bereitstellung von Blindleistung zur statischen Spannungserhaltung.

Darüber hinaus kann ein Pool von stromorientiert betriebenen Mikro-KWK-Anlagen (virtuelles Kraftwerk) eine gewisse flexible Kapazität bereithalten, um einen Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Einspeisung aus erneuerbaren Energien zu leisten und somit zur Versorgungssicherheit beizutragen. Dieser Ausgleich könnte über Strompreissignale gesteuert werden, sodass in Zeiten von Stromknappheit und entsprechend hohen Spotmarkt-Preisen besonders viele BHKW ins Stromnetz einspeisen und umgekehrt.

Merkmale der stromorientierten Betriebsweise

Unter dem Begriff „stromorientierte Betriebsweise“ wird eine Kombination aus der klassischen wärmegeführten Betriebsweise und einem (rein) stromgeführten BHKW-Betrieb verstanden. Vereinfacht ausgedrückt wird das Prinzip „so viel Stromführung wie möglich und so viel Wärmeleitung wie nötig“ verfolgt. Es handelt sich also um einen möglichst stromgeführten Betrieb, der zusammen mit dem Pufferspeicher und dem Zusatzheizgerät aber jederzeit dafür sorgt, dass der Wärmebedarf des Gebäudes gedeckt wird.

Während das BHKW im rein wärmegeführten bzw. rein stromgeführten Betrieb ausschließlich über die entsprechenden Temperatur-/Wärmegrößen bzw. Stromgrößen gesteuert wird, beruht die Steuerung im stromorientierten Betrieb sowohl auf Temperatur-/Wärmegrößen als auch auf Stromgrößen. Im einfachsten Fall erfolgt die BHKW-Regelung im stromorientierten Betrieb auf Grundlage der folgenden beiden Größen:

- ⌚ Pufferspeichertemperatur (als Maß für den Ladezustand des Wärmespeichers) und
- ⌚ Gebäudestrombedarf (realisierbarer Strom-Eigenverbrauch)

Bei der Optimierung des stromorientierten BHKW-Betriebs werden folgende Ziele angestrebt:

- ⌚ Erhöhung des Strom-Eigenverbrauchs durch Verschiebung des BHKW-Betriebs in die Zeiten, in denen der Gebäudestrombedarf im Durchschnitt am höchsten ist
- ⌚ Erhöhung des Strom-Eigenverbrauchs und Reduzierung der BHKW-Starts durch Leistungsmodulation, falls technisch möglich (ecoPower 4.7)

3.5.5 Einsatzbereiche für elektrische und thermische Speicher

Wie in Kapitel 3.3.6 aufgezeigt stellt der Stromeigennutzungsanteil eine essentielle Einflussgröße zur Beschreibung der Betriebswirtschaftlichkeit von KWK-Systemen dar. Auf der einen Seite können hierzu prädiktive und/oder stromorientierte Betriebsweisen für KWK-Systeme umgesetzt werden. Ferner kann durch eine regelungstechnisch-integrierte Installation eines Home-Automation-Systems (vgl. Kapitel 3.5.4) eine Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils erreicht werden. Bei der Installation von Home-Automation-Systemen erfolgt jedoch ein Eingriff in das Endnutzerverhalten. Es ist derzeit noch nicht absehbar, wie der langfristige, Endkunden-abhängige Erfolg sowie die Akzeptanz von Home-Automation-Systemen ist. Auf der anderen Seite besteht die Möglichkeit – ähnlich wie es bei der Photovoltaik bereits in vergleichsweise hohen Stückzahlen realisiert wurde – den Stromeigennutzungsanteil durch die Integration von elektrischen Speichern zu realisieren. Dieser Weg hat im Vergleich zu den Home-Automation-Systemen den großen Vorteil, dass der Endkunde keine Beeinträchtigung seines Verhaltens erfährt.

Die Analyse der Optimierungsmöglichkeiten durch Stromspeicher erfolgt neben der zeitdifferenzierten Betrachtung in einem multivariaten Ansatz. Hierzu wird ein – auf die Simulationsgeschwindigkeit optimierte – Berechnungsprogramm genutzt, welches in einer MATLAB© Simulink© Umgebung arbeitet. Um ein Verständnis der einhergehenden Reduktionen der Genauigkeiten zu erlangen, sind nachfolgend die zugrunde gelegten Annahmen und Grundlagen aufgezeigt.

Die Jahresenergiebedarfsverteilung erfolgt in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute in einer Differenzierung nach den Nutzenergieformen „Warmwasser, Heizwärme und Strom“ in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4655 [48]. Bei den KWK-Systemen sind die relevanten technischen Parameter technologieabhängig integriert. Hierbei werden beispielweise Anfahrvorgänge sowie Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade berücksichtigt. Die Leistung der KWK-Systeme ist flexibel dimensionierbar, sodass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf unterschiedlichste Leistungen möglich ist. Durch eine automatisierte Dimensionierung des Zusatzheizgeräts in Abhängigkeit von der objektseitigen Heizlast wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erhöht. Der integrierte Wärmespeicher wird im Wesentlichen durch das Volumen sowie die nutzbare Temperaturdifferenz beschrieben. Hierbei ist ein Mindestenergieinhalt zur Sicherstellung von Warmwasserbedarfen vorgesehen. Der Stromspeicher wird technologisch durch einen Lithium-basierten stationären Batteriespeicher beschrieben. Die zentralen Kerngrößen zur Beschreiben stellen die maximale Be- und Entladeleistung, der nutzbare Arbeitsbereich sowie die Effekte des von der Energieflussrichtung unabhängigen Wechselrichters dar. Wie im einleitenden Teil aufgezeigt erfolgt eine Bewertung der Optimierungsmöglichkeiten unter der Annahme einer konventionellen, wärmegeführten KWK-Betriebsweise.

Die Simulationsergebnisse beziehen sich auf das witterungsvorgebende Jahr 2006, da dieses dem langjährigen Mittel sehr nahe kommt. Zur Berücksichtigung der thermischen Trägheit der Gebäudehülle wird ein sieben Tage überspannender Gauß'scher Glättungsfaktor von 0,5 angesetzt. Düsseldorf wird als Referenzstandort für die Wetterdaten zugrunde gelegt, da die Landeshauptstadt den direkt Bezug zum Bundesland Nordrhein-Westfalen darstellt.

Die Ergebnisse sind in einen zeitlich differenzierten sowie einen parametervariierenden kumulierten Teil untergliedert. Als Grundlage für alle nachfolgend dargestellten Ergebnisse wird ein kumulierter Wärmebedarf von 25.500 kWh/a angesetzt. Dieser entspricht einer Belegung von drei Bewohnern mit einem spezifischen Warmwasserbedarf von 500 kWh/(Person·a) in einem Objekt mit 120 m² und einer spezifischen Heizwärmebedarf von 200 kWh/(m²·a). Das KWK-System stellt ein interner Verbrennungsmotor mit 2,5 kW thermischer sowie 1,0 kW elektrischer Leistung dar. Der integrierte Wärmespeicher von 500 l bietet eine maximale Energiespeicherkapazität von umgerechnet 11,4 kWh. Die weiteren notwendigen Parameter zur Beschreibung des Gesamtsystems sind in den jeweiligen Teilanalyseschritten beschrieben.

3.5.5.1 Tagesverlaufsanalyse

Im Rahmen der transienten Analyse wird ein Systemverbund mit einem elektrischen Speicher mit einer Bruttokapazität von 1 kWh zugrunde gelegt. Der Strombedarf der drei Bewohner ist mit einem spezifischen Strombedarf von 1.379 kWh/(Person·a) integriert, was einem objektseitigen Jahresstrombedarf von 4.137 kWh entspricht. Die Objekt-Stromkennzahl liegt bei rund 0,16 und beschreibt das Verhältnis vom Jahresstrom- zum Jahreswärmebedarf des Objekts und abgeleitet von der KWK-Stromkennzahl als Verhältnis der entsprechenden KWK-Leistungen.

Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Systemregelung sind in Abbildung 182 im oberen Teil der relative Ladezustand des Wärmespeichers und im unteren Teil der thermische Objektbedarf sowie die thermische KWK-Leistung über einen exemplarischen Tag aufgetragen. Im Hinblick auf die Gesamtsimulation entspricht der gewählte Tag dem 27. Mai 2006 und wird durch einen bewölkten Arbeitstag während der Übergangszeit mit einer gemittelten Außentemperatur von 12,9 °C beschrieben.

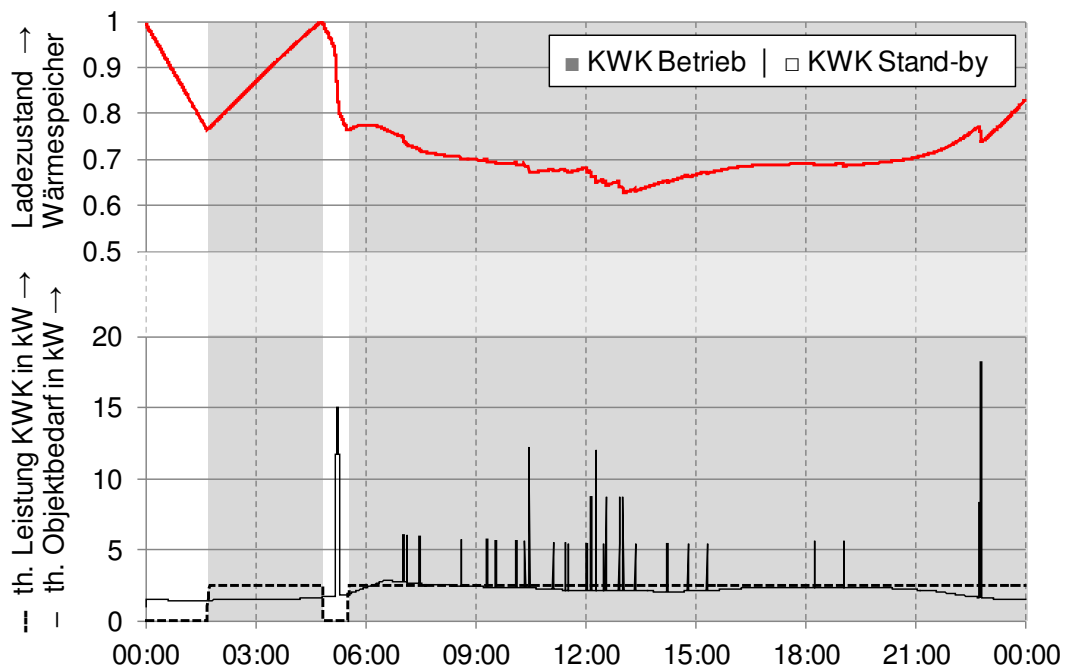


Abbildung 182: Exemplarischer Tagesverlauf: Untersuchung der thermischen Bilanzen

Die Wechselwirkung zwischen dem Objekt und den heizungstechnischen Teilsystemen kann ebenfalls aus Abbildung 182 abgeleitet werden. Der dargestellte Tag zeichnet sich durch einen Heizwärmebedarf aus, da die gemittelte Außentemperatur unter 15 °C und somit unterhalb der Heizgrenztemperatur liegt. Der integrierte Grundlastwärmebedarf berücksichtigt eine Nachtabsenkung des Heizungssystems. In den Morgenstunden wird die noch enthaltene Energie des Wärmespeichers verwendet, um den Wärmebedarf zu decken. Wenn der Speichladezustand unterhalb des KWK-Einschaltgrenzwerts fällt, startet das wärmegeführte KWK-System. Die thermische KWK-Leistung ist im Folgenden höher als der Objektbedarf, sodass eine Erhöhung des Ladezustands des thermischen Speichers folgt. Nachdem der maximale Ladezustand erreicht ist schaltet das KWK-System aus. Da der thermische Leistungsbedarf über den Tag steigt, schaltet sich das KWK-System erneut an. Die Grundlast der Heizwärme entspricht außerhalb der Morgen- und Nachtstunden nahezu der thermischen Leistung des KWK-Systems, sodass der Ladezustand nahezu konstant bleibt. Durch thermische Speicher-verluste sowie die Warmwasserbedarfsspitzen nimmt der Ladezustand des Wärmespeichers über den Tag langsam ab. Wenn am Nachmittag die thermische Leistungsnachfrage sinkt, nimmt der Ladezustand wieder stetig zu. Der Wärmespeicher stellt somit sicher, dass das KWK-System vergleichsweise kontinuierlich durch den Tag betrieben wird und gleicht bedarfsabhängige Lastspitzen aus. Im dargestellten Tag ist das Zusatzheizgerät nicht erforderlich um die Nachfrage zu decken. Auch in Zeiten, in denen der thermische Bedarf weitaus höher als die thermische Leistung des KWK-Systems ist, kann der Bedarf oftmals durch die Kombination aus Wärmespeicher und KWK-Anlage ohne das Zusatzheizgerät gedeckt werden. Neben der in Abbildung 182 dargestellten thermischen Seite ist in Abbildung 183 die elektrische Seite als zweites Kopplungsprodukt der KWK dargestellt. Im Gegensatz zur thermischen Seite ist der Einfluss des Stromspeichers ersichtlicher.

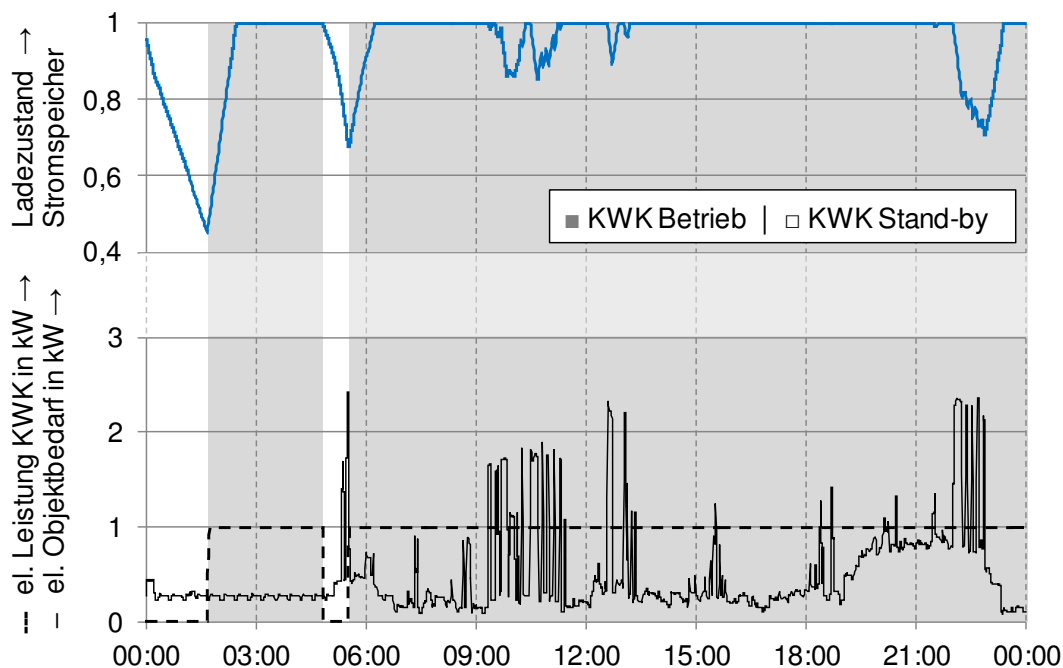


Abbildung 183: Exemplarischer Tagesverlauf: Untersuchung der elektrischen Bilanzen

Die Möglichkeiten und Grenzen für die Optimierung durch einen elektrischen Speicher im Rahmen einer wärmegeführten Betriebsstrategie können exemplarischen aus Abbildung 182 abgeleitet werden. Während des durchgängigen KWK-Betriebs erhöht sich der elektrische Speicherladezustand stetig. Im Hinblick auf die Bruttospeicherkapazität von 1 kWh und der elektrische Leistung des KWK-Systems von 1,0 kW kann die schnelle Zunahme der Ladungszustand erläutert werden. Da – je nach Uhrzeit – ein großer Teil der bereitgestellten elektrischen Leistung des KWK-Systems nicht direkt im Objekt genutzt werden kann, puffert der Stromspeicher die Einspeisung ab. In Zeiträumen, in denen der objektseitige elektrische Leistungsbedarf höher als die elektrische Leistung des KWK-Systems ist – auch in jenen Zeiträumen, in den das KWK-System nicht in Betrieb ist – erfolgt die Nutzung des KWK-Stroms aus dem Speicher, was zu einer Reduktion des Stromspeicherladezustands führt.

In Abbildung 184 sind der Netzbezug sowie die Stromeinspeisung für die Umsetzung ohne und mit einem Stromspeicher mit einer Bruttokapazität von 1 kWh übereinander aufgetragen. Ferner ist die Verschiebung der Energien durch den Stromspeicher gekennzeichnet.

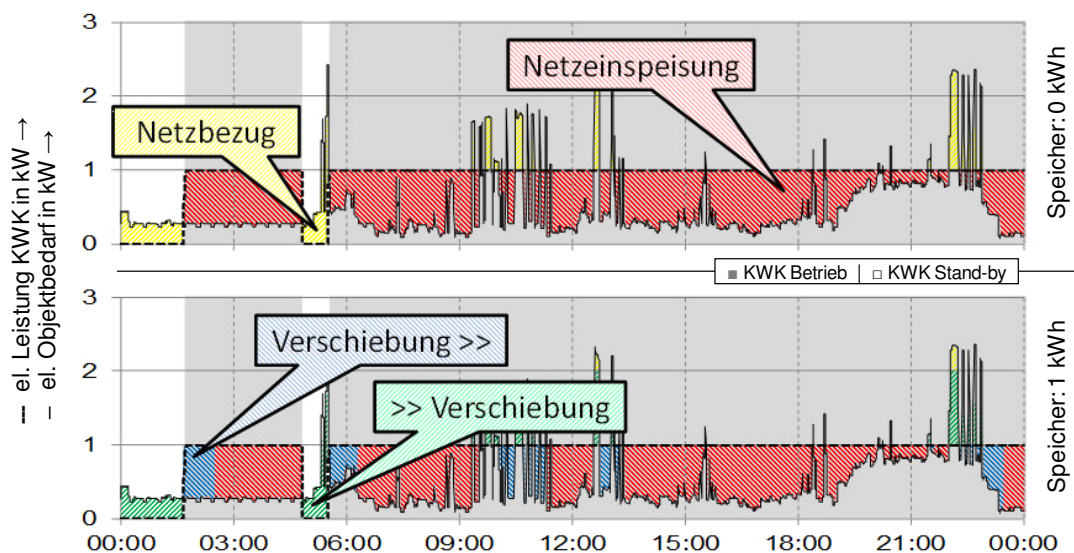


Abbildung 184: Exemplarischer Tagesverlauf: Energieverschiebung durch Stromspeicher

Ohne einen Stromspeicher wird in Zeiten, in denen das KWK-System in Stand-by ist, Strom aus dem Netz bezogen. Übersteigt die Strombereitstellung durch die KWK-Anlage den Objektbedarf, wird dieser Strom in das Netz eingespeist. Durch den Einsatz des Stromspeichers können Energiemengen verschoben werden. Die Verschiebung (blau >> grün) zeigt jenen Bereich auf, bei dem der Anteil an selbstgenutztem KWK-Strom erhöht wurde. Die Verschiebegrenzen sind direkt ersichtlich, da eine begrenzte Kapazität des Stromspeichers vorliegt.

Da die Bruttokapazität des Stromspeichers im dargestellten Fall der elektrischen Ausgangsleistung des KWK-Systems entspricht, kann – sofern kein Strombedarf bestünde – der KWK-Betrieb von rund einer Stunde zwischengespeichert werden. Sofern der Stromspeicher seinen maximalen Ladezustand erreicht hat, erfolgt die Einspeisung in das Stromnetz. Eine weitere Verschiebung von Leistungen und Lasten durch den Stromspeicher ist dann nicht mehr möglich. Gleiches gilt, sofern der Stromspeicher seine untere Ladungsgrenze erreicht hat, da dann keine weitere Nutzung des KWK-Stroms möglich und somit ein Netzbezug erforderlich ist.

Um Strom innerhalb von kurzen Zeiträumen innerhalb eines Tages zu verschieben, reicht die gewählte Speicherkapazität jedoch aus. Eine indirekte Grenze des Einsatzes von elektrischen Speichern wird durch die Eigenschaften und Kenndaten des Objekts sowie des KWK-Systems vorgegeben. Sofern der elektrische Tagesenergiebedarf mit der Tagesbereitstellung des KWK-Systems grob übereinstimmt, ist eine Verschiebung der Energien zur Glättung der volatilen Tagesbedarfe möglich. Andernfalls wäre eine langfristige Verschiebung über einen Tag hinaus erforderlich. Inwieweit dies sinnvoll wäre wird im Rahmen der Jahresverlaufsanalyse untersucht und bewertet.

3.5.5.2 Jahresverlaufsanalyse

Zur Bewertung des tagesübergreifenden Systemverhaltens ist in Abbildung 185 der zugrunde gelegte tagesmittlere Außentemperaturverlauf aufgetragen. Zeiträume mit Temperaturen über 15 °C befinden sich außerhalb der Heizperiode, sodass kein Heizwärmebedarf vorliegt. Der Jahresheizwärmebedarf wird somit auf die Übergangs- und Winterzeiten verteilt und ist dort als direkt abhängig von der Außentemperatur integriert.

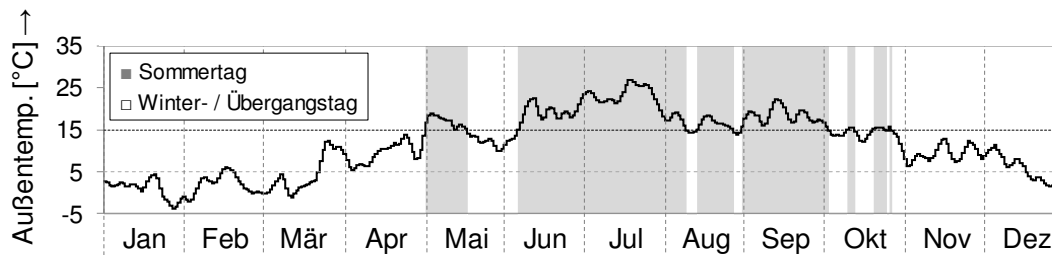


Abbildung 185: Jahresverlaufsanalyse: Tagesmittlerer Außentemperaturverlauf

Zur besseren Veranschaulichung des Einflusses des Wärmebedarfs auf den KWK-Betrieb sind jene Zeiträume, in denen kein Heizwärmebedarf vorliegt, in den Diagrammen der Jahresanalyse grau hinterlegt dargestellt. Der Jahresverlauf der Ladezustände der thermischen und elektrischen Speicher ist in Abbildung 186 dargestellt. Da die Zustandsänderungen innerhalb der Tage zu einer nicht auswertbaren Darstellung führen würden, sind die arithmetisch gemittelten Tageszustände aufgetragen.

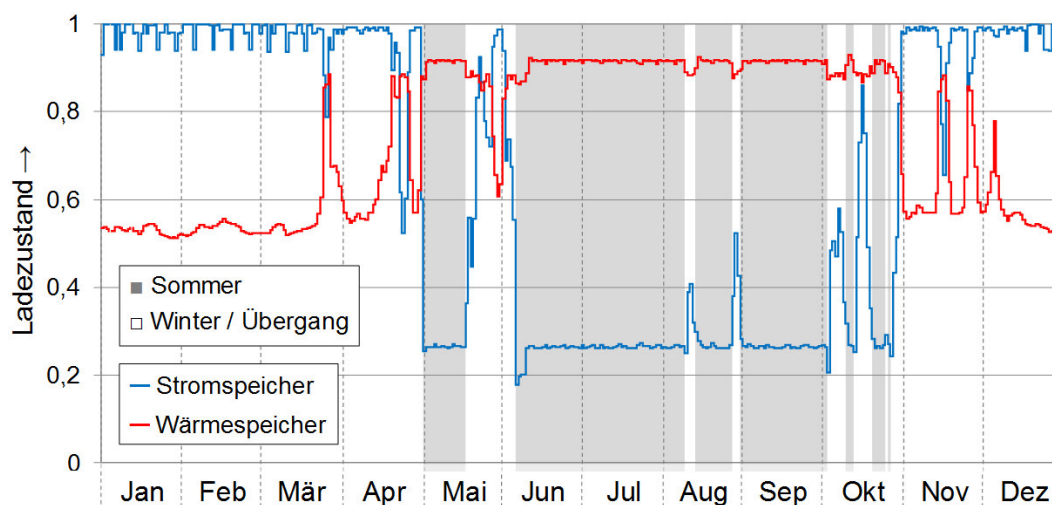


Abbildung 186: Jahresverlaufsanalyse: Tagesmittlere Strom- und Wärmespeicherladezustände

Die zugrunde gelegte wärmespeichergeführte Betriebsweise der exemplarisch dargestellten Kombination von KWK-System und Objekt wird durch den Speicherladungsverlauf des thermischen Speichers anschaulich verdeutlicht. Eine Korrelation zwischen dem Ladezustand des thermischen Speichers und der geglätteten Tagesaußentemperatur (vgl. Abbildung 185) ist erkennbar. Vor allem während der Winterperiode (an Tagen mit einer Außentemperatur von weniger als 5 °C) ist das KWK-System oftmals nicht in der Lage den Gesamtwärmebedarf quasi monovalent zu decken, sodass das Zusatzheizgerät eingeschaltet werden muss. Diese Aussage resultiert aus dem niedrigen Ladezustand unter Berücksichtigung der wärmegeführten und somit wärmespeicherabhängigen Betriebsstrategie des Gesamtsystems. Während der Sommerperiode (an Tagen mit einer Außentemperatur von mehr als 15 °C) ist das KWK-System in der Lage die geforderte thermische Energie bereitzustellen. Folglich ist der Ladezustand des Wärmespeichers nahezu konstant auf einem sehr hohen Niveau. Während dieser Periode liegt ein vergleichsweise häufiges Takten des KWK-Systems vor und das Zusatzheizgerät ist – zumindest theoretisch – nicht erforderlich. Während der verbleibenden Übergangszeiträume variiert der Ladezustand des thermischen Speichers zwischen einem hohen und niedrigen Zustand, was auf einen kombinierten Betrieb des KWK-Systems und des Zusatzheizgeräts schließen lässt. Besonders auffällig ist, dass der thermische Speicherladezustand (im Tagesmittel) nie unterhalb eines unteren Grenzwerts liegt. Dieser Grenzwert entspricht der Reservekapazität zur Vorhaltung vom Trinkwarmwasser.

Im Vergleich zum Verhalten des thermischen Speichers kann das Verhalten des elektrischen Speichers als nahezu entgegengesetzt beschrieben werden. Mit einem Jahresstrombedarf von 4.137 kWh, liegt der mittlere Tagesstrombedarf bei rund 11,3 kWh. In Zeiten, in denen das KWK-System nahezu durchgängig betrieben wird, liefert es mit bis zu 24 kWh/d also mehr Strom als vom Objekt im Tagesmittel benötigt wird. Daher liegt der elektrische Speicher während der Winterperiode auf einem vergleichsweise hohen Ladezustand. In diesen Zeiträumen erfolgt der größte Teil der Energieeinspeisung in das Netz der allgemeinen Versorgung. Während der Sommerperiode, die sich durch einen taktenden KWK-Betrieb auszeichnen, liegt die bereitgestellte elektrische Energie des KWK-Systems in der Regel unterhalb des elektrischen Objektbedarfs. Folglich verschiebt sich der Arbeitsbereich des elektrischen Speichers auf einen niedrigeren Ladezustandsbereich. In diesen Zeiträumen zeichnet sich das System durch einen erhöhten Fremdstrombezug aus.

Das dargestellte Systemverhalten stellt im Wesentlichen eine Aufnahme einer exemplarischen Systemkombination dar. Inwieweit eine Variation der objektseitigen Anforderungen oder unterschiedlichen Speichergrößen einen Einfluss auf das Systemverhalten haben, kann in der Jahresverlaufsanalyse nicht fundiert ermittelt werden, da hierfür eine vergleichsweise hohe Anzahl an Untersuchungen erforderlich ist. Um – auf Basis des aufgezeigten Verständnisses des Betriebsverhaltens – übertragbare sowie verallgemeinerbare Aussagen ableiten zu können, erfolgt die Bewertung der sensitiven Einflüsse des Endnutzer-Jahresstrombedarfs sowie der Stromspeicherdimensionierung im Rahmen der nachfolgenden Parameterdiskussion.

3.5.5.3 Parameterdiskussion

Die Parameterdiskussion basiert auf den gemittelten Jahresergebnissen der zeitlich differenzierten Analysen. Auf Basis der Variation der Stromkennzahl des Gebäudes beim Einsatz eines fixen KWK-Systems kann ein besseres Verständnis der Einflussparameter erreicht werden. Die Objekt-Stromkennzahl wird in einem Bereich von 0,05 bis 0,45 variiert. Da die Stromkennzahl ein Verhältnis darstellt, muss der variierte Parameter tiefergehend identifiziert werden. Im Rahmen der Variation wird der Wärmebedarf als konstant angesehen und lediglich der Strombedarf des Objekts variiert. Da es sich um ein wärmegeführtes KWK-System handelt, ändert sich das eigentliche Betriebsverhalten des KWK-System nicht. Ferner erfolgt die Untersuchung von verschiedenen elektrischen Speicherkapazitäten innerhalb der Objekt-System-Variationen. Im Rahmen der Parameterdiskussion wird der Einfluss zum Vergleich ohne einen elektrischen Speicher (0 kWh) sowie mit installierten Bruttospeicherkapazitäten von 0,5 bis 2,0 kWh untersucht.

Die resultierende 9x5 Ergebnismatrix wird als Kurvenschar dargestellt, sodass die Abbildung die Ergebnisse aus 45 durchgeführten Jahressimulationen enthält. Die ableitbaren Erkenntnisse können zu Identifikation von weiteren Optimierungspotenzialen herangezogen werden, um das Systemverhalten zu optimieren. Die aufgezeigten Ergebnisse stellen nicht wie zuvor aufgetragen mittlere Speicherzustände oder Leistungen dar. Vielmehr ist die wirtschaftlich relevanteste Kenngrößen des Stromeigennutzungsanteils aufgetragen. Der Stromeigennutzungsanteil beschreibt das Verhältnis aus selbstgenutztem KWK-Strom zum gesamt bereitgestellten KWK-Strom. Der Einfluss dieses Faktors wurde unter anderem in [9] dargestellt und wurde bereits in Kapitel 3.3.6 auf installierte Teilsysteme sowie das Projektgebiet bewertet. In Abbildung 187 sind die resultierenden Stromeigennutzungsanteile in Abhängigkeit von der installierten Brutto-Stromspeicherkapazität und von der Objekt-Stromkennzahl aufgeführt.

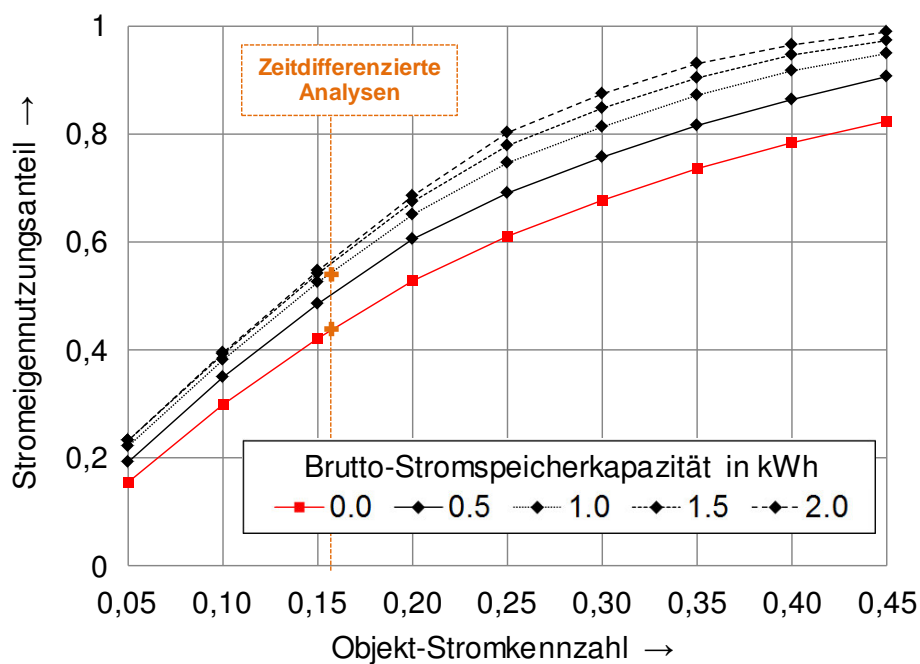


Abbildung 187: Parametervariation: Vergleich der Stromeigennutzungsanteile

Direkt ableitbar ist, dass eine Erhöhung der Objekt-Stromkennzahl mit einer Erhöhung des Stromeigennutzungsanteils einhergeht. Diese Korrelation ist unabhängig davon, ob ein Stromspeicher installiert ist oder nicht und lässt sich durch die Beziehung zwischen der KWK-Strombereitstellung und dem objektseitigen Strombedarf erklären. Insbesondere in der Winterperiode, die sich durch einen nahezu kontinuierlichen KWK-Betrieb auszeichnet, konnte der Strom in den zuvor beschriebenen zeitdifferenzierten Tagesanalysen nicht komplett genutzt werden, da der mittlere Tagesbedarf kleiner als die KWK-Strombereitstellung war. Durch die Erhöhung des objektseitigen Strombedarfs besteht die Möglichkeit einen größeren Teil der Energien innerhalb des Tages zu nutzen, sodass ein erhöhter Stromeigennutzungsanteil erreicht werden kann.

Durch die Implementierung eines elektrischen Speichers kann der Stromeigennutzungsanteil zusätzlich signifikant erhöht werden. Am Beispiel der zeitdifferenzierten Analysen mit einer Objekt-Stromkennzahl von 0,16 und einer installierten Brutto-Stromspeicherkapazität von 1 kWh kann der Stromeigennutzungsanteil um 25 % (11 %-Punkte) erhöht werden. Der Einfluss einer weiteren Erhöhung der elektrischen Speicherkapazität ist im Wesentlichen von der Objekt-Stromkennzahl abhängig, da bei größeren elektrischen Bedarfen die Lastspitzen steigen und diese zum Teil durch nicht mehr durch den leistungslimitierten elektrischen Speicher gedeckt werden können. Die Speicherkapazität sollte daher mit steigender Objekt-Stromkennzahl steigen. Diese Aussage kann auch auf eine Variation der Stromkennzahl des KWK-Systems gespiegelt werden, sofern sich die technischen Parameter (Anfahrverhalten, Wirkungsgrade etc.) ähnlich verhalten. In diesem Fall bedeutet dies, dass der Stromspeicher mit steigender KWK-Stromkennzahl steigen sollte.

Die aufgezeigte Komplexität der sich gegenseitig beeinflussenden Teilkomponenten zeigt einen zukünftigen Forschungsbedarf auf. Neben der tiefergehenden Untersuchung der Verschaltung von elektrischen Speichern mit unterschiedlichsten KWK-Systemen – die ausgeführten Darstellungen beziehen sich auf einen internen Verbrennungsmotor – sind Fragestellungen von optimierten, stromspeicherorientierten Betriebsstrategie zu untersuchen. Da sich die dargestellten Ergebnisse auf theoretische Simulationen beziehen, stellt die messtechnische Prüfstands- und Demonstrationsgestützte Untersuchung von Systemkombinationen einen weiteren Forschungsbaustein dar, der zu einer ganzheitlichen Optimierung von Mikro-KWK-Systemen führen kann.

4 Kommunikation und Transfer

Die Kommunikation im Projekt erfolgte durch die Öffentlichkeitsarbeit und die Erarbeitung und Veröffentlichung diverser Leitfäden und Informationsmaterialien. Neben persönlichen Gesprächen mit den Mitmachern wurden zwei Projektveranstaltungen durchgeführt, welche zum Austausch und zur Klärung technischer und formeller Fragen genutzt wurden.

Es wurden unterschiedliche Print- und Onlinemedien, Vorträge und Fachartikel erarbeitet und veröffentlicht. In diesem Rahmen wurde eine Internetseite erstellt, welche das Projekt erläutert, Partner nennt und eingesetzte Technologien vorstellt. Ergänzend sind Informationen zu den Kontakten der Projektverantwortlichen vorhanden sowie ein Bereich mit Antworten zu häufigen Fragen zum Thema Mikro-KWK. In den Print- und Onlinemedien wurden „Home-Stories“ integriert, welche unterschiedliche Technologien, Nutzungsoptionen und Potenziale der Mikro-KWK an ausgewählten Umsetzungsbeispielen darstellen.

Der Transfer der Erkenntnisse erfolgt durch die Entwicklung und Kommunikation von Handlungsempfehlungen. Diese umfassen den Bereich der technologischen Entwicklung von Mikro-KWK-Systemen und die Rahmenbedingungen für einen effizienten und gleichzeitig ökonomischen Einsatz von Mikro-KWK-Systemen. Im Bereich der Forschung wurden Entwicklungspotenziale insbesondere bei der Flexibilisierung des KWK-Betriebs identifiziert. Innovationen in der Betriebsführung und im Energiespeichermanagement stellen hierbei primäre Maßnahmen dar, welche zukünftig von branchenspezifischen Herstellern und Forschungsstellen fokussiert werden sollten.

Die Handlungsempfehlungen berücksichtigen des Weiteren die projektbezogene Situation bezüglich des administrativen Aufwandes und der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Wesentliche Herausforderungen, die identifiziert wurden, sind fehlende Erfahrung mit der Technik bei Installateuren, Verteilnetzbetreibern und Anlagenbetreibern. Unklare Verantwortlichkeiten und ein hoher administrativer Aufwand bei Anmeldung, Inbetriebnahme und Abrechnung stehen aktuell im Missverhältnis zum Nutzen beim Betreiber. Basierend auf den Erkenntnissen wurden Instrumente zur Beschleunigung und Förderung des KWK-Ausbaus im Hinblick auf die klimapolitischen Ziele erarbeitet. Die größten Potenziale werden in der Vereinfachung des Anmeldeverfahrens und der Abrechnungsmethodik sowie in der Befreiung des Eigenverbrauchs von der EEG-Umlage gesehen.

Die Erfahrungen im Projekt haben aufgezeigt, dass das Anmeldeverfahren für eine Mikro-KWK-Anlage aufwändig und mit Unklarheiten bezüglich der Zuständigkeiten der verschiedenen Akteure behaftet ist. Daher wurde ein Leitfaden für die Anmeldung von Mikro-KWK-Anlagen erarbeitet und im Rahmen des KWK-Praxisforums vorgestellt.

4.1 Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit

4.1.1 Projektveranstaltungen

Die Endnutzer im Projekt sollten nach der Auswahl und den Begehungen weiterhin betreut werden. Deshalb wurden im Frühjahr und Sommer 2014 viele persönliche Gespräche geführt und die Interessenten vor Unterzeichnung des Vertrags zur Projektteilnahme einzeln ins Zentrum für Information und Beratung (ZIB) eingeladen. Die Gespräche dienten dazu die Motivation und Einstellung der Probanden zu ermitteln, um ein Gefühl für die Stimmungslage zu erhalten und aufkommende Fragen schnell und umfassend zu beantworten. Es war gewünscht einen persönlichen Kontakt auszubauen, die Gesichter und Namen zu kennen und über diesen aufwändigen Dialog aus Kunden Mitmacher des Projekts zu machen: Mitmacher, die umfassend informiert und motiviert sind und somit ihren Beitrag zu einem positiven Projekt leisten.

Gegen Ende des Sommers wurden die Mitmacher ins ZIB eingeladen. Diese Veranstaltung wurde dafür genutzt, Fragestellungen zu erläutern, die in der gesamten Gruppe auftraten, und Informationen weiterzugeben, die insbesondere die Ableseung der Stromeinspeisung sowie des Strombezugs betrafen. Zudem sollten die Mitmacher die Möglichkeit haben sich untereinander kennenzulernen, sich auszutauschen und ein Stück weit ein Gruppengefühl zu entwickeln im Sinne der Idee von Mitmachern in einem gemeinsamen Forschungsprojekt.

4.1.2 Anmeldungsleitfaden

Im Rahmen des Projekts hat sich gezeigt, dass das Anmeldeverfahren für eine Mikro-KWK-Anlage aufwändig ist und einige Unklarheiten bezüglich der Zuständigkeiten der verschiedenen Akteure aufkommen lässt. Infolgedessen wurde ein Leitfaden für die Anmeldung der KWK-Anlagen im Projekt erarbeitet und auch im Rahmen des KWK-Praxisforums vorgestellt. In folgender Darstellung werden die verschiedenen Akteure und die Bezüge untereinander dargestellt sowie die relevanten Zeiträume aufgezeigt. Dies betrifft zum einen die Formulare für den Zeitraum vor und nach der Inbetriebnahme sowie die jährlich wiederkehrende Anträge (siehe Abbildung 188).

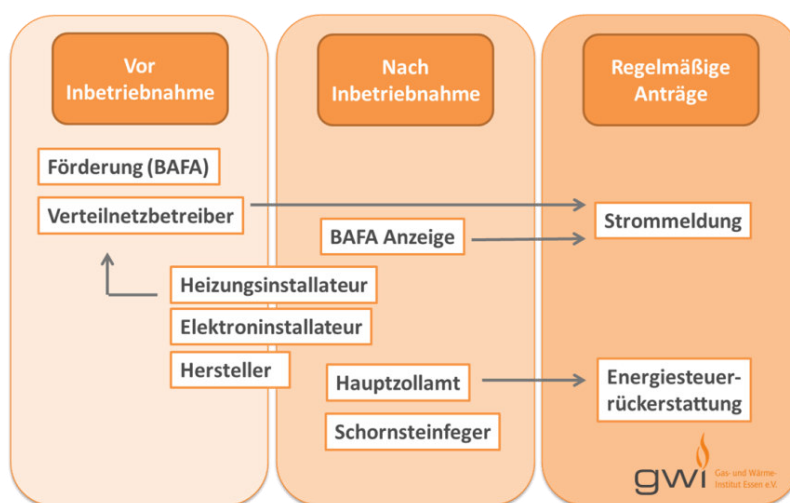


Abbildung 188: Beteiligte Akteure im Anmelde- und Meldeverfahren von KWK-Anlagen

Informationen über mögliche Förderungen von Heizungsmodernisierungen sollten vor einer Konkretisierung der Modernisierungspläne eingeholt werden. Aufgrund der bereits erfolgten Förderung der Anlagen im Rahmen des Projekts wird von einer genaueren Betrachtung der Fördermöglichkeiten in diesem Falle abgesehen.

Die folgenden Darstellungen und Ergebnisse beziehen sich auf die Anmeldung einer KWK-Anlage in Bottrop und den damit zuständigen Verteilnetzbetreiber ELE Verteilnetz GmbH. Aufgrund der Stromerzeugung und dessen Einspeisung bei Stromüberschuss benötigt die Anlage einen Netzzugang. Die Anmeldung beim zuständigen Verteilnetzbetreiber ist daher vor Installation der Anlage zwingend erforderlich. Zusätzlich müssen Herstellernachweise, technische Datenblätter und ein Schemaplan zur Eigentumsgrenze und Übergabepunkt im Falle eines Neubaus sowie ein Datenblatt zum Messkonzept eingereicht werden. Angesichts der Angaben von technischen Daten während der Anmeldung empfiehlt sich die Einbindung des zuständigen Installateurs, Elektrikers und Herstellers bereits vor Installation der Anlage. Nach erfolgreicher Prüfung der Anmeldung seitens des Verteilnetzbetreibers erhält der Kunde ein Schreiben für die Sicherstellung der Netzkapazität am Netzanschlusspunkt, woraufhin die Installation der Anlage erfolgen kann. Verfügt die Anlage selbst nicht über einen internen, vom Hersteller verbauten KWK-Strom-Produktionszähler muss hierfür ein separater Zählerantrag rechtzeitig vor Inbetriebnahme gestellt werden. In Abbildung 189 ist eine Übersicht der einzureichenden Anträge und Herstellernachweise vor Inbetriebnahme dargestellt.

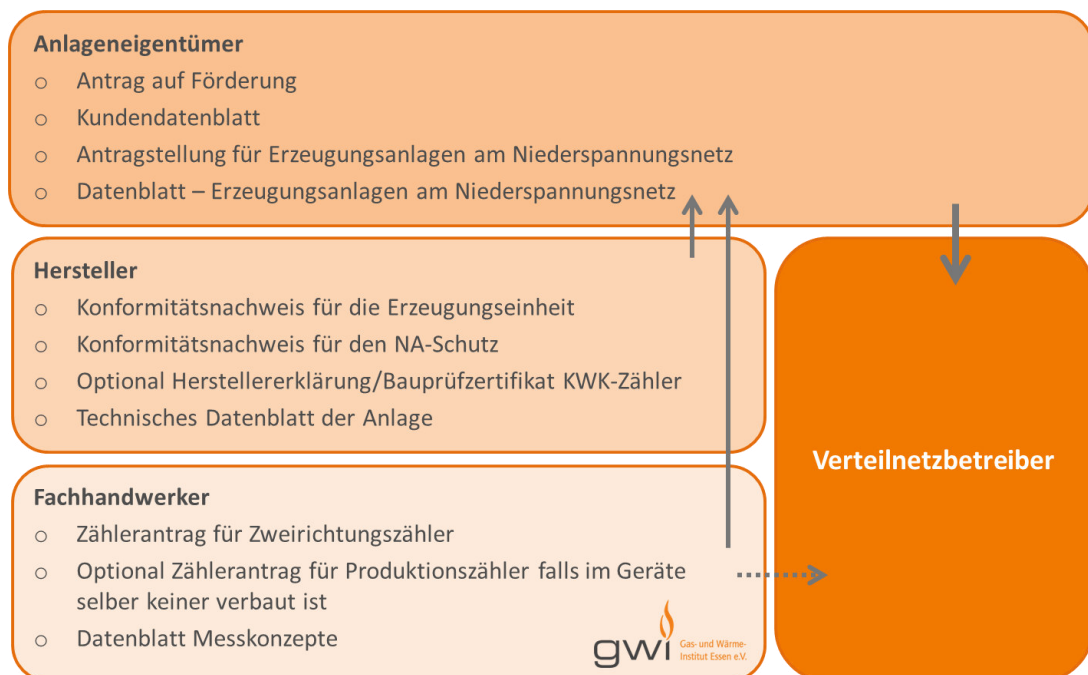


Abbildung 189: Übersicht der Anmeldeformalitäten vor Inbetriebnahme

Nach der Inbetriebnahme muss die Anlage innerhalb von vier Wochen beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle angemeldet werden, um den KWK-Bonus für den erzeugten Strom zu erhalten. Die Auszahlung dieser im KWKG festgelegten Vergütung erfolgt über den Verteilnetzbetreiber und dessen Abrechnung. Demzufolge ist die Anmeldebestätigung des BAFA beim Verteilnetzbetreiber vorzulegen. Ferner müssen einmalig nach der Inbetriebnah-

me wie in Abbildung 190 ersichtlich weitere Herstellernachweise erbracht werden und das durch den Fachhandwerker ausgefüllte „Inbetriebsetzungsprotokoll für Erzeugungsanlagen Niederspannung“ vorlegt werden. Verfügt die Anlagen über einen internen vom Hersteller verbauten KWK-Strom-Produktionszähler muss dessen Zertifikat eingereicht werden. Des Weiteren muss die neue Anlage auch vom Schornsteinfeger abgenommen werden.

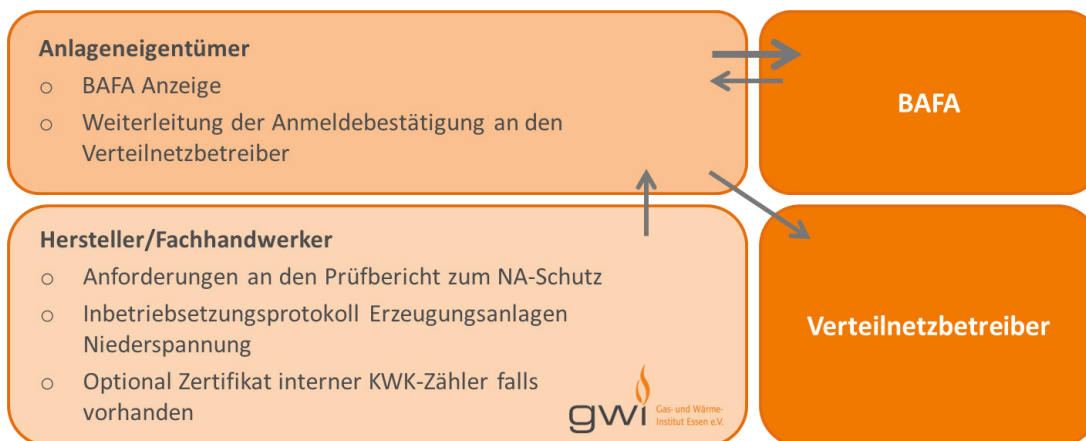


Abbildung 190: Übersicht der einmaligen Anmeldeformalitäten nach Inbetriebnahme

Nach der Inbetriebnahme gibt es wie in Abbildung 191 dargestellt auch regelmäßig wiederkehrende Anträge. Um den KWK-Bonus zu erhalten, muss der KWK-Produktionszählerstand einmal jährlich an den Verteilnetzbetreiber gemeldet werden. Auch die Vergütung des eingespeisten KWK-Stroms erfolgt über den Verteilnetzbetreibern. Um den jeweils quartalsweise geltenden EEX-Baseload-Preis für die eingespeiste Kilowattstunden Strom zu erhalten, ist es erforderlich den Zählerstand über die Einspeisung quartalsweise zu melden. Alternativ bestand im Projektgebiet die Möglichkeit den Zählerstand der Einspeisung auch einmal jährlich zu melden. Berechnungsgrundlage für die Einspeisevergütung ist dann der Durchschnitt der vier durchschnittlichen Quartalspreise.

Des Weiteren kann der Anlagenbetreiber die Energiesteuerrückerstattung auf das im KWK-Prozess verbrannte Erdgas beim jeweilig zuständigen Hauptzollamt beantragen. Der Abrechnungszeitraum ist der 01.01 bis 31.12., weshalb die Ablesung des Gaszählerstands zum Stichtag erforderlich ist. Daraufhin hat der Anlagenbetreiber ein Jahr Zeit den Antrag einzureichen. Der Erstantrag ist zunächst umfangreicher als die verkürzte Form der Folgeanträge.



Abbildung 191: Übersicht der regelmäßigen Anträge nach Inbetriebnahme

4.1.3 Print-, Onlinemedien, Veröffentlichungen und Vorträge

Für das Projekt wurde eine Internetseite (www.100kwk.de, Screenshot siehe Anhang A16) erstellt, die das Projekt erläutert, die Partner nennt, die eingesetzten Technologien vorstellt und den Kontakt mit den Projektverantwortlichen ermöglicht. Ferner können sich Mitmacher sowie andere Interessierte im Bereich der FAQ über häufig gestellte Fragen im Themenbereich der Mikro-KWK informieren.

Darüber hinaus gab es eine enge Zusammenarbeit mit unterschiedlichen lokalen und regionalen Medien, sodass sowohl im Print- und Onlinebereich als auch in Radio und Fernsehen über die gesamte Projektlaufzeit hinweg regelmäßig über das Projekt berichtet wurde. In Tabelle 54 ist ein Auszug der Beiträge dargestellt.

Tabelle 54: Auszug der Zusammenarbeit mit unterschiedlichen lokalen und regionalen Medien

Titel	Veranstaltung, Ort / Zeitschrift	Datum
Strom und Wärme aus dem Keller	WAZ	12/2014
Update: 100 KWK für Bottrop	KH Aktuell	06/2014
100 Bürger günstig mit modernster Heiztechnik versehen	WAZ	05/2014
Traditionsbetrieb wird heute 100 Jahre alt	WAZ	04/2014
Strom kommt aus der Heiz-Anlage	WAZ	12/2013
Viel Interesse an der InnovationCity	Stadtspiegel Bottrop	04/2013
Klimaschutz: Viele geben gute Beispiele	WAZ	04/2013

Neben der allgemeinen Berichterstattung wurden Ergebnisse in Form von Konferenzbeiträgen sowie im Rahmen von Veröffentlichungen in Fachzeitschriften fachmedienwirksam publiziert.

Ein chronologisch geordneter Auszug von Vorträgen auf nationalen sowie internationalen Fachkonferenzen durch die Projektpartner ist in Tabelle 55 aufgeführt.

Tabelle 55: Auszug von Vorträgen auf nationalen sowie internationalen Fachkonferenzen

Titel	Veranstaltung, Ort / Zeitschrift	Datum
100 CHP-units in Bottrop - experiences and results	EGATEC, Wien (AT)	11/2015
100 KWK-Anlagen in Bottrop	13. KWK-Symposium, Duisburg	11/2015
Innovation City Ruhr - Ein Praxisbericht vom 100 KWK-Anlagen Projekt in Bottrop	gat 2015, Essen	10/2015
Potentiale der Mikro-KWK im Quartier: Theoretische und praktische Betrachtungen der Einsatzmöglichkeiten am Beispiel des 100 KWK Projektes (InnovationCity)	VDI Fachtagung: Dezentrale und Hybride Energiesysteme für Gebäude und Quartiere, Köln	10/2015
Operation and profitability enhancement of CHP systems in residential buildings using home automation	EEDAL 2015, Luzern (CH)	08/2015
Brennstoffzellen im praktischen Einsatz - Betriebserfahrungen aus dem Musterprojekt „InnovationCity“ Bottrop nach fast 1,5 Jahren	WINGAS, Kassel	05/2015
Stirling- und Otto-Motoren im Leistungsbereich 1 kW Praxiserfahrungen und Perspektiven - 100-KWK Anlagen in Bottrop	VGB Fachtagung, Kufstein (AT)	11/2014
100 CHP-units in Bottrop	SCGU workshop, Groningen (NL)	10/2014
100 KWK-Anlagen in Bottrop	gat 2014, Karlsruhe	10/2014
100 KWK-Anlagen in Bottrop	1. KWK.NRW-Forum, Düsseldorf	09/2014
100 micro-CHP, Bottrop project, experiences and results	IGRC 2014, Kopenhagen (DK)	09/2014
100 KWK-Anlagen in Bottrop	e-world, Essen	02/2014

In Tabelle 56 ist der nicht abschließende Auszug der Berichterstattung zum Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ in unterschiedlichen Fachzeitschriften enthalten.

Tabelle 56: Auszug von Fachpublikationen

Titel	Veranstaltung, Ort / Zeitschrift	Datum
Ein Praxisbericht vom 100-KWK Anlagenprojekt in Bottrop	energie | wasser - praxis	12/2015
100 KWK-Anlagen in Bottrop, Der Weg von der Theorie in die Umsetzung	energie | wasser - praxis	01/2015
100 KWK-Anlagen in der InnovationCity Bottrop	energie | wasser - praxis	09/2014
Vom Labor in die Praxis - Modellversuch in Bottrop will 100 KWK-Anlagen ins Feld bringen und auswerten	IKZ-Fachplaner	06/2014
100 CHP units for Bottrop	innovation & energie	04/2013
100 KWK-Anlagen für Bottrop	innovation & energie	04/2013

Neben den unidirektionalen Publikationen wurde auch der direkte Kontakt zu interessierten Gruppen gesucht. Einige der installierten KWK-Anlagen wurden durch verschiedenste Besuchergruppen besucht (technisches Fachpublikum, Studenten, interessierte Bürger), die durch Handwerkspartner und Projektmitarbeiter zur Vorstellung der Technik begleitet wurden.

Durch die proaktive Publikation des Projektfortschritts und der Ergebnisse in unterschiedlichsten Kanälen, ist das Projekt in NRW sowie auf nationaler und internationaler Ebene bekannt. So repräsentiert das Leuchtturmprojekt NRW als erfolgreiches und innovatives Bundesland.

4.1.4 Home-Stories

4.1.4.1 Familie Nitzsche: Austausch der 20 Jahre alten Gasheizung

Die erste Anlage des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ wurde bei Familie Nitzsche zusammen mit prominentem Besuch eingeweiht. Die „Strom erzeugende Heizung“ ersetzt eine 20 Jahre alte Gasheizung. Neben den finanziellen Aspekten spielten insbesondere der Umwelt- und Klimaschutz eine wichtige Rolle für die Bewerbung der Familie.



Abbildung 192: Feierliche Einweihung der ersten KWK-Anlage im Projekt

Bernd und Ursula Nitzsche waren schon etwas aufgeregt, als sie erfuhren, dass zur Einweihung ihrer neuen Heizungsanlage neben Presse- und Wirtschaftsvertretern auch NRW-Umweltminister Johannes Remmel kommen würde. Doch der hohe Besuch hatte auch seinen Grund: Bei Familie Nitzsche wurde am 12. Dezember 2013 die erste KWK-Anlage im Rahmen des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ eingeweiht.

Die neue „Strom erzeugende Heizung“ der Firma Brötje arbeitet mit einem Stirling-Motor und wird mit Erdgas betrieben. Sie ersetzt das inzwischen 20 Jahre alte Heizsystem, das nur einen relativ geringen Wirkungsgrad hatte. Die neue Anlage liefert Familie Nitzsche sowohl Heizwärme als auch Warmwasser und erzeugt zudem Strom, der direkt verbraucht werden kann oder in das Stromnetz eingespeist wird. Durch diese gekoppelte Erzeugung bildet die KWK-Anlage die derzeit effizienteste Heiztechnik für Wohngebäude und vermindert so die CO₂-Emissionen deutlich.

Für Bernd und Ursula Nitzsche war schnell klar, dass sie sich um eine der 100 KWK-Anlagen bewerben wollen: „Unser Haus ist für uns auch eine Altersvorsorge. Und da unsere alte Heizung bereits deutlich in die Jahre gekommen war, haben wir bei dem Angebot nicht lange gezögert, um so auch den Wert unserer Immobilie zu erhalten. Ein wichtiger Punkt ist zudem, dass wir mit der KWK-Anlage Strom erzeugen und diesen selbst nutzen bzw. ins Netz einspeisen können. So erzeugt die neue Heizung quasi bares Geld.“

Vor der Projektbeteiligung stand bereits im August 2012 eine kostenlose Erstberatung zu Sanierungsmöglichkeiten im Zentrum für Information und Beratung (ZIB) der InnovationCity Ruhr.

Auch der Aspekt Klima- und Umweltschutz ist für die Familie wichtig. „Wir sind von dem Projekt InnovationCity Ruhr schon lange überzeugt und können jetzt auch einen aktiven Beitrag dazu leisten die CO₂-Emissionen zu senken und für unsere Kinder und Enkel die Umweltbelastungen in Zukunft zu minimieren.“



Abbildung 193: Der Anlagenbetreiber ist glücklich über das neue System

4.1.4.2 Familie Gräfe: Strom aus der Brennstoffzelle

Familie Gräfe hat ihre alt Ölheizung durch eine KWK-Anlage mit Brennstoffzelle ersetzt. Damit wird nicht mehr nur das eigene Haus sondern auch ein Nachbargebäude und ein Atelier mit Strom, Wärme und Warmwasser versorgt.



Abbildung 194: Der Fachinstallateur beschreibt das neu installierte KWK-System

Die alte Ölheizung ist weg und Ute Gräfe trauert ihr auch nicht hinterher. „Das roch ja hier schon mal ziemlich nach Öl“, erinnert sie sich. Abgelöst wurde die alte Anlage durch ein gasbetriebenes KWK-System bestehend aus einer Brennerheizung gekoppelt mit einer Brennstoffzelle. Bei der Brennstoffzellen-Technologie wird Strom nicht durch die herkömmliche Verbrennung von Energieträgern erzeugt, sondern durch chemische Umwandlungsprozesse. So kann bei der Stromerzeugung ein besonders hoher Wirkungsgrad erzielt werden. Und dieser ist bei den Gebäuden von Ute und Jürgen Gräfe auch notwendig. „Wir beheizen Räume auf 380 Quadratmetern und verbrauchen jährlich ca. 15.000 Kilowattstunden Strom“, erklärt Jürgen Gräfe.

Für einen Verbrauch in diesen Dimensionen eignen sich KWK-Systeme mit Brennstoffzellen besonders. Während bei normalen Ein- und Zweifamilienhäusern zumeist der Strombedarf für diese Art der Anlage zu gering ist, sind Gebäude mit integrierter gewerblicher Nutzung für dieses System ideal. Die neue Heizung von Familie Gräfe kann bis zu 13.000 Kilowattstunden Strom im Jahr erzeugen und somit über 85 % des Eigenverbrauchs sicherstellen. Warum sich Familie Gräfe für eine solche Anlage im Rahmen des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ beworben hat, fasst Jürgen Gräfe in einem Satz zusammen: „Wir sind Feuer und Flamme für neue Technologien.“

4.1.4.3 Familie Kamyczek: Wärme für vier Parteien

Familie Kamyczek nutzt das Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“, um die zwei Heizungsanlagen in ihrem Vier-Parteien-Haus durch eine moderne und hocheffiziente Heizung mit Kraft-Wärme-Kopplung auszutauschen. Zudem führte die Familie noch weitere energetische Maßnahmen durch.



Abbildung 195: Einblick in die Anlagenperipherie

Petra und Dirk Kamyczek hatten bis vor kurzem noch ein spezielles Problem. Ihr Haus wird durch eine Postleitzahlengrenze geteilt und die zwei alten Heizungen in dem Gebäude standen jeweils in unterschiedlichen Bezirken. Das führte dazu, dass die Abrechnung und Wartung der Anlagen immer doppelt durchgeführt werden mussten. Diese Eigentümlichkeit ist nun dank der neuen Viessmann-Heizung mit Kraft-Wärme-Kopplung Geschichte. Seit Februar versorgt sie inzwischen die vier im Haus wohnenden Parteien mit Wärme und mit Heißwasser.

Dank der hohen Auslastung der Anlage können die Kamyczeks auch viel Strom für die Eigenversorgung nutzen oder diesen gewinnbringend in das Netz einspeisen. „Bislang haben wir unser Leben noch nicht nach der Anlage ausgerichtet, aber wenn man weiß, dass man gerade seinen eigenen Strom erzeugt, stellen wir schon gezielt die Waschmaschine oder die Pumpe für den Pool an“, erklärt Petra Kamyczek. Wie bei vielen Teilnehmern des Projekts sprachen mehrere Aspekte dafür, dass sich die Bottroper Ratsfrau mit ihrer Familie um eine KWK-Anlage beworben hat: „Der Zeitpunkt war für uns günstig, da wir gerade die Anschlussfinanzierung für unser Haus planten. Zudem ist die InnovationCity Ruhr ein wichtiges Thema, bei dem ich als Mitglied des Rates der Stadt Bottrop auch eine Vorbildfunktion habe.“

Zur Steigerung der Energieeffizienz hat die Familie nach einer Energieberatung im Zentrum für Information und Beratung (ZIB) der InnovationCity Ruhr auch die Geschosdecke ihres Hauses gedämmt. Dabei wurde sie auch von einem Energieberater aus dem Partnernetzwerk unterstützt. So können die Energiekosten noch einmal deutlich reduziert werden.

4.1.4.4 Familie Neff: Nie mehr Kohle schleppen

Familie Neff heizte 27 Jahre lang mit einer Kohle-Heizung. Durch den Einbau eines neuen Heizsystems mit Kraft-Wärme-Kopplung entfällt nun nicht nur der lästige Kohlestaub, sondern es entsteht auch mehr nutzbarer Raum im Keller.



Abbildung 196: Der Anlagenbesitzer präsentiert die Bedieneroberfläche der Anlage

Spätestens an jedem zweiten Wintertag führte der Weg von Heinz-Detlef Neff in seinen Heizungskeller, um seine alte Kohleheizung wieder mit Briketts zu beschicken. Doch diese Zeiten sind inzwischen vorbei. Seit Ende Januar 2014 läuft im Keller von Familie Neff eine mit Erdgas betriebene KWK-Anlage. Die Anlage des Unternehmens Vaillant versorgt das Reihenhaus nun mit Wärme und Strom und wurde im Rahmen des Projekts „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ verbaut.

Der 27 Jahre alten Heizung trauert Heinz-Detlef Neff nicht hinterher: „Durch die Kohle hatten wir vor allem im Keller nur Dreck und Staub. Jeden Tag musste ich hier putzen. Die neue Strom erzeugende Heizung hingegen ist sauber.“ Die Energie entsteht durch einen Gas-Verbrennungsmotor gekoppelt mit einem Gas-Brennwertgerät, die Abgasführung verläuft durch den Schornstein. Ein Pufferspeicher mit 300 l Fassungsvermögen speichert warmes Wasser für die Heizung und die Warmwasserbereitung. Über 1.000 kWh Strom hat die Anlage bereits bis Ende März 2014 erzeugt, von denen die Familie ca. ein Drittel selbst genutzt und zwei Drittel gegen eine entsprechende Vergütung in das Stromnetz eingespeist hat. So sorgt die Heizung für Wärme und Strom und füllt den Geldbeutel.

Für Familie Neff ist die KWK-Anlage in doppelter Hinsicht eine Altersvorsorge: Zum einen erspart sie die regelmäßige Beschickung von Hand, die gerade im Alter sehr mühsam ist. Zum anderen führt die neue Heizung zu einer deutlichen Wertsteigerung der Immobilie. Und es gibt noch einen weiteren Vorteil: Anstatt des Kohlelagers gibt es nun rund 10 m² mehr Raum im Keller, der genutzt werden kann. Die alten Kohlebestände hat Familie Neff übrigens an eine Nachbarin verschenkt – damit hatte das letzte Mal „Kohle schleppen“ noch einen guten Zweck.

4.2 Handlungsempfehlungen und Ausblick

4.2.1 Handlungsempfehlungen

Unklare Verantwortlichkeiten und eine Vielzahl an Akteuren und Institutionen bei der Installation, Anmeldung und Inbetriebnahme der Anlagen stellen ein erhebliches Markthemmnis dar. Dem privaten Anlagenbetreiber steht eine Vielzahl an Akteuren gegenüber:

- ⌚ Handwerker (Heizungintegration, Elektroninstallation),
- ⌚ Anlagenhersteller,
- ⌚ Verteilnetzbetreiber,
- ⌚ Stromversorger,
- ⌚ Gasversorger,
- ⌚ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA),
- ⌚ zuständiges Hauptzollamt,
- ⌚ Steuerberater,
- ⌚ Schornsteinfeger,
- ⌚ Gebäudeversicherer.

Der Einbau und Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen im genannten Umfeld ist ebenfalls ein neuartiges Betätigungsfeld für die Installateure des Sanitärhandwerks. Die gewählten technischen Lösungen sind bisher nicht vollständig standardisiert und unterscheiden sich örtlich je nach Vorgaben des Verteilnetzbetreibers und Absprachen mit dem Handwerk. Damit können auch weitere Akteure, wie die Hersteller der Anlagen, bei Klärungsbedarf seitens der privaten Anlagenbetreiber nur bedingt beratend tätig werden.

Die Abgrenzung der Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten im Rahmen der Anmeldung und Inbetriebnahme sind teilweise ungeklärt. Erfahrungen und Kompetenzen der Akteure im Themenfeld Mikro-KWK schwanken stark. Für die Anlagenbetreiber ist daher schwer ersichtlich, welche Stellen wann und in welchem Umfang informiert oder welche Angaben im Detail zu Verfügung gestellt werden müssen. Öffentlich verfügbare Ratgeber oder Leitfäden haben sich dabei als generelle Hilfsmittel erwiesen, die jedoch nicht die Vielzahl der individuellen, örtlichen Problemstellungen abbilden.

Die genannten Akteure fragen für interne Zwecke oder zur Weitergabe umfangreiche Angaben zur Anlagen und dem Betrieb bei den Anlagenbetreibern ab. Die Bereitstellung der Angaben durch private Betreiber ist jedoch ohne deren umfangreiche Schulungen oder Unterstützungsleistungen nur bedingt praktikabel. Erschwerend kommt hinzu, dass diverse Angaben ausschließlich für Großanlagen relevant sind. Dies ist darin begründet, dass die Formulare und Verfahren für Großanlagen konzipiert wurden und im Nachhinein auf kleinere Leistungsklassen übertragen wurden. Für die beschriebene Klasse der Mikro-KWK sind die Verfahren unpassend, da sie für private Anlagenbetreiber vergleichsweise komplex und aufwändig sind. Dies hat zur Folge, dass Kosten und Aufwand bei sämtlichen genannten Akteuren steigen.

Daraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- 🔗 Standardisierung auf technischer und administrativer Ebene
- 🔗 Klare Aufgabenverteilungen und Vereinfachungen beim Anmeldevorgang

Die Ablesung und Meldung von Angaben zu Verbrauch und Stromeinspeisung ist zum Teil sehr aufwändig. Je nach Anlagentyp und Messkonzept müssen Angaben zur Abrechnung des Anlagenbetriebs abgelesen oder aus mehreren Messwerten errechnet werden. Dabei fehlen eine klar verständliche Bezeichnung der angefragten Energiemengen und die Zuordnung der jeweiligen Zähler. Dadurch treten vor allem bei der ersten Meldung viele Fehler und Fehlangaben auf, welche zunächst identifiziert und dann korrigiert werden müssen. Private Anlagenbetreiber, die im eigenen Bewusstsein lediglich eine moderne, stromerzeugende Heizung besitzen und sich nicht als Kraftwerksbetreiber verstehen, sind hiermit regelmäßig überfordert.

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 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.

Bei der Benatragung der Energiesteuerrückerstattung beim zuständigen Hauptzollamt werden zahlreiche anlagentechnische, messtechnische und wirtschaftliche Daten angefordert, deren Nennung für die Betreiber aufgrund der fachspezifischen Anforderungen teils nicht möglich ist. Die zugelassenen Verfahren zur Ermittlung des Gaseinsatzs im KWK-System sind zum Teil nicht eindeutig fixiert, sodass es hier zum Teil zu erhöhten Klärungsbedarfen kam. Im Projekt zeigte sich ferner, dass teilweise die Erfahrung zur steuerrechtlichen Bewertung von Mikro-KWK-Systemen bei den jeweiligen Steuerberatern nicht vorlag. Eine Unterstützung bei der Antragsstellung zur Energiesteuerrückerstattung und zur Handhabung des gesamten Kommunikationsprozesses war somit oftmals nicht möglich.

Daraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- 🔗 Standardisierung auf technischer und administrativer Ebene
- 🔗 Weiterbildung und Schulungen auf allen Akteursebenen

4.2.2 Ausblick

Ein wichtiger Eckpfeiler zur Steigerung der Energieeffizienz in der Energieversorgung ist der Einsatz von innovativen KWK-Systemen. Durch die Umsetzung von Innovationen sowohl in der Betriebsführung als auch im Energiespeichermanagement kann eine Flexibilisierung des KWK-Betriebs erreicht werden. Ferner kann die Effizienz der Systeme dadurch weiter gesteigert werden und dazu beitragen die KWK-Technologie im Markt besser zu positionieren. Die nachfolgend aufgezeigten Forschungsbedarfe stellen daher einen essentiellen Baustein des Klimaschutzplans NRW und ein wichtiges, weiteres Element zur Umsetzung der Energiewende dar.

Eine Möglichkeit zur Flexibilisierung von Mikro-KWK-Systemen bietet die Integration von Stromspeichern. Durch den Betrieb und eine Vermessung der Speicher kann eine Bewertung der elektrischen Energieströme sowie der objektbezogenen und der KWK-bezogenen Bilanzgrenzen erfolgen. Darüber hinaus können Aussagen zur Stromeigennutzung und zu Stromdeckungsanteilen getroffen werden, die zu einer Steigerung der Betriebswirtschaftlichkeit führen. Neben einer Demonstration in der Praxis wäre eine ergänzende Untersuchung von Systemkombinationen unter reproduzierbaren Bedienungen im Labor wichtig. Ferner kann die Erprobung und Weiterentwicklung funktionaler Speicher im kombinierten Einsatz mit KWK einen signifikanten Beitrag zum Ausgleich von Netzschwankungen leisten.

Durch den Einsatz von technologisch unterschiedlichen Wärmespeichern können Erzeugung und Bedarf voneinander entkoppelt werden und zu einer Erhöhung der Flexibilität von KWK-Systemen beitragen. Auch die Erforschung und Untersuchung der Einsetzbarkeit von Kältespeichern gewinnt durch die erweiterte Nachfrage nach dem Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung an Bedeutung. Wichtige Forschungsbereiche entstehen hierbei im Bereich der Speichereigenschaften (Kinetik, Lastwechsel, Energiedichte) und Regelstrategien sowie der Identifikation und Hebung von Kostenreduktionspotenzialen.

Zur einer leistungsübergreifenden Verbesserung des KWK-Betriebs kann die Entwicklung und Implementierung eines intelligenten bedarfs- und wetterprognosebasierten Energiemanagementsystems beitragen.

Die Netzstabilisierung spielt in Zukunft eine immer wichtigere Rolle. Plan- und steuerbare KWK bietet in Kombination mit fluktuierenden erneuerbaren Energien Möglichkeiten zur regionalen Stabilisierung des Stromnetzes. In diesem Zusammenhang ist zu analysieren, welchen Beitrag flexible, netzdienliche KWK-Anlagen, virtuelle Kraftwerke und Smart Grids leisten können.

5 Verzeichnisse

V 1	Literaturverzeichnis	X
V 2	Abbildungsverzeichnis	XIII
V 3	Tabellenverzeichnis	XXIII

V 1 Literaturverzeichnis

- [1] August Brötje GmbH, "Brötje EcoGen WGS 20.1 - Technische Information Gas-Brennwertkessel mit integriertem Stirlingmotor - Speichertyp SPS 800," p. S. 50.
- [2] Viessmann Werke GmbH & Co KG, "Datenblatt Vitocell 340-M/360-M Heizwasser-Pufferspeicher mit Trinkwassererwärmung 750 und 950 Liter Inhalt, Speichertyp 340-M," no. 04/2014, p. S. 4.
- [3] Viessmann Werke GmbH & Co KG, "Datenblatt Vitotwin 350-F Mikro-KWK auf Stirlingbasis mit integriertem Spitzenlastkessel 1 kWel, 3,6 bis 26 kWth, Vitotwin 350-F," vol. 09/2013, p. S. 4.
- [4] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, "Planungsinformation ecoPOWER – mikro-BHKW ecoPOWER 1.0, mini-BHKW ecoPOWER 3.0, mini-BHKW ecoPOWER 4.7," vol. 12/12, p. S. 72.
- [5] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, "Für den Fachhandwerker Installationsanleitung allSTOR DE, AT VPS .../2," vol. 03/2010, p. S. 8, S. 10.
- [6] Ceramic Fuel Cells Limited, "Montage- und Bedienungsanleitung Hygienespeicher FC-H-200 Handbuch, Hygienespeicher FC-H-200," p. S. 15, Nov-2015.
- [7] VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, "VDI-Richtlinie: VDI 2067 Blatt 1 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung." VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (Hrsg.), 2012.
- [8] C. Ihle and et al., *Tabellenbuch – Sanitär · Heizung · Lüftung*. Bad Homburg vor der Höhe: Gehlen Verlag, 2000.
- [9] M. Buller, *Ganzheitliche Betrachtung des Mikro-KWK Potenzials im Wohngebäudebestand Korrelation zwischen Kraft-Wärme-Kopplung und Dämmmaßnahmen*. Bonn: wvgw, Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser, 2011.
- [10] Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, "Planungsinformation ecoPOWER – mikro-BHKW ecoPOWER 1.0, mini-BHKW ecoPOWER 3.0, mini-BHKW ecoPOWER 4.7," vol. 12/12, p. S. 193.
- [11] EnergieAgentur.NRW (Hrsg.), "Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“ - Anteile, Verbrauchswerte und Kosten von 12 Verbrauchsbereichen in Ein- bis Sechspersonen-Haushalten," Düsseldorf, 2011.
- [12] T. Loga, N. Diefenbach, and R. Born, "Deutsche Gebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden," Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, Feb. 2015.
- [13] Emscher Lippe Energie GmbH, "Brennwert und Heizwert für das Projektgebiet InnovationCity," 09-Sep-2015.
- [14] VDI-Gesellschaft Energietechnik, and Fachausschuss Energiesysteme, "Richtlinie VDI 4608: Energiesysteme: Kraft-Wärme-Kopplung." Beuth Verlag, 2008.
- [15] W. Mauch, R. Corradini, K. Wiesemeyer, and M. Schwentzke, "Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen," *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 55, no. Heft 9, Jg 2010.
- [16] "Institut Wohnen und Umwelt (IWU): Energiebilanzen für Gebäude - Gradtagszahlen in Deutschland (MS Excel-Anwendung)." [Online]. Available: <http://www.iwu.de/downloads/fachinfos/energiebilanzen/#c205>. [Accessed: 01-Oct-2015].
- [17] M. Großklos, "Kumulierter Energieaufwand verschiedener Energieträgern und -versorgungen - kea.pdf." [Online]. Available: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf. [Accessed: 06-Nov-2015].

- [18] M. Fiebrandt, "Technische und geographische Analyse infrastruktureller Herausforderungen der Energiewende im Hinblick auf Energiespeicherung durch Power-to-Gas, Masterarbeit." Sep-2015.
- [19] "Spezifische CO₂-Emissionen der Stromerzeugung - Strom - NRW - Landesinfo zur Entwicklung Erneuerbarer Energien," *föederal erneuerbar*. [Online]. Available: http://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/NRW/kategorie/strom/auswahl/733-spezifische_co2-emis. [Accessed: 30-Nov-2015].
- [20] M. Schmidt, C. Spitta, and V. Vrangos, "roadmap | KWK.NRW – Einsatz von KWK-Technologien in NRW – Detailfragestellungen und Forschungsagenda; Abschlussbericht zum Verbundprojekt," Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Lehrstuhl für Energietechnik und Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik der Universität Duisburg- Essen, Essen, 2015.
- [21] H. Burger and W. Rogatty, "Überschlägige Ermittlung der erforderlichen Kesselleistung," *IKZ-HAUSTECHNIK*, no. 18/2014, p. S. 44 ff.
- [22] Emscher Lippe Energie GmbH, "Gas- und Strompreise der Ele GmbH für das Projektgebiet InnovationCity Ruhr," 28-May-2015.
- [23] Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen, "Entwicklung der Energiepreise in den zurückliegenden Jahren." [Online]. Available: <http://www.vz-nrw.de/link1125445A.html>. [Accessed: 13-Nov-2015].
- [24] BMWi, "Energiedaten: Gesamtausgabe."
- [25] EEG 2014, *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014)*. 2014, p. 75.
- [26] *Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgeltverordnung - StromNEV)*. 2005.
- [27] EnWG, *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)*. 2005, p. 114.
- [28] ELE Verteilnetz GmbH, "Vermiedene Netznutzungsentgelte für das Projektgebiet InnovationCity Ruhr," 09-Sep-2015.
- [29] *Energiesteuergesetz (EnergieStG)*. 2006.
- [30] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, *RICHTLINIE 2007/2/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE)*. 2007.
- [31] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, "Richtlinien zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW," 17-Jan-2002.
- [32] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, "Richtlinien zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW," 15-Dec-2014. [Online]. Available: <http://www.foerderdatenbank.de/Foerder-DB/Navigation/Foerderrecherche/inhaltsverzeichnis.html?get=212cc7917c762222924228fab352e62c;views;document&doc=10154&typ=RL>. [Accessed: 13-Nov-2015].
- [33] "progres.nrw - progres.nrw." [Online]. Available: <http://www.progres.nrw.de/page.asp?RubrikID=6987>. [Accessed: 13-Nov-2015].
- [34] "Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen aus dem „Programm für Rationelle Energieverwendung, Regenerative Energien und Energiesparen“ (progres.nrw)," Feb. 2013.
- [35] Statistisches Bundesamt, "Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte - Fachserie 5 Heft 1 - 2010," : 205500110900, Mar. 2012.

- [36] Institut Wohnen und Umwelt GmbH, "TABULA WebTool." [Online]. Available: <http://webtool.building-typology.eu/#bm>. [Accessed: 10-Dec-2015].
- [37] Statistisches Bundesamt, "Bevölkerung auf Grundlage des Zensus 2011," 29-Jan-2015. [Online]. Available: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/Zensus_Geschlecht_Staatsangehoerigkeit.html. [Accessed: 20-Oct-2015].
- [38] Forschungszentrum Jülich GmbH, "Klimabericht zum integrierten Klimaschutzkonzept der Stadt Bottrop," Förderprojekt, Jan. 2011.
- [39] N. Diefenbach and T. Loga, "Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung August 2011." Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 25-Aug-2011.
- [40] MINERGIE, "Ermittlung der Heizleistung Allgemeine Informationen." [Online]. Available: https://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/literatur_abschaetzung_heizleistung_minergie.pdf. [Accessed: 26-Nov-2015].
- [41] ARGE IC Ruhr, "Masterplan Klimagerechter Stadtumbau für InnovationCity Ruhr | Modellstadt Bottrop." .
- [42] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, "Energiedaten-NRW-2014." [Online]. Available: http://www.energieagentur.nrw.de/_database/_data/datainfopool/Energiedaten-NRW-2014.pdf. [Accessed: 17-Jul-2015].
- [43] "Modelica and the Modelica Association — Modelica Association." [Online]. Available: <https://modelica.org/>. [Accessed: 22-Jul-2015].
- [44] "Dymola." [Online]. Available: <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola/>. [Accessed: 22-Jul-2015].
- [45] Fraunhofer-Institut für solare Energietechnik, [Online]. Available: <https://www.energy-charts.de/>.
- [46] M. Schönknecht, "Entwicklung eines thermischen Gebäudemodells eines Einfamilienhauses und Simulation verschiedener Betriebsweisen von Mikro-BHKW und Pufferspeicher," Bachelorarbeit, Hochschule RuhrWest, Institut Energiesysteme und Energiewirtschaft, Bottrop, 2015.
- [47] EnergieAgentur.NRW (Hrsg.), "BHKW / KWK (Öl, Erdgas, Flüssiggas)." [Online]. Available: http://www.energieagentur.nrw.de/_database/_data/datainfopool/g-4.pdf. [Accessed: 15-Dec-2015].
- [48] VDI-Fachbereich Energiewandlung und -anwendung, "VDI-Richtlinie 4655: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen," Düsseldorf, May 2008.
- [49] "kwk-infozentrum.info." [Online]. Available: http://www.kwk-infozentrum.info/wiki/index.php?title=EEX_Baseload_Preis. [Accessed: 12-Dec-2015].
- [50] "Die Strom-Einspeisevergütung für Mini-BHKW," 02-Oct-2012. [Online]. Available: <http://www.bhkw-prinz.de/die-strom-einspeisevergutung-fur-mini-bhkw/437>. [Accessed: 12-Oct-2015].
- [51] M. Flayyih, F. Burmeister, S. Stinner, and W. Kraft, "Modelica-Simulation des Systems Nutzer/Gebäude/Anlagentechnik," 2013.
- [52] "Konvektoren - klein, kompakt und voller Energie | kermi.de." [Online]. Available: http://www.kermi.de/de/Waermesysteme/Waerme_uebertragen/Konvektoren/index.php. [Accessed: 22-Jul-2015].

V 2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strategische Forschungsplanung zur KWK-Demonstration des GWI	1
Abbildung 2: Auswertung der Ausschlussraten aufgrund von Mindesteinbringmaßen	5
Abbildung 3: Exemplarische schematische Darstellung der installierten Messtechnik	6
Abbildung 4: Messtechnik: Temperatur- und Feuchtefühler.....	7
Abbildung 5: Messtechnik: Stromzähler: 1-phasig Wechselstrom (links), 3-phasig Drehstrom (rechts)	8
Abbildung 6: Messtechnik: Gaszähler q_p 1,5 und q_p 2,5	9
Abbildung 7: Messtechnik: Wärmemengenzähler q_p 1,5 und q_p 2,5	10
Abbildung 8: Messtechnik: Datenlogger	12
Abbildung 9: Messung der Temperatur an drei Stellen des Pufferspeichers – oben, Mitte, unten – (links) und Anbringung des Oberflächentemperaturfühlers auf dem Stahl-Drucktank (rechts).	14
Abbildung 10: Screenshot der Visualisierung der Strombilanz sowie der Pufferspeichertemperaturen	15
Abbildung 11: WAGO-SPS mit Einplatinen-Computer Odroid-U3 (Pfeil).....	16
Abbildung 12: Raumklima-Sensor („Sensornest“) und typischer Aufstellort.....	17
Abbildung 13: Exemplarisches anonymisiertes Betriebsprognose-Diagramm	23
Abbildung 14: Flussdiagramm zur Anlagenzuordnung.....	23
Abbildung 15: Exemplarischer anonymisierter Anlagenauswahlbogen.....	24
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Realisierungspfade.....	25
Abbildung 17: Exemplarisches Hydraulikschema mit zu verbauender Messtechnik, [10]	28
Abbildung 18: Exemplarischer Elektroschaltplan zur Messtechnikintegration.....	29
Abbildung 19: Sortierte Auftragung der Störungen pro Anlage bis zum 30.11.2015	32
Abbildung 20: Störanfälligkeit in Abhängigkeit von dem Betriebsstundenintervall bis zum 30.11.2015	33
Abbildung 21: Kategoriebezogene Verteilung der Störungen (links) und Störanfälligkeit in Abhängigkeit von dem Betriebsstundenintervall sowie der Kategorie (rechts) bis zum 30.11.2015	33
Abbildung 22: Anonymisierter Teilausschnitt der Messtechnikprüftabelle	34
Abbildung 23: Auszug aus der Datenbankvisualisierung (links) und Kontrollumgebung (rechts)	35
Abbildung 24: Projektverlauf unterteilt in technische und administrative Aufgaben	36
Abbildung 25: Zeitdifferenzierte Projektfortschrittsanalyse	38
Abbildung 26: Auswertung der Projektfortschrittsanalyse	39
Abbildung 27: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel I.....	40
Abbildung 28: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel II	40
Abbildung 29: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel III.....	41
Abbildung 30: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel IV.....	41
Abbildung 31: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel V	42
Abbildung 32: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel VI.....	42
Abbildung 33: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel VII	43
Abbildung 34: Visueller Vorher-Nachher-Vergleich: Beispiel VIII.....	43
Abbildung 35: Verteilung der Objekte nach Gebäudealter im Projekt.....	46
Abbildung 36: Verteilung der Gebäudetypen im Projekt	47
Abbildung 37: Verteilung der Anzahl an Bewohner je Objekt	49
Abbildung 38: Wohnflächenverteilung der Gebäude im Projekt	49
Abbildung 39: Durchschnittlicher Wärmebedarf pro Quadratmeter der Projektgebäude	50

Abbildung 40: Verteilung des jährlichen Strombedarfs pro Person und Haushalt.....	51
Abbildung 41: Verteilung der Energieträger zur Wärmebereitstellung der Altsysteme	52
Abbildung 42: Räumliche Verteilung der 100 Gebäude und Zuordnung zu den Gebäudeklassen	55
Abbildung 43: Bottrop (InnovationCity-Gebiet und Projektgebiet „100 KWK-Anlagen in Bottrop“).....	56
Abbildung 44: Bereitgestellte und bezogene Energiemengen von 52 KWK-Systemen sowie von den Gebäuden während des Projektzeitraumes (IBN der jeweiligen Anlage und Bilanzende 01.10.15)	60
Abbildung 45: Kumulierte Messdaten der Erdgas- und Wärmemengenzähler des Referenzobjekts 221	61
Abbildung 46: Kumulierte Messdaten der Strommengenzähler des Referenzobjekts 221	62
Abbildung 47: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die betrachtete Winterwoche	63
Abbildung 48: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Winterwoche sowie die vorherrschende Außentemperatur	64
Abbildung 49: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die zweite betrachtete Winterwoche	65
Abbildung 50: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Winterwoche sowie die vorherrschende Außentemperatur	65
Abbildung 51: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Übergangswoche sowie die vorherrschende Außentemperatur.....	66
Abbildung 52: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die betrachtete Übergangswoche	67
Abbildung 53: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems in der Sommerwoche sowie die vorherrschende Außentemperatur	68
Abbildung 54: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für die betrachtete Sommerwoche	69
Abbildung 55: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für den betrachteten Wintertag.....	70
Abbildung 56: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems am betrachteten Wintertag sowie die vorherrschende Außentemperatur	70
Abbildung 57: Verlauf der im Objekt ID 211 messtechnisch erfassten Strommengen für den betrachteten Wintertag.....	71
Abbildung 58: Brennstoffeinsatz und bereitgestellte thermische Leistung des KWK-Systems am betrachteten Sommertag sowie die vorherrschende Außentemperatur	72
Abbildung 59: Schematischer Vergleich der Bilanzgrenzen (a) Gebäudehülle und (b) KWK-System. Bei einer Bilanzierung des KWK-Systems mittels der Gebäudehülle als Bilanzgrenze wird der ins öffentliche Netz eingespeiste KWK-Strom nicht berücksichtigt. Dieser substituiert jedoch die Strombereitstellung des deutschen Kraftwerksparks. Weiterhin geht in dieser Bilanzgrenze der Strombezug aus dem öffentlichen Netz ein, der jedoch für die CO ₂ - und Primärenergieeinsparungen des KWK-Systems irrelevant ist. Wird die Bilanzgrenze hingegen direkt um das KWK-System gelegt, werden nur Größen berücksichtigt, die für die Bestimmung der CO ₂ - und Primärenergieeinsparungen des KWK-Systems wesentlich sind.....	74
Abbildung 60: Schematische Darstellung der ökologischen Bilanzierungsmethodik. Die CO ₂ -Emissionen sowie der Primärenergieeinsatz werden für das KWK-System ohne Allokationsverfahren aus dem benötigten Erdgasbezug (Messgröße Gasvolumenstrom) bestimmt. Um die Einsparungen gegenüber den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen zu ermitteln, werden die generierten Erzeugungsprodukte Strom und Wärme auf die entsprechenden konventionellen Versorgungssysteme projiziert. Für weitere Informationen siehe Fließtext.	75

- Abbildung 61: Ermittlung der Jahresnutzungsgrade der zuvor installierten Heizungsanlagen in Abhängigkeit von dem Alter. Die Analyse der Heizungsanlagen ist nicht in Abhängigkeit von der Technologie erfolgt, sondern nach Energieträgerform des benötigten Brennstoffs. (a) für Erdgas betriebene Anlagen weisen die ausgewerteten Daten (blaue Punkte) eine Alters-Abhängigkeit des Nutzungsgrads auf, die für die folgenden Analysen mit der dargestellten Exponentialfunktion beschrieben wird. (b) zeigt die Analyse der (blau) Öl- und (rot) Kohle-Anlagen. Beide Auswertungen lassen auf eine Alters-Unabhängigkeit der Jahresnutzungsgrade schließen, sodass für weitere Berechnungen die Mittelwerte genutzt werden. Für weitere Informationen siehe Fließtext. 78
- Abbildung 62: Schematische Darstellung der Messtechnik zur Erfassung der vom KWK-System generierten elektrischen Energie. Die Messung der elektrischen Energie $E_{el, Mess}$ ist so ausgelegt, dass sie alle elektrischen Verbraucher des Heizungsraumes beinhaltet. Die Messanordnung wurde so gewählt, um die elektrische Energie unabhängig von den variierenden Verbrauchern innerhalb des jeweiligen KWK-Systems zu erfassen. Für weitere Informationen siehe Fließtext. 78
- Abbildung 63: Anpassung der (blau) gemessenen elektrischen Leistung an die vom KWK-System (schwarz) generierten Leistung. Um keine Rückschlüsse auf das KWK-System bzw. den Hersteller zu zulassen, ist auf der Ordinatennachse die elektrische Leistung ohne explizite Werte und in willkürlicher Einheit aufgetragen. Für weitere Informationen siehe Fließtext. 79
- Abbildung 64: Bereitgestellte und bezogene Energiemengen der analysierten 52 KWK-Systeme während des Projektzeitraums (Inbetriebnahme der jeweiligen KWK-Anlage bis Bilanzende 30.09.15). Die KWK-Systeme haben insgesamt 2.318 MWh Erdgas (Heizwert) bezogen und die Wärme von 1.174 MWh sowie die Strommenge von 287 MWh bereitgestellt. Von der bereitgestellten elektrischen Energie wurden 37 % für die Eigenbedarfsdeckung verwendet und die restlichen 182 MWh ins öffentliche Netz eingespeist. 80
- Abbildung 65: Gegenüberstellung der eingesetzten Primärenergien der KWK-Systeme und der ersetzten konventionellen Strom- und Wärmeversorgungssysteme. Für die Bilanzierung der konventionellen Stromversorgung wurde der deutsche Strommix als Brechungsgrundlage angesetzt. Die Daten beziehen sich auf die eingesetzte Primärenergie von insgesamt 52 KWK-Systemen, die die Systeme seit ihrer Inbetriebnahme bezogen haben. Die bilanzierten KWK-Systeme haben in diesem Projekt 38 Erdgas-, 10 Öl- und 4 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt. 82
- Abbildung 66: Gegenüberstellung der ausgestoßenen CO₂-Emissionen der KWK-Systeme und der ersetzten konventionellen Strom- und Wärmeversorgungssysteme. Für die Bilanzierung der konventionellen Stromversorgung wurde der deutsche Strommix als Brechungsgrundlage angesetzt. Die Daten beziehen sich auf die eingesetzte Endenergie von insgesamt 52 KWK-Systemen, die die Systeme seit ihrer Inbetriebnahme ausgestoßen haben. Die bilanzierten KWK-Systeme haben in diesem Projekt 38 Erdgas-, 10 Öl- und 4 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt. 83
- Abbildung 67: Georeferenzierte elektrische Netto-Nennleistungsverteilung in BRD [18]. 85
- Abbildung 68: CO₂-Einsparung der 52 analysierten KWK-Anlagen gegenüber der zuvor installierten konventionellen Energieversorgung während des Projektzeitraums. In dem Diagramm ist der deutsche Strommix dem in NRW gegenübergestellt. 86
- Abbildung 69: Schematische Darstellung der Zahlungsflüsse für (a) ein konventionelles Versorgungssystem und (b) für ein KWK-System. Im Gegensatz zur konventionellen Versorgung entstehen für ein KWK-System Erlöse durch staatliche Förderungen und die Veräußerung des eingespeisten KWK-Stroms. Für weitere Informationen siehe Fließtext. 90
- Abbildung 70: Schematische Darstellung der anfallenden Annuitäten bezüglich der Altanlage in Abhängigkeit von dem Inbetriebnahmezeitpunkt der KWK-Anlage. Es ergeben sich zwei Austauschszenarien in Abhängigkeit von dem Installationszeitpunkt. Im oberen Teil des Zeitstrahls (Fall I) findet die Installation des KWK-Systems nach dem Erreichen der Nutzungsdauer der betrachteten Altanlage statt. In diesem Fall ist die Altanlage vollständig abgeschrieben und in der Gesamtannuität entfallen die kapitalgebundenen Kosten. Um das erhöhte Risiko für Instandhaltungsmaßnahmen nach dem Erreichen der Nutzungsdauer zu berücksichtigen, wird in dem Berechnungsverfahren ein zusätzlicher Kostenpunkt AN, BT implementiert. Für

den zweiten Fall II (untere Bereich des Zahlenstrahls) wird die KWK-Anlage zum Zeitpunkt installiert, in dem die Nutzungsdauer der Altanlage noch nicht abgelaufen ist. Diese läuft jedoch innerhalb des Betrachtungszeitraums der Bilanzierung ab, sodass im Betrachtungszeitraum zwei Intervalle mit unterschiedlichen Gesamtannuitäten existieren. Für weitere Informationen siehe Fließtext.	93
Abbildung 71: Ökonomische Gegenüberstellung des installierten KWK-Systems und der zuvor genutzten Altanlage. Für das KWK-System sind weiterhin die wirtschaftlichen Auswirkungen der verschiedenen Fördersituation auf Bundes- (BAFA), NRW- (BAFA + NRW) und Projektebene (Projektpreis) angefügt. In der hinzugefügten Tabelle sind die Gesamtannuitäten (Σ) sowie die Differenzbeträge (Δ) zu den anfallenden Kosten des zuvor genutzten Versorgungssystems zusammengefasst. Für weitere Informationen siehe Fließtext.....	103
Abbildung 72: Gesamtheitliche Betrachtung aller 34 bilanzierten Anlagen für verschiedene Berechnungsszenarien. Die angefügten Kosten beziehen sich auf die Differenz zwischen der im Betrachtungszeitraum anfallenden Gesamtzahlungen der KWK-Systeme und Altanlagen. In der dargestellten Abbildung sind für die Differenzzahlungen durch die oberen und unteren Grenzen der grauen Felder die Standardabweichungen der mittleren Zahlungen gegeben. Dementsprechend stellt das Zentrum eines grauen Feldes den Mittelwert aller betrachteten Differenzzahlungen dar. Die an den Feldern angefügten Linien markieren hingegen die höchsten und niedrigsten Differenzzahlungen der analysierten Systeme. Ferner gibt N die Anzahl der bilanzierten Systeme für das jeweilige Szenario an. Die grüne Markierung stellt den Bereich dar, in den der Austausch des Altsystems wirtschaftlich sinnvoll war. Für weitere Informationen siehe Fließtext.	107
Abbildung 73: Gesamtheitliche Betrachtung von 30 bilanzierten Anlagen für verschiedene Berechnungsszenarien. In der dargestellten Bilanzierung wurden im Vergleich zu Abbildung 72 drei Systeme in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese besonders stark von den restlichen analysierten Anlagen abweichen. Für weitere Informationen siehe Fließtext.....	109
Abbildung 74: CO ₂ -Einsparungen der 34 ökonomisch bilanzierten KWK-Systeme für die Betrachtungsebenen Bundesrepublik (Strommix Bund) und NRW (Strommix NRW). Die Auswertung bezieht sich auf die erfassten Jahresdaten der 34 ersetzten Systeme und beinhaltet die in Kapitel 3.3.1 beschriebene Stromkorrektur bezüglich der erfassten Messdaten. Die bilanzierten KWK-Systeme haben 25 Erdgas-, 6 Öl- und 3 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt.	110
Abbildung 75: CO ₂ -Einsparungskosten in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform und der Kombination verschiedener Betrachtungsvarianten.....	112
Abbildung 76: Wärme- und Strombereitstellung der 100 installierten KWK-Systeme im Projekt pro Jahr. Die bereitgestellte Wärme setzt sich aus den messtechnisch erfassten Jahresdaten der 34 KWK-Systeme und dem ermittelten Wärmebedarf der restlichen 66 Objekte aus Tabelle 43 zusammen. Aus dem Wärmebedarf der 66 KWK-Systeme wurde mit dem ermittelten Übertragungsschlüssel (siehe Kapitel 3.3.7.3) die von diesen Systemen generierte elektrische Energie abgeleitet. Die Summe über diese Energiemengen und der elektrischen Energie, der 34 messtechnisch erfassten Systeme, stellt die generierte elektrische Energie aller 100 KWK-Anlagen pro Jahr dar. Zu beachten ist, dass die bereitgestellten Energiemengen der Energieträger Strom und Flüssiggas um den Faktor zehn vergrößert dargestellt sind.	122
Abbildung 77: CO ₂ -Einsparung der 100 installierten KWK-Systeme in Relation zu den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen. Für die Energieträgerformen Erdgas, Öl und Kohle sind die Ergebnisse direkt aus der Wärmebereitstellung dieser Energieträger mittels der ermittelten Wärme normierten Faktoren hochgerechnet worden. Die Berechnung der Einsparungen bezüglich der Energieträger Strom und Flüssiggas erfordert hingegen noch eine Annahme zum Jahresnutzungsgrad der Altanlagen, da diese Energieträger aufgrund fehlender Jahresdaten nicht bilanziert werden konnten. Zu beachten ist, dass die Einsparungen des Energieträgers Flüssiggas um den Faktor zehn vergrößert dargestellt sind. Für weitere Informationen siehe Fließtext.....	123
Abbildung 78: Primärenergieeinsparungen der 100 installierten KWK-Systeme in Relation zu den zuvor genutzten Energieversorgungssystemen. Für die Energieträgerformen Erdgas, Öl und Kohle sind die	

Ergebnisse direkt aus der Wärmebereitstellung dieser Energieträger mittels der ermittelten Wärme normierten Faktoren hochgerechnet worden. Die Berechnung der Einsparungen bezüglich der Energieträger Strom und Flüssiggas erfordert hingegen noch eine Annahme zum Jahresnutzungsgrad der Altanlagen, da diese Energieträger aufgrund fehlender Jahresdaten nicht bilanziert werden konnten. Für weitere Informationen siehe Fließtext. 124

Abbildung 79: Gesamtwärmebedarf für das Projektgebiet InnovationCity in Abhängigkeit von der eingesetzten Energieträgerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom. 127

Abbildung 80: CO₂-Einsparungen im Projektgebiet InnovationCity für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform 128

Abbildung 81: Primärenergieeinsparungen im Projektgebiet InnovationCity für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform 128

Abbildung 82: Gesamtwärmebedarf für die Betrachtungsebene Bottrop in Abhängigkeit von der eingesetzten Energieträgerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom. 130

Abbildung 83: CO₂-Einsparungen auf der Betrachtungsebene Bottrop für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform 131

Abbildung 84: Primärenergieeinsparungen auf der Betrachtungsebene Bottrop für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform 131

Abbildung 85: Gesamtwärmebedarf für die Betrachtungsebene NRW in Abhängigkeit von der eingesetzten Energieträgerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom. 132

Abbildung 86: CO₂-Einsparungen auf der Betrachtungsebene NRW für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform 133

Abbildung 87: Primärenergieeinsparungen auf der Betrachtungsebene NRW für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform 133

Abbildung 88: CO₂-Einsparung der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers 134

Abbildung 89: Primärenergieeinsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers 135

Abbildung 90: Gesamtwärmebedarf auf Bundesebene in Abhängigkeit von der eingesetzten Energieträgerform bzw. Technologie zur Wärmebereitstellung. Die unteren Kreisdiagramme stellen für das angefügte Szenario die von den KWK-Systemen bereitgestellte Wärme sowie den hierbei generierten Strom..... 136

Abbildung 91: CO₂-Einsparungen auf Bundesebene für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform..... 137

Abbildung 92 Primärenergieeinsparungen auf Bundesebene für das angefügte Szenario in Abhängigkeit von der ersetzten Energieträgerform..... 137

Abbildung 93: CO₂-Einsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers 138

Abbildung 94: Primärenergieeinsparungen der betrachteten Energieträgerformen in Abhängigkeit von der anteiligen Substitution bezüglich der Wärmebereitstellung des jeweiligen Energieträgers 138

Abbildung 95: Verschiedene Ebenen in Modelica / DYMOLA 140

Abbildung 96: Grundlegender Modellaufbau mit den drei Hauptkomponenten: Aufbereitung der Wetterdaten, Thermische Gebäudehülle, Versorgungssystem 140

Abbildung 97: Vorgehensweise zur Modellierung der Gebäudehülle in Modelica	142
Abbildung 98: Außentemperaturen der Referenzgebäude und Lufttemperatur in Bredeneu	143
Abbildung 99: Referenzzeiträume Heizperiode, Übergang, Nichtheizperiode; anhand gemittelter Extrema	144
Abbildung 100: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf in der Heizperiode	146
Abbildung 101: Gebäudeheizleistung in der Heizperiode	147
Abbildung 102: Kumulierte Heizwärmeabweichung in der Heizperiode	147
Abbildung 103: Kumulierten Brauchwarmwasserwärme mit Bedarfsspitze am Freitag in der Heizperiode	148
Abbildung 104: Gegenüberstellung der simulierten Raumtemperaturen in den verschiedenen Zonen und der gemessenen Außentemperatur in der Heizperiode	149
Abbildung 105: Kumulierte KWK-Stromproduktion in der Heizperiode	150
Abbildung 106: Elektrische Leistung der KWK-Anlage in der Heizperiode	150
Abbildung 107: Kumulierter Brennstoffverbrauch in der Heizperiode	151
Abbildung 108: Kumulierter Heizbedarf im Übergangszeitraum	151
Abbildung 109: Gebäudeheizleistung im Übergangszeitraum	152
Abbildung 110: Kumulierte Heizwärmeabweichung im Übergangszeitraum	152
Abbildung 111: Gegenüberstellung der simulierten Raumtemperaturen in den verschiedenen Zonen und der gemessenen Außentemperatur im Übergangszeitraum	153
Abbildung 112: Kumulierte Brauchwarmwasserwärme im Übergangszeitraum	153
Abbildung 113: Kumulierte KWK-Stromproduktion im Übergangszeitraum	154
Abbildung 114: Elektrische Leistung der KWK-Anlage im Übergangszeitraum	154
Abbildung 115: Kumulierter Brennstoffverbrauch im Übergangszeitraum	155
Abbildung 116: Stromeinspeisung im Übergangszeitraum	155
Abbildung 117: Strombezug im Übergangszeitraum	156
Abbildung 118: Kumulierter Heizwärmebedarf in der Nichtheizperiode	157
Abbildung 119: Gebäudeheizleistung in der Nichtheizperiode	157
Abbildung 120: Gegenüberstellung der simulierten Raumtemperaturen in den verschiedenen Zonen und der gemessenen Außentemperatur in der Nichtheizperiode	158
Abbildung 121: Kumulierte Brauchwarmwasserwärme mit Bedarfsspitze am Freitag in der Nichtheizperiode	158
Abbildung 122: Kumulierte Brennstoffverbräuche in der Nichtheizperiode	159
Abbildung 123: Kumulierte KWK-Stromproduktion in der Nichtheizperiode	160
Abbildung 124: Elektrische Leistung der KWK-Anlage in der Nicht-Heizperiode	160
Abbildung 125: Stromeinspeisung in der Nicht-Heizperiode	161
Abbildung 126: Strombezug in der Nicht-Heizperiode	161
Abbildung 127: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf in der Heizperiode	162
Abbildung 128: Gebäudeheizleistung des MFH in der Heizperiode	162
Abbildung 129: Kumulierte Heizwärmeabweichung in der Heizperiode	163
Abbildung 130: kumulierter Brauchwasserwärmebedarf in der Heizperiode nach Norm im Vergleich zur Speicherbilanz mit und ohne Wärmeverluste des Speichers nach DIN EN 12897	164
Abbildung 131: Zonentemperaturen des MFH in der Heizperiode	164
Abbildung 132: Kumulierte ZHG-Wärme des MFH in der Heizperiode	165
Abbildung 133: Kumulierte KWK-Wärme des MFH in der Heizperiode	165
Abbildung 134: Elektrische Leistung der KWK-Anlage im MFH in der Heizperiode	166

Abbildung 135: Kumulierter KWK-Strom des MFH in der Heizperiode	166
Abbildung 136: Kumulierte Brennstoffverbräuche des MFH in der Heizperiode	167
Abbildung 137: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf des MFH im Übergangszeitraum mit Abweichung durch nicht darstellbares Bewohnerverhalten.....	167
Abbildung 138: Gebäudeheizleistung des MFH im Übergangszeitraum	168
Abbildung 139: Zonentemperaturen des MFH im Vergleich zur Umgebungstemperatur mit erkennbarem Solarstrahlungseinfluss im Übergangszeitraum.....	168
Abbildung 140: Kumulierter Brauchwasserwärmebedarf des MFH nach Norm im Vergleich zur Speicherbilanz mit und ohne Wärmeverluste des Speichers nach DIN EN 12897 im Übergangszeitraum	169
Abbildung 141: Kumulierte KWK-Wärme des MFH im Übergangszeitraum mit erkennbar reduziertem Heizwärmebedarf des Gebäudemodells.....	169
Abbildung 142: Kumulierter Brennstoffverbrauch des MFH mit erkennbar reduziertem Heizwärmebedarf des Modells im Übergangszeitraum.....	170
Abbildung 143: Kumulierter Gebäudeheizwärmebedarf des MFH in der Nichtheizperiode mit deutlicher Abweichung aufgrund des nicht darstellbaren Bewohnerverhaltens	170
Abbildung 144: Gebäudeheizleistung des MFH in der Nichtheizperiode mit erkennbarer Reaktion des Modells um 15 °C und unerwartet durchgängiger Beheizung des Objekts bei > 15 °C.....	171
Abbildung 145: Zonentemperaturen des MFH in der Nichtheizperiode mit Vergleich zur Umgebungstemperatur	171
Abbildung 146: Kumulierter Brauchwasserwärmebedarf nach Norm im Vergleich zur Speicherbilanz mit negativer Abweichung vermutlich aufgrund Ferienzeit	172
Abbildung 147: Kumulierte KWK-Wärme des MFH in der Nichtheizperiode mit nur sehr geringer Betriebszeit aufgrund einer Störung der Anlage.....	172
Abbildung 148: Kumulierte ZHG-Wärme des MFH in der Nichtheizperiode mit abweichender Wärmeproduktion aufgrund reduziertem Heizverhaltens und erhöhtem Brauchwarmwasserbedarfs	173
Abbildung 149: Kumulierter Brennstoffverbrauch des MFH in der Nichtheizperiode mit erkennbar reduziertem Heizwärmebedarf des Gebäudemodells.....	173
Abbildung 150: Qualitativer Wärmebedarf eines Gebäudes über einen Jahreszeitraum.....	174
Abbildung 151: Verteilung der simulierten thermischen Leistung	175
Abbildung 152: Darstellung der thermischen Leistung im Gebäude vom 01. bis 02. Januar	175
Abbildung 153: Qualitative Darstellung des monatlichen Anteils der KWK-Wärme- und Strombereitstellung im Vergleich zu dem gesamten Wärmebedarf des Gebäudes	176
Abbildung 154: Absolute und relative Abweichung der KWK-Stromproduktion	177
Abbildung 155: Absolute und relative Abweichung des Normgasverbrauchs	178
Abbildung 156: KWK-Strombereitstellung von insgesamt 25 KWK-Anlagen für drei Zeitspannen mit verschiedenen Witterungsverhältnissen sowie die mittleren Lufttemperaturen (schwarz gestrichelte Graphen)	180
Abbildung 157: KWK-Stromeinspeisung von insgesamt 25 KWK-Anlagen für drei Zeitspannen mit verschiedenen Witterungsverhältnissen sowie die mittleren Lufttemperaturen (schwarz gestrichelte Graphen)	181
Abbildung 158: KWK-Strombezug von insgesamt 25 KWK-Anlagen für drei Zeitspannen mit verschiedenen Witterungsverhältnissen sowie die mittleren Lufttemperaturen (schwarz gestrichelte Graphen).....	181
Abbildung 159: Monatliche Stromerzeugung in Deutschland für das Jahr 2014 [45]	183
Abbildung 160: Monatliche Stromerzeugung (EE) in Deutschland 2014 [45]	183

Abbildung 161: Profile von Netzspannung, Wirkleistung und Blindleistung; gemessen am 31.10.2015 am Einphasen-Nano-BHKW „Brötje EcoGen WGS“ (1 kW) in Referenzgebäude RH1	184
Abbildung 162: Häufigkeitsverteilung und kumulative Verteilungsfunktion von Netzspannung sowie Wirk- und Blindleistung des Einphasen-Nano-BHKW „Brötje EcoGen WGS“ über den gesamten Messzeitraum (29.10.15 17:33 Uhr – 02.11.15 09:03 Uhr).....	185
Abbildung 163: Netzqualität (Netzspannung und Netzfrequenz) im gesamten Messzeitraum	185
Abbildung 164: Exemplarische 5-Minutenwerte der KWK-Einspeiseleistung in einer Winterwoche ergänzt durch die mögliche Anwesenheit eines Elektroautos	187
Abbildung 165: Reichweite (orange) und Verbrauch (grau) verschiedener Elektroautos.....	188
Abbildung 166: Tägliche KWK-E-Mobility-Reichweite am Beispiel Bottrop (von innen nach außen: 13/2 km; 21/2 km; 21 km One Way).....	189
Abbildung 167: Eigenverbrauchsquoten für den erzeugten BHKW-Strom im Zeitraum Dezember 2014 bis August 2015	190
Abbildung 168: Profile der BHKW-Stromerzeugung, der Stromeinspeisung ins öffentliche Stromnetz und des Gebäudestromverbrauchs von RH1 am 01.07.2015. Auffällig ist der hohe Grundlastbedarf des Gebäudes, der zu einem hohen Strom-Eigenverbrauch von ca. 89 % an diesem Tag führt, da nur sehr wenig Strom ins Netz eingespeist werden muss.	191
Abbildung 169: Profile der BHKW-Stromerzeugung, der Stromeinspeisung ins öffentliche Stromnetz und des Gebäudestromverbrauchs von EFH am 04.03.2015.	192
Abbildung 170: Monatliche Autarkiequoten von Dezember 2014 bis August 2015	193
Abbildung 171: Stromprofile von RH2 am 12.01.2015. An diesem Tag wurden lediglich ca. 19 % des Gebäudestromverbrauchs durch selbstverbrauchten BHKW-Strom bereitgestellt (Autarkiequote).	194
Abbildung 172: Profil des Wärmebedarfs und der Wärmeerzeugung am 12.01.2015 in RH2. Da die Wärmemengen nur mit einer Auflösung von 1 kWh gemessen wurden, werden sie auf der y-Achse in der Einheit kWh/h dargestellt.	195
Abbildung 173: Verlauf der Temperaturen im Pufferspeicher (oben, Mitte, unten) in RH2 am 24.03.2015. Auf der sekundären y-Achse ist die BHKW-Stromerzeugung dargestellt, um die Laufzeiten des BHKW anzuzeigen.....	197
Abbildung 174: Thermisches Gebäudemodell der Doppelhaushälfte RH1 [46].....	198
Abbildung 175: Simulierte Raumluft- und Innenwand-Temperaturen im Erdgeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015.....	200
Abbildung 176: Simulierte Außenwand-Temperaturen im Erdgeschoss und 1. Obergeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015	201
Abbildung 177: Simulierte Raumluft- und Innenwand-Temperaturen im 1. Obergeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015.....	202
Abbildung 178: Simulierte Raumluft-Temperaturen im Dach- und Kellergeschoss in RH1 am 24.02.2015 und 25.02.2015.....	204
Abbildung 179: Komponenten und Kommunikationswege des an der HRW entwickelten Home-Automation-Systems auf Basis von openHAB	205
Abbildung 180: Screenshots der openHAB-Visualisierung: Schieberegler zur Veränderung der Soll-Temperatur (links) und Tages-Heizprofil für einen Raum (rechts)	206
Abbildung 181: Vorgegebenes Heizprofil und gemessene Raumtemperatur im Wohnzimmer von RH3 am 22.11.2015.....	208
Abbildung 182: Exemplarischer Tagesverlauf: Untersuchung der thermischen Bilanzen.....	211
Abbildung 183: Exemplarischer Tagesverlauf: Untersuchung der elektrischen Bilanzen	212
Abbildung 184: Exemplarischer Tagesverlauf: Energieverschiebung durch Stromspeicher	213

Abbildung 185: Jahresverlaufsanalyse: Tagesmittlerer Außentemperaturverlauf.....	214
Abbildung 186: Jahresverlaufsanalyse: Tagesmittlere Strom- und Wärmespeicherladezustände.....	214
Abbildung 187: Parametervariation: Vergleich der Stromeigennutzungsanteile	216
Abbildung 188: Beteiligte Akteure im Anmelde- und Meldeverfahren von KWK-Anlagen.....	220
Abbildung 189: Übersicht der Anmeldeformalitäten vor Inbetriebnahme	221
Abbildung 190: Übersicht der einmaligen Anmeldeformalitäten nach Inbetriebnahme	222
Abbildung 191: Übersicht der regelmäßigen Anträge nach Inbetriebnahme	222
Abbildung 192: Feierliche Einweihung der ersten KWK-Anlage im Projekt.....	224
Abbildung 193: Der Anlagenbetreiber ist glücklich über das neue System	225
Abbildung 194: Der Fachinstallateur beschreibt das neu installierte KWK-System.....	226
Abbildung 195: Einblick in die Anlagenperipherie.....	227
Abbildung 196: Der Anlagenbesitzer präsentiert die Bedieneroberfläche der Anlage.....	228
Abbildung 197: Fragebogen ICM (Wohnungseigentümer) | Teil 1	XXVIII
Abbildung 198: Fragebogen ICM (Wohnungseigentümer) | Teil 2	XXIX
Abbildung 199: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen) | Teil 1.....	XXX
Abbildung 200: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen) | Teil 2.....	XXXI
Abbildung 201: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen) | Teil 3.....	XXXII
Abbildung 202: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD) | Teil 1	XXXIII
Abbildung 203: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD) | Teil 2	XXXIV
Abbildung 204: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD) | Teil 3	XXXV
Abbildung 205: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD) | Teil 4	XXXVI
Abbildung 206: Vorgehen bei den Vor-Ort Begehungen | Terminplanung | Folie 1.....	XXXVII
Abbildung 207: Vorgehen bei den Vor-Ort Begehungen | Terminplanung | Folie 2.....	XXXVII
Abbildung 208: Vorgehen bei den Vor-Ort Begehungen | Ablauf der Vor-Ort-Begehung.....	XXXVIII
Abbildung 209: Inbetriebnahmeprotokoll: Messtechnik	XXXIX
Abbildung 210: Checkliste Elektroinstallationsschaltplan.....	XL
Abbildung 211: Kontaktdaten-Blatt zur Anmeldung	XLI
Abbildung 212: Infoblatt zum Vorgehen bei Störungen	XLII
Abbildung 213: KWK-Logbuch.....	XLIII
Abbildung 214: Arbeitsflussdiagramm der beteiligten Akteure bis zur Installation	XLIV
Abbildung 215: Verschiedene Ebenen in Modelica / DYMOLA	XLIX
Abbildung 216: Mehrzonenmodell mit Randbedingungen ohne Heizkreis	LI
Abbildung 217: Modell Obergeschoss zusammen mit der Hydraulik im GWI-Demonstrationshaus.....	LII
Abbildung 218: Obergeschoss mit Hydraulikmodell im Demonstrationshaus	LIII
Abbildung 219: Modellierung eines Referenzgebäudes als Ein-Zonenmodell in Modelica	LIV
Abbildung 220: Querschnitte des Einfamilienhauses mit dargestellten thermischen Flächen.	LV
Abbildung 221: Querschnitte des Mehrfamilienhauses mit thermischen Flächen und inneren Strömen.	LVI
Abbildung 222: Modell der KWK-Anlage ohne Regelung (Stirling, Otto und Brennstoffzelle).....	LVIII
Abbildung 223: Modelica Struktur des Wärmespeichers.....	LVIII
Abbildung 224: Regelungsmodell einer Stirling KWK-Anlage (BRÖTJE EcoGen).....	LX
Abbildung 225: In Modelica abgebildetes Gesamtsystem	LXI
Abbildung 226: Darstellung der mobilen Applikation | Teil 1	LXII

Abbildung 227: Darstellung der mobilen Applikation | Teil 2.....LXII
Abbildung 228: Darstellung der Projekthomepage LXIII

V 3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eingesetzte Systeme im Projekt „100 KWK-Anlagen in Bottrop“	4
Tabelle 2: Mindesteinbringmaße für die Systemkomponenten der eingesetzten Anlagenpakete, [1]–[6]	5
Tabelle 3: Messtechnische Eigenschaften: Temperatur- und Feuchtefühler	7
Tabelle 4: Messtechnische Eigenschaften: Stromzähler: 1-phasig Wechselstrom, 3-phasig Drehstrom	8
Tabelle 5: Messtechnische Eigenschaften: Gaszähler q_p 1,5 und q_p 2,5.....	9
Tabelle 6: Messtechnische Eigenschaften: Wärmemengenzähler q_p 1,5 und q_p 2,5.....	11
Tabelle 7: Gradtagzahlen nach VDI 2067, 2009-2012 sowie 10-jähriges Mittel, Standort Düsseldorf	20
Tabelle 8: Baualtersklasse und Gebäudetyp nach IWU (Institut Wohnen und Umwelt) mit resultierendem Gebäudeschlüssel [12].....	53
Tabelle 9: Prozentuale Baualtersklassenverteilung in Deutschland [12].....	54
Tabelle 10: Prozentuale Baualtersklassenverteilung im InnovationCity-Gebiet in Bottrop.....	54
Tabelle 11: Prozentuale Baualtersklassenverteilung im Kontingent „100 KWK-Anlagen in Bottrop“	54
Tabelle 12: Vereinfachte prozentuale Baualtersklassenverteilung im InnovationCity-Gebiet.....	57
Tabelle 13: Vereinfachte prozentuale Verteilung im Projektgebiet „100 KWK-Anlagen in Bottrop“	57
Tabelle 14: Verteilung InnovationCity auf 10 Referenzgebäude übertragen	57
Tabelle 15: Verteilung „100 KWK-Anlagen in Bottrop“ auf 10 Referenzgebäude übertragen	57
Tabelle 16: Genäherte Übertragung auf die 10 Referenzgebäude	58
Tabelle 17: Tabellarische Auflistung der wichtigsten Objektparameter der Referenzgebäude, Teil 1	58
Tabelle 18: Tabellarische Auflistung der wichtigsten Objektparameter der Referenzgebäude, Teil 2	59
Tabelle 19: Gradtagzahlen und Heiztage nach VDI 2067 Blatt 1 für den Standort Düsseldorf. Die Daten sind der IWU-Datenbank [16] entnommen. Das zehnjährige Mittel bezieht sich auf den Zeitraum zwischen dem Jahr 2005 und 2014.	77
Tabelle 20: Primärenergiefaktoren für die eingesetzten Energieträgerformen im Projekt [4]	81
Tabelle 21: Spezifische CO ₂ -Emissionen für die eingesetzten Energieträgerformen im Projekt [17].....	83
Tabelle 22: Angesetzte Anschaffungskosten der KWK-Systeme (KWK-Anlage, Zusatzheizgerät und Wärmespeicher).....	91
Tabelle 23: Mittlere Installationskosten in Abhängigkeit von der Technologie und der elektrischen Leistung P_{el} . Für die Ermittlung der Kosten wurden alle Rechnungen der Installationen bezüglich der aufgelisteten Kostenpunkte analysiert, um projektspezifische Kosten herauszufiltern. Die angesetzten Installationskosten beinhalten nur Personal- und Materialkosten.	92
Tabelle 24: Nutzungsdauer der ersetzten Altanlagen in Abhängigkeit von der Energieträgerform des verwendeten Brennstoffs. Die Nutzungsdauern wurden nach VDI 2067 Blatt 1 angesetzt.....	94
Tabelle 25: Im Projekt ermittelte Instandhaltungskosten (gerundete Beträge) für die eingesetzten KWK-Systeme. Die Kosten sind in Abhängigkeit von der Technologie und der elektrischen Leistung P_{el} angeführt.....	95
Tabelle 26: Faktoren für den Aufwand bezüglich Instandsetzung sowie Wartung und Inspektion der betrachteten Altanlagen in Abhängigkeit von der Energieträgerform. Die angeführten Faktoren wurden der VDI 2067 Blatt 1 entnommen.	96
Tabelle 27: Energiepreise und Preisänderungssätze in Abhängigkeit von der Energieträgerform. Die Preise beinhalten neben dem Arbeitspreis des jeweiligen Energieträgers auch den entsprechenden Grundpreis. Bis auf den Energieträger Erdgas, beziehen sich alle Preisangaben auf den Heizwert. Der Erdgas-Preis bezieht sich auf den Brennwert, da dieser für die Versorgungsunternehmen die Grundlage in ihren Abrechnungen bildet.....	97

Tabelle 28: Zu leistender EEG-Umlageanteil in Abhängigkeit von dem Zeitraume der Stromeigennutzung [25]. Der Umlageanteil bezieht sich auf die jeweilige zeitliche vorliegende EEG-Umlage. Für Anlagen mit einer maximalen elektrischen Nennleistung von 10 kW wird eine Freimenge von 10.000 kWh pro Jahr bezüglich der Stromeigennutzung gewährt.....	98
Tabelle 29: Kontinuierliche Einnahmen für den Betrieb einer KWK-Anlage. Die Erlöse in den ersten zehn Jahren unterscheiden sich zu den darauf folgenden Jahren, da die KWK-Zulage entfällt und für die Energiesteuer nur noch eine Teilentlastung gewährt wird.....	100
Tabelle 30: Einnahmen durch BAFA-Förderung [14, 15]	100
Tabelle 31: Voraussetzungen für den Erhalt des Stromeffizienzbonus [32]	101
Tabelle 32: Einnahmen durch die NRW-Förderung [34].....	101
Tabelle 33: Anfallende Annuitäten für das betrachtete KWK-System aus Abbildung 71 für die verschiedenen Fördersituationen auf Bundes-, Landes- und Projektebene	105
Tabelle 34: Annuitäten der ersetzten Altanlage aus Abbildung 71. Da die Nutzungsdauer der Anlage überschritten wurde, ist sie im wirtschaftlichen Sinne vollständig abgeschrieben, sodass keine kapitalgebundenen Kosten anfallen. Um einen Einblick in die Höhe der anfallenden kapitalgebundenen Kosten zu erhalten, sind diese in Grau angefügt.	106
Tabelle 35: Erfasste Jahresdaten von 34 KWK-Systemen sowie Ergebnisse der ökologischen Bilanzierung dieser KWK-Systeme und der zuvor genutzten konventionellen Energieversorgung. Die bilanzierten KWK-Systeme haben 25 Erdgas-, 6 Öl- und 3 Kohle- Heizungsanlagen ersetzt.	115
Tabelle 36: Ermittlung des Wärmebedarfs der bewohnten Wohngebäude auf Bundesebene mittels des Mikrozensus von 2010 [35] und der TABULA-Datenbank vom Institut Wohnen und Umwelt [36]	116
Tabelle 37: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf Bundesebene. Die Auswertung wurde Anhand der Datenerhebung des Mikrozensus 2010 bezüglich der „überwiegend verwendeten Energieart der Beheizung“ und des ermittelten Gesamtwärmebedarfs aus Tabelle 36 durchgeführt.	117
Tabelle 38: Ermittlung des Wärmebedarfs der bewohnten Wohngebäude auf Landesebene NRW mittels des Mikrozensus von 2010 [22] und der TABULA-Datenbank vom Institut Wohnen und Umwelt [23]	118
Tabelle 39: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf Landesebene NRW. Die Auswertung wurde Anhand der Datenerhebung des Mikrozensus 2010 bezüglich der „überwiegend verwendeten Energieart der Beheizung“ und des ermittelten Gesamtwärmebedarfs aus Tabelle 37 durchgeführt.	118
Tabelle 40: Ermittlung des Wärmebedarfs der bewohnten Wohngebäude auf Gemeindeebene Bottrop mittels des Zensus von 2011 [37], der TABULA-Datenbank vom Institut Wohnen und Umwelt [23] und der Anagbe zur durchschnittlichen Wohnfläche aus [38]	119
Tabelle 41: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf der Gemeindeebene Bottrop. Für die Auswertung wurde der Verteilungsschlüssel der Landesebene NRW bezüglich der anteiligen Wärmebereitstellung der jeweiligen Energieträgerform auf den ermittelten Wärmebedarf für die Gemeinde Bottrop aus Tabelle 40 angewendet.	119
Tabelle 42: Anteil an der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit von der Energieträgerform (Technologie) auf der Projektebene InnovationCity. Für die Auswertung wurde der Verteilungsschlüssel der Landesebene NRW bezüglich der anteiligen Wärmebereitstellung der jeweiligen Energieträgerform angesetzt.....	120
Tabelle 43: Wärmebedarf der nicht bilanzierten 66 Objekte bzw. installierten KWK-Systeme. Der Wärmebedarf wurde aus den Angaben der Betreiber bezüglich des Energiebezugs zur Wärmebereitstellung abgeleitet. Falls hierzu keine Angaben vorlagen wurde der Wärmebedarf anhand der Gebäudeklasse mittels des spezifischen Wärmebedarfs aus der TABULA-Datenbank bestimmt.....	121
Tabelle 44: Prozentuale CO ₂ -Einsparungen der 100 KWK-Systeme gegenüber den zuvor gegenutzten konventionellen Energieversorgungssystemen in Abhängigkeit von dem ersetzten Energieträger. Die	

prozentualen Einsparungen bleiben bei der Übertragung der im Projekt bestimmten Ergebnisse auf verschiedene Betrachtungsebenen erhalten.	124
Tabelle 45: Prozentuale Primärenergieeinsparungen der 100 KWK-Systeme gegenüber den zuvor gegenutzten konventionellen Energieversorgungssystemen in Abhängigkeit von dem ersetzten Energieträger. Die prozentualen Einsparungen bleiben bei der Übertragung der im Projekt bestimmten Ergebnisse auf verschiedene Betrachtungsebenen erhalten.	125
Tabelle 46: Auflistung der genutzten Wetterstationen und der jeweils bezogenen Messgrößen	142
Tabelle 47: Zeitintervalle der definierten Referenzzeiträume	144
Tabelle 48: Aufteilung eines Jahres in drei Zeiträume	174
Tabelle 49: Stromeigenennutzungs- und Stromdeckungsanteil der 25 KWK-Anlagen.....	182
Tabelle 50: Statistische Kenngrößen der Netzqualität (Netzspannung und Netzfrequenz) sowie des Leistungsfaktors im gesamten Messzeitraum	186
Tabelle 51: Harmonische (alle Zahlen sind 95 %-Werte)	186
Tabelle 52: Zur Verfügung stehenden Strommengen sowie die resultierenden E-Mobility-Kilometer	188
Tabelle 53: Wärmekapazität eines 750 l-Pufferspeichers	196
Tabelle 54: Auszug der Zusammenarbeit mit unterschiedlichen lokalen und regionalen Medien	223
Tabelle 55: Auszug von Vorträgen auf nationalen sowie internationalen Fachkonferenzen	223
Tabelle 56: Auszug von Fachpublikationen	224
Tabelle 57: Berechnung des Wärmebedarfs im Projektgebiet InnovationCity	XLVIII
Tabelle 58: Ökonomische und rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Mikro-BHKWs in Wohngebäuden in Deutschland (2015). [47][49]	L
Tabelle 59: Eine Übersicht der verwendeten Heizungstechnologien und WWS Modelle	LVII
Tabelle 60: Beschreibung der Parameter für den Wärmespeicher	LIX

6 Anhang

A1	Fragebogen ICM (Wohnungseigentümer)	XXVIII
A2	Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen)	XXX
A3	Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD)	XXXIII
A4	Standardisiertes Vorgehen: Vor-Ort Begehungen	XXXVII
A5	Inbetriebnahmeprotokoll: Messtechnik	XXXIX
A6	Kontaktdaten-Blatt zur Anmeldung	XLI
A7	Infoblatt zum Vorgehen bei Störungen	XLII
A8	Mitmacher Logbuch	XLIII
A9	Arbeitsflussdiagramm der beteiligten Akteure	XLIV
A10	Fragebogen HRW (Referenzobjekte)	XLV
A11	Wärmebedarfsberechnung InnovationCity	XLVIII
A12	Einblick in Modelica / DYMOLA	XLIX
A13	Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen	L
A14	Detaillierte Beschreibung der Modelica Modelle	LI
A15	Screenshots openHAB-Visualisierung	LXII
A16	Screenshot der Projekthomepage	LXIII

A1 Fragebogen ICM (Wohnungseigentümer)

Nehmen Sie am Projekt teil und profitieren Sie von der stromerzeugenden Heizung!

- Mein Gebäude wird derzeit nicht über Fernwärme versorgt
- Ja, ich bewerbe mich um die Teilnahme am Projekt "Mikro-KWK für Bottrop"

Angaben zur Person:

Name:

Straße:

Telefon:

Email:

Angaben zum Objekt:

- Abweichende Anschrift des Objekts für die Bewerbung → *Angabe der Adresse möglich*

Objekttyp

- keine Angabe
- Wohnung
- Einfamilienhaus
- Doppelhaus
- Mehrfamilienhaus

Bauart

- keine Angabe
- Wohnung
- Freistehendes Gebäude
- Reihendhaus oder Doppelhaushälfte
- Reihemittelhaus

Baujahr

Anzahl der Bewohner

Wohnfläche

 m²

Abbildung 197: Fragebogen ICM (Wohnungseigentümer) | Teil 1

Waren Sie bereits zur Erstberatung im ZIB?

- Ja
 Nein

Versorgung mit Wärme

→ Gas / Strom / Öl / Sonstiges

kWh pro Jahr

Stromverbrauch im Jahr

kWh

Art der Warmwasseraufbereitung

- keine Angabe
 zentral in der Heizungsanlage
 dezentral mit Durchlauferhitzern
 teilweise zentral, teilweise dezentral

Art der Heizungsanlage

- keine Angabe
 Zentralheizung
 Etagenheizung
 Sonstiges

Alter der Heizungsanlage

Jahre

Sonstiges

Zutreffendes bitte ankreuzen:

- Solarthermieanlage ist vorhanden
 bestehende Heizung verwendet Brennwerttechnik
 Beheizung erfolgt überwiegend durch Fußbodenheizung

Platz für Ihre Anmerkungen und Kommentare:

Abbildung 198: Fragebogen ICM (Wohnungseigentümer) | Teil 2

A2 Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen)

Fragebogen (InnovationCity) Team _____ Datum _____ Termin _____

ID _____

Vorname | Name _____ | _____

Straße | Hausnummer _____ | _____

PLZ | Wohnort _____ | Bottrop _____

Telefon / Mobil _____ | _____

E-Mail _____

Bevorzugter Heizungsinstallateur _____ keiner

Bevorzugter Elektroinstallateur _____ keiner

Bewohnenstruktur zum Zeitpunkt der letzten Energierechnung (Anwesenheitszeit, Alter, Anzahl)

	< 10 Jahre	11-17 Jahre	18-29 Jahre	30-59 Jahre	> 60 Jahre
0-5 Stunden	_____	_____	_____	_____	_____
6-12 Stunden	_____	_____	_____	_____	_____
12-18 Stunden	_____	_____	_____	_____	_____
18-24 Stunden	_____	_____	_____	_____	_____

Typ des Objektes? Einfamilienhaus Doppel-/Reihenendhaus Mehrfamilienhaus Reihemittelhaus Wohnung

↳ Wenn Wohnung, welches Lage? unterstes Geschoss mittleres Geschoss oberstes Geschoss

Funktion des Objektes? Wohnen Büro Öffentliches Gebäude Industrie _____

Baujahr des Objektes? _____

Wohnfläche _____ m²

Wurde das Objekt bereits renoviert? Ja Nein

↳ Wenn ja, was wurde renoviert? Kellerdecke oberste Geschossdecke Dach Außenwände

↳ Wenn ja, wann wurde es renoviert? ↳ _____ ↳ _____ ↳ _____ ↳ _____

↳ Wenn ja, was wurde renoviert? Fenster Heizungstechnik _____

↳ Wenn ja, wann wurde es renoviert? ↳ _____ ↳ _____ ↳ _____

Einbau eines kabelgebundenen Temperatur- und Feuchtemessung im Wohnzimmer (→ Bohrung vom Wohnzimmer / in Keller für Kabelverlegung) Ja Nein

Strombedarf

Anbieter: Strom _____

Jahr der Abrechnung (1. Jahr) _____

↳ Strombedarf (1. Jahr) ↳ _____ kWh / a

↳ Stromkosten (1. Jahr) ↳ _____ EUR / a

Jahr der Abrechnung (2. Jahr) _____

↳ Strombedarf (2. Jahr) ↳ _____ kWh / a

↳ Stromkosten (2. Jahr) ↳ _____ EUR / a

Jahr der Abrechnung (3. Jahr) _____

↳ Strombedarf (3. Jahr) ↳ _____ kWh / a

↳ Stromkosten (3. Jahr) ↳ _____ EUR / a

Weitere elektrische Energiesysteme Photovoltaik Windkraft _____

Installierte elektrische Leistung ↳ _____ kW_{peak} ↳ _____ kW_{peak} ↳ _____ kW_{peak}

Abbildung 199: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen) | Teil 1

Wärmebedarf

Anbieter: Energieträger Wärmebereitstellung					
Energieträger zur Wärmebereitstellung	<input type="checkbox"/> Erdgas	<input type="checkbox"/> Flüssiggas	<input type="checkbox"/> Strom	<input type="checkbox"/> Öl	<input type="checkbox"/> Kohle
Max. Leistung der Wärmebereitstellung	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW
Min. Leistung der Wärmebereitstellung	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW
Alter der Wärmebereitstellung	↳ _____ a	↳ _____ a	↳ _____ a	↳ _____ a	↳ _____ a
Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung	↳ _____ %	↳ _____ %	↳ _____ %	↳ _____ %	↳ _____ %
Jahr der Abrechnung (1. Jahr)					
↳ Energiebedarf (1. Jahr)	↳ _____ kWh/a	↳ _____ kg/a	↳ _____ kWh/a	↳ _____ l/a	↳ _____ t/a
↳ Energiebezugskosten (1. Jahr)	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a
Jahr der Abrechnung (2. Jahr)					
↳ Energiebedarf (2. Jahr)	↳ _____ kWh/a	↳ _____ kg/a	↳ _____ kWh/a	↳ _____ l/a	↳ _____ t/a
↳ Energiebezugskosten (2. Jahr)	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a
Jahr der Abrechnung (3. Jahr)					
↳ Energiebedarf (3. Jahr)	↳ _____ kWh/a	↳ _____ kg/a	↳ _____ kWh/a	↳ _____ l/a	↳ _____ t/a
↳ Energiebezugskosten (3. Jahr)	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a
Einbauort der Wärmebereitstellung					
	<input type="checkbox"/> Keller	<input type="checkbox"/> Dachgeschoss	<input type="checkbox"/> _____		
Art der Trinkwarmwasserbereitung					
	<input type="checkbox"/> Zentral TWW	<input type="checkbox"/> Zentral TWW, Gas	<input type="checkbox"/> Dezentral DLE, Strom	<input type="checkbox"/> Dezentral DLE, Gas	<input type="checkbox"/> _____
Weitere thermische Bereitungssysteme					
	<input type="checkbox"/> Solaranlage	<input type="checkbox"/> Kaminofen	<input type="checkbox"/> _____		
Installierte thermische Leistung					
	↳ _____ kW _{peak}	↳ _____ kW _{peak}	↳ _____ kW _{peak}		
Art der Wärmeübertrager					
	<input type="checkbox"/> Radiator/Heizkörper	<input type="checkbox"/> Fußbodenheizung	<input type="checkbox"/> _____		

Technische Eigenschaften

Trinkwasserspeicher	<input type="checkbox"/> Ja ----->	_____ l	<input type="checkbox"/> Nein
Heizungspumpe und -leistung	<input type="checkbox"/> Ja ----->	_____ W	<input type="checkbox"/> Nein
↳ Wenn ja, Modulationsfähigkeit und -bereich	<input type="checkbox"/> Ja ----->	_____ W bis _____ W	<input type="checkbox"/> Nein
Trinkwasserzirkulationspumpe und -leistung	<input type="checkbox"/> Ja ----->	_____ W	<input type="checkbox"/> Nein
↳ Wenn ja, Modulationsfähigkeit und -bereich	<input type="checkbox"/> Ja ----->	_____ W bis _____ W	<input type="checkbox"/> Nein
Raumhöhe Aufstellraum (min. 2x messen) _____ mm			
Geringste Türbreite zum Aufstellraum _____ mm			
Elektrische Anschlüsse im Aufstellraum <input type="checkbox"/> 1-phasig <input type="checkbox"/> 3-phasig			
Ist Kamin / Sind Kamine vorhanden? <input type="checkbox"/> 1 Kamin <input type="checkbox"/> 2 Kamine <input type="checkbox"/> 3 Kamine <input type="checkbox"/> mehr als 3 Kamine			
Eigenschaften Kamin 1			
	<input type="checkbox"/> gerader Verlauf	<input type="checkbox"/> verspringender Verlauf	
↳ Wenn ja, Kaminabmaße	<input type="checkbox"/> eckig ----->	B: _____ mm x L: _____ mm	<input type="checkbox"/> rund -----> Ø: _____ mm
↳ Wenn ja, ist Kamin Brennwert geeignet?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	
↳ Wenn ja, IAS Material | Kaminanschluss	<input type="checkbox"/> Edelstahl	<input type="checkbox"/> Kunststoff	Kaminanschluss DN: _____
↳ Wenn ja, IAS Hersteller | Produktbezeichnung	Hersteller: _____	Produktbezeichnung: _____	
Eigenschaften Kamin 2			
	<input type="checkbox"/> gerader Verlauf	<input type="checkbox"/> verspringender Verlauf	
↳ Wenn ja, Kaminabmaße	<input type="checkbox"/> eckig ----->	B: _____ mm x L: _____ mm	<input type="checkbox"/> rund -----> Ø: _____ mm
↳ Wenn ja, ist Kamin Brennwert geeignet?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	
↳ Wenn ja, IAS Material | Kaminanschluss	<input type="checkbox"/> Edelstahl	<input type="checkbox"/> Kunststoff	Kaminanschluss DN: _____
↳ Wenn ja, IAS Hersteller | Produktbezeichnung	Hersteller: _____	Produktbezeichnung: _____	
Eigenschaften Kamin 3			
	<input type="checkbox"/> gerader Verlauf	<input type="checkbox"/> verspringender Verlauf	
↳ Wenn ja, Kaminabmaße	<input type="checkbox"/> eckig ----->	B: _____ mm x L: _____ mm	<input type="checkbox"/> rund -----> Ø: _____ mm
↳ Wenn ja, ist Kamin Brennwert geeignet?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	
↳ Wenn ja, IAS Material | Kaminanschluss	<input type="checkbox"/> Edelstahl	<input type="checkbox"/> Kunststoff	Kaminanschluss DN: _____
↳ Wenn ja, IAS Hersteller | Produktbezeichnung	Hersteller: _____	Produktbezeichnung: _____	

Abbildung 200: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen) | Teil 2

Sonstiges

<p>Sonstiges (Kunde) <i>(z. B. Sonderwünsche des Kunden)</i></p>	
<p>Sonstiges (GWI-Team) <i>(z. B. Gasherd vorhanden, Schwimmbad vorhanden, enge Platzverhältnisse im Treppenhaus zum Aufstellraum)</i></p>	

Aufmaß (Einscannen)

<p>ID _____</p>	
-----------------	--

Abbildung 201: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (Wohnen) | Teil 3

Objektdaten

Betriebsfläche	Gesamtfläche	davon beheizt	davon gekühlt	davon klimatisiert	davon unbeheizt
Verkauf	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²
Büro	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²
Produktion	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²
Lager	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²
Sonstiges	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²	_____ m ²

Baujahr des Objektes _____

Wurde das Objekt bereits renoviert? Ja Nein

↳ Wenn ja, was wurde renoviert? Kellerdecke oberste Geschossdecke Dach Außenwände

↳ Wenn ja, wann wurde es renoviert? l> _____ l> _____ l> _____ l> _____

↳ Wenn ja, was wurde renoviert? Fenster Heizungstechnik

↳ Wenn ja, wann wurde es renoviert? l> _____ l> _____

Wurde bereits ein Energiemanagementsystem eingeführt?

Zertifizierung nach ISO 5001 | Energiemanagement

Zertifizierung Eco Management und Audit Scheme (EMAS)

Zertifizierung nach ISO 14001 | Umweltmanagement

Ökoprotit

Sonstige

Keine Einführung

In Planung

Einbau eines kabelgebundenen Temperatur- und Feuchtemessung an einer repräsentativen Messstelle? Ja nein

Strombedarf

Anbieter: Strom _____

Sind mehrere Stromzähler-Messstellen installiert? ja nein

Wenn ja, welche Bereiche werden getrennt erfasst?

Ist ein Spitzenlastmanagement vorhanden? ja nein

Ist eine Kompensationsanlage vorhanden? ja nein

Werden unterschiedliche Stromtarife genutzt? Ja nein

EEG-Umlage befreit (stromintensive Unternehmen) ja nein

Abrechnung für Strom Leistungsbezogene Abrechnung Arbeitsbezogene Abrechnung

Jahr der Abrechnung (1. Jahr) _____

↳ **Strombedarf (1. Jahr)** l> _____ kWh / a l> _____ kW(Base) <== rechnen die hier auf kWh/a ab oder nur kW

↳ **Stromkosten (1. Jahr)** l> _____ EUR / a l> _____ EUR / a

Jahr der Abrechnung (2. Jahr) _____

↳ **Strombedarf (2. Jahr)** l> _____ kWh / a

↳ **Stromkosten (2. Jahr)** l> _____ EUR / a

Jahr der Abrechnung (3. Jahr) _____

↳ **Strombedarf (3. Jahr)** l> _____ kWh / a

↳ **Stromkosten (3. Jahr)** l> _____ EUR / a

Weitere elektrische Energiesysteme Photovoltaik Windkraft _____

Installierte elektrische Leistung l> _____ kW_{peak} l> _____ kW l> _____ kW_{peak}

Abbildung 203: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD) | Teil 2

Wärmebedarf

Anbieter: Energieträger Wärmebereitstellung					
Energieträger zur Wärmebereitstellung	<input type="checkbox"/> Erdgas	<input type="checkbox"/> Flüssiggas	<input type="checkbox"/> Strom	<input type="checkbox"/> Öl	<input type="checkbox"/> Kohle
Max. Leistung der Wärmebereitstellung	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW
Min. Leistung der Wärmebereitstellung	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW	↳ _____ kW
Alter der Wärmebereitstellung	↳ _____ a	↳ _____ a	↳ _____ a	↳ _____ a	↳ _____ a
Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung	↳ _____ %	↳ _____ %	↳ _____ %	↳ _____ %	↳ _____ %
Jahr der Abrechnung (1. Jahr)					
↳ Energiebedarf (1. Jahr)	↳ _____ kWh _{th} /a	↳ _____ kg/a	↳ _____ kWh/a	↳ _____ l/a	↳ _____ t/a
↳ Energiebezugskosten (1. Jahr)	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a
Jahr der Abrechnung (2. Jahr)					
↳ Energiebedarf (2. Jahr)	↳ _____ kWh _{th} /a	↳ _____ kg/a	↳ _____ kWh/a	↳ _____ l/a	↳ _____ t/a
↳ Energiebezugskosten (2. Jahr)	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a
Jahr der Abrechnung (3. Jahr)					
↳ Energiebedarf (3. Jahr)	↳ _____ kWh _{th} /a	↳ _____ kg/a	↳ _____ kWh/a	↳ _____ l/a	↳ _____ t/a
↳ Energiebezugskosten (3. Jahr)	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a	↳ _____ EUR/a
Einbauort der Wärmebereitstellung	<input type="checkbox"/> Keller	<input type="checkbox"/> Dachgeschoss	<input type="checkbox"/> _____		
Art der Trinkwarmwasserbereitung	<input type="checkbox"/> Zentral TWW	<input type="checkbox"/> Zentral TWW, Gas	<input type="checkbox"/> Dezentral DLE, Strom	<input type="checkbox"/> Dezentral DLE, Gas	<input type="checkbox"/> _____
Wasserverbrauch	_____ m ³				
Wärmemengezähler vorhanden?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein			
wenn ja: dann wie viele kWh	Hzg: _____ kWh/a	TWW: _____ kWh/a			
Weitere thermische Bereitungssysteme	<input type="checkbox"/> Solaranlage	<input type="checkbox"/> Kaminöfen	<input type="checkbox"/> _____		
Installierte thermische Leistung	↳ _____ kW _{peak}	↳ _____ kW	↳ _____ kW _{peak}		
Art der Wärmeübertrager	<input type="checkbox"/> Radiator/Heizkörper	<input type="checkbox"/> Fussbodenheizung	<input type="checkbox"/> _____		

Technische Eigenschaften

Trinkwasserspeicher	<input type="checkbox"/> Ja	.....> _____ l	<input type="checkbox"/> Nein
Heizungspumpe und -leistung	<input type="checkbox"/> Ja	.....> _____ W	<input type="checkbox"/> Nein
↳ Wenn ja, Modul@onsfähigkeit und -bereich	<input type="checkbox"/> Ja	.....> _____ W bis _____ W	<input type="checkbox"/> Nein
Trinkwasserzirkulationspumpe und -leistung	<input type="checkbox"/> Ja	.....> _____ W	<input type="checkbox"/> Nein
↳ Wenn ja, Modul@onsfähigkeit und -bereich	<input type="checkbox"/> Ja	.....> _____ W bis _____ W	<input type="checkbox"/> Nein
Raumhöhe Aufstellraum (min. 3 x messen)	_____ mm		
Geringste Türbreite zum Aufstellraum	_____ mm		
Geringste Türhöhe zum Aufstellraum	_____ mm		
Elektrische Anschlüsse im Aufstellraum	<input type="checkbox"/> 1-phasig	<input type="checkbox"/> 3-phasig	
Ist Kamin / Sind Kamine vorhanden?	<input type="checkbox"/> 1 Kamin	<input type="checkbox"/> 2 Kamine	<input type="checkbox"/> 3 Kamine
	<input type="checkbox"/> mehr als 3 Kamine		
Eigenschaften Kamin 1	<input type="checkbox"/> gerader Verlauf	<input type="checkbox"/> verspringender Verlauf	
↳ Wenn ja, Kaminabmaße	<input type="checkbox"/> eckig	.....> B: _____ mm X L: _____ mm	<input type="checkbox"/> rund
↳ Wenn ja, ist Kamin Brennwert geeignet?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	.....> Ø: _____ mm
↳ Wenn ja, LAS Material | Kaminanschluss	<input type="checkbox"/> Edelstahl	<input type="checkbox"/> Kunststoff	| Kaminanschluss DN: _____
↳ Wenn ja, LAS Hersteller | Produktbezeichnung	Hersteller: _____	|	Produktbezeichnung: _____
Eigenschaften Kamin 2	<input type="checkbox"/> gerader Verlauf	<input type="checkbox"/> verspringender Verlauf	
↳ Wenn ja, Kaminabmaße	<input type="checkbox"/> eckig	.....> B: _____ mm X L: _____ mm	<input type="checkbox"/> rund
↳ Wenn ja, ist Kamin Brennwert geeignet?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	.....> Ø: _____ mm
↳ Wenn ja, LAS Material | Kaminanschluss	<input type="checkbox"/> Edelstahl	<input type="checkbox"/> Kunststoff	| Kaminanschluss DN: _____
↳ Wenn ja, LAS Hersteller | Produktbezeichnung	Hersteller: _____	|	Produktbezeichnung: _____
Eigenschaften Kamin 3	<input type="checkbox"/> gerader Verlauf	<input type="checkbox"/> verspringender Verlauf	
↳ Wenn ja, Kaminabmaße	<input type="checkbox"/> eckig	.....> B: _____ mm X L: _____ mm	<input type="checkbox"/> rund
↳ Wenn ja, ist Kamin Brennwert geeignet?	<input type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nein	.....> Ø: _____ mm
↳ Wenn ja, LAS Material | Kaminanschluss	<input type="checkbox"/> Edelstahl	<input type="checkbox"/> Kunststoff	| Kaminanschluss DN: _____
↳ Wenn ja, LAS Hersteller | Produktbezeichnung	Hersteller: _____	|	Produktbezeichnung: _____

Abbildung 204: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD) | Teil 3

Sonstiges

<p>Sonstiges (Kunde) <i>(z. B. Sonderwünsche des Kunden)</i></p>	
<p>Sonstiges (GWI-Team) <i>(z. B. Gasherd vorhanden, Schwimmbad vorhanden, enge Platzverhältnisse im Treppenhaus zum Aufstellraum)</i></p>	

Aufmaß (Einscannen)


<p>ID _____</p>	
-----------------	--

Abbildung 205: Fragebogen Vor-Ort-Begehungen (GHD) | Teil 4

A4 Standardisiertes Vorgehen: Vor-Ort Begehungen

Präsentationsfolie: Terminplanung

- Terminplanung geht über Frau Lüno
- Die Outlook-Kalender müssen zur Terminplanung für Frau Lüno freigegeben sein
- **WICHTIG:** Immer den Kalender aktualisieren, sodass es zu keinen Fehlplanungen kommt
- In den Terminen sind die wichtigsten Informationen bereits enthalten. Die ID dient zur internen Verknüpfung der Dateien etc. mit dem Bewerber und ggf. späteren Projektteilnehmer!
- Termine: von 08:00 bis 17:00, ggf. sind hier Ausnahmen notwendig
- Termindauer 1 Stunde und 30 Minuten zwischen den Termin Puffer fürs Fahren etc.



The screenshot shows an Outlook appointment window titled 'IC | Besuch: Mark...'. The appointment is scheduled for Monday, 05.08.2013, from 08:30 to 09:30. The 'ID' field is circled in red and contains the value '1'. Other fields include 'Name', 'Anschrift Bewerber', 'Anschrift Objekt', 'Telefon: 0171-7586135', 'Gebäudetyp: Einfamilienhaus', 'Bauart: freistehende Gebäude', 'Baujahr: 1956', and 'Energieart: Gas'. At the bottom, it says 'In freigegebenem Ordner: Kalender'.

Abbildung 206: Vorgehen bei den Vor-Ort Begehungen | Terminplanung | Folie 1

- Bei der Terminplanung dem Bewerber mitteilen, dass für den GWI Vor-Ort Besuch folgende Dokumente/Informationen Vor-Ort verfügbar müssen:
 1. **Stromrechnungen der letzte 3 Jahre** *(falls vorhanden, aber mindestens des letzten Jahres)*
 2. **Gasrechnungen der letzten 3 Jahre** *(bzw. Kohle- oder Ölrechnungen wenn vorhanden, aber min. des letzten Jahres)*
 3. **Informationen zum bevorzugten Heizungsinstallateur (Name, Firma)** *(falls vorhanden)*
 4. **Informationen zum bevorzugten Elektroinstallateur (Name, Firma)** *(falls vorhanden)*
 5. **Baujahr und Wohnfläche des Objektes**
 6. **Informationen über durchgeführte Sanierungen (z.B. neue Fenster, Dämmung)** inklusive des Jahres der Umsetzung der jeweiligen Maßnahme
 7. **Schornsteinfegerprüfungsunterlagen** *(falls vorhanden)*
 8. **Alter der Heizungsanlage**
 9. **Informationen über Photovoltaik oder andere Stromerzeugungsanlage** *(falls vorhanden)*
 10. **Informationen über Solaranlage oder andere Wärmeerzeugungsanlage** *(falls vorhanden)*

Abbildung 207: Vorgehen bei den Vor-Ort Begehungen | Terminplanung | Folie 2

Präsentationsfolie: Ablauf der Vor-Ort-Begehung

- Begrüßung, persönliche Vorstellung
 - Vorstellung GWI (*siehe Mappe*) und Projekt (*siehe Folie 5 und 6*)
 - beides ganz kurz!!!
 - Aushändigen der GWI-Mappen und Erklärung des Inhalts
 - v. a. Informationen zur Datenverwendung und Infotelefon (*Verweis auf beiliegendes Schreiben*)
 - Erklärung des Besuchsablauf
 - Fotos aufnehmen
 - Aufmaß des Aufstellraums
 - Fragebogen
 - Vor-Ort Begehung (*Standardisierter Besuchsablauf*)
 - Fotos aufnehmen
 - Aufmaß des Aufstellraums
 - Fragebogen ausfüllen
 - Verabschiedung
 - mit Info: „Wir werden uns im Laufe der nächsten 3 Wochen bei Ihnen melden“
- Kellerraum (*Wärme- und Stromverteilung*)
 - Haus (*Frontseite*)
 - Kamin
 - Sonstiges (*was Vor-Ort noch wichtig erscheint*)

Abbildung 208: Vorgehen bei den Vor-Ort Begehungen | Ablauf der Vor-Ort-Begehung

A5 Inbetriebnahmeprotokoll: Messtechnik

Inbetriebnahme Protokoll - Messtechnik	
Team _____	Datum _____ Termin _____
ID _____	
Vorname | Name _____ | _____	
Heizungsinstallateur _____	
Elektroinstallateur _____	

Checkliste																							
<ul style="list-style-type: none"> M-Bus Geräte auf korrekte M-Bus Nr. geprüft <input type="checkbox"/> Analogwerte standardisiert kontrolliert <input type="checkbox"/> Einbauorte dokumentiert (siehe Anlage 2) <input type="checkbox"/> Aufkleber Fördermittelgeber angebracht <input type="checkbox"/> Logbuch übergeben <input type="checkbox"/> Störungsdatenblatt übergeben <input type="checkbox"/> Fotos der Anlage <input type="checkbox"/> Fotodokumentation der einzelnen Messstellen <input type="checkbox"/> 	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: left; font-size: small;">Datalogger Aufbau (Eingänge)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Temp / Feuchte Innen</td><td>10 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Temp / Feuchte Außen</td><td>9 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>MBUS 8 (reserve)</td><td>8 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>MBUS 7 (reserve)</td><td>7 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>WMZ Zusatz-Heizgerät</td><td>6 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>WMZ Gerät KWK</td><td>5 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>WMZ H-Kreis</td><td>4 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Elektrozähler gesamt</td><td>3 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Elektrozähler KWK</td><td>2 <input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Gaszähler</td><td>1 <input type="checkbox"/></td></tr> </tbody> </table>	Datalogger Aufbau (Eingänge)		Temp / Feuchte Innen	10 <input type="checkbox"/>	Temp / Feuchte Außen	9 <input type="checkbox"/>	MBUS 8 (reserve)	8 <input type="checkbox"/>	MBUS 7 (reserve)	7 <input type="checkbox"/>	WMZ Zusatz-Heizgerät	6 <input type="checkbox"/>	WMZ Gerät KWK	5 <input type="checkbox"/>	WMZ H-Kreis	4 <input type="checkbox"/>	Elektrozähler gesamt	3 <input type="checkbox"/>	Elektrozähler KWK	2 <input type="checkbox"/>	Gaszähler	1 <input type="checkbox"/>
Datalogger Aufbau (Eingänge)																							
Temp / Feuchte Innen	10 <input type="checkbox"/>																						
Temp / Feuchte Außen	9 <input type="checkbox"/>																						
MBUS 8 (reserve)	8 <input type="checkbox"/>																						
MBUS 7 (reserve)	7 <input type="checkbox"/>																						
WMZ Zusatz-Heizgerät	6 <input type="checkbox"/>																						
WMZ Gerät KWK	5 <input type="checkbox"/>																						
WMZ H-Kreis	4 <input type="checkbox"/>																						
Elektrozähler gesamt	3 <input type="checkbox"/>																						
Elektrozähler KWK	2 <input type="checkbox"/>																						
Gaszähler	1 <input type="checkbox"/>																						
Inbetriebnahme der Messtechnik erfolgt am: _____	Unterschrift: _____																						

Sonstiges	
Sonstiges (Kunde) <i>(z. B. Sonderwünsche des Kunden)</i>	
Sonstiges (GWI-Team)	

Abbildung 209: Inbetriebnahmeprotokoll: Messtechnik

Checklist E-schaltplan

Team _____ Datum _____

ID _____ Dataloggerbox - Nr. _____

Vorname | Name _____ | _____

Heizungsinstalleur _____

Elektroinstallateur _____

Datenlogger Aufbau (Eingänge)

Temp / Feuchte Innen	10	<input type="checkbox"/>	
Temp / Feuchte Außen	9	<input type="checkbox"/>	
MBUS 8 (reserve)	8	<input type="checkbox"/>	
MBUS 7 (reserve)	7	<input type="checkbox"/>	
WMZ Zusatz-Heizgerät	6	<input type="checkbox"/>	
WMZ Gerät KWK	5	<input type="checkbox"/>	
WMZ H-Kreis	4	<input type="checkbox"/>	
Elektrozähler gesamt	3	<input type="checkbox"/>	
Elektrozähler KWK	2	<input type="checkbox"/>	
Gaszähler	1	<input type="checkbox"/>	

Angeschlossene Verbraucher M-Bus 2 KWK-Zähler

KWK-Gerät	<input type="checkbox"/>	
ZHG	<input type="checkbox"/>	
Kondensathebepumpe	<input type="checkbox"/>	
Zirkulationspumpe	<input type="checkbox"/>	
Trinkwassermodul	<input type="checkbox"/>	
_____	<input type="checkbox"/>	
_____	<input type="checkbox"/>	
_____	<input type="checkbox"/>	
_____	<input type="checkbox"/>	
_____	<input type="checkbox"/>	

Unterschrift Elektroinstallateur _____

Notizen

Abbildung 210: Checkliste Elektroinstallationschaltplan

A6 Kontaktdaten-Blatt zur Anmeldung



Kontaktdaten - Anmeldung



Für Fragen zur Mitteilung an den örtlichen Netzbetreiber/Ausfüllen der Formulare oder zur BAFA-Anzeige melden Sie sich bitte bei den folgenden Ansprechpartnern:

Mitteilung an den örtlichen Netzbetreiber:



Firma: ELE Verteilnetz GmbH

Ansprechpartner:



Bitte machen Sie bei der Inbetriebnahme der KWK-Anlage zur Dokumentation ein Foto des internen KWK-Stromzählers und senden dieses gerne per Email an:



Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
(BAFA-Anzeige)



Firma: Innovation City Management GmbH

Ansprechpartner:



Email:

Nachdem Sie die Anmeldung durchgeführt haben, schicken Sie bitte die Bestätigung an die ELE Verteilnetz GmbH zurück. Email an:



Die farblich markierten Felder sind von folgenden Personen auszufüllen:

-  → ihre Daten
-  → Heizungsinstallateur
-  → Elektroinstallateur

A7 Infoblatt zum Vorgehen bei Störungen



Kontaktdaten – Störung



Störung der KWK-Anlage:

Erster Schritt:

Meldung beim Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. unter der unten angegebenen Störungsrufnummer. An Wochenenden bitte direkt den Hersteller oder Heizungsinstallateur kontaktieren und die Störung beim Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. nachmelden.

Firma: Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Ansprechpartner:

Email-Kontakt:

Störungsmeldung beim Hersteller:

Firma:

Werkskundendienst:

Störungsmeldung beim Heizungsinstallateur:

Firma:

Telefonnummer: Tel.:

24 h – Störungsrufnummer: Tel.:

A8 Mitmacher Logbuch

KWK-Logbuch

ID _____ Name _____

gwi Gas und Wärme Institut Essene V.

Datum Uhrzeit	kurze Problembeschreibung	Störungscode (wenn vorhanden)	Installateur	Hersteller	Störungsbehebung		Durchgeführte Arbeiten
					Datum	Uhrzeit	


 vom Hersteller oder Heizungsinstallateur auszufüllen

Abbildung 213: KWK-Logbuch

A9 Arbeitsflussdiagramm der beteiligten Akteure

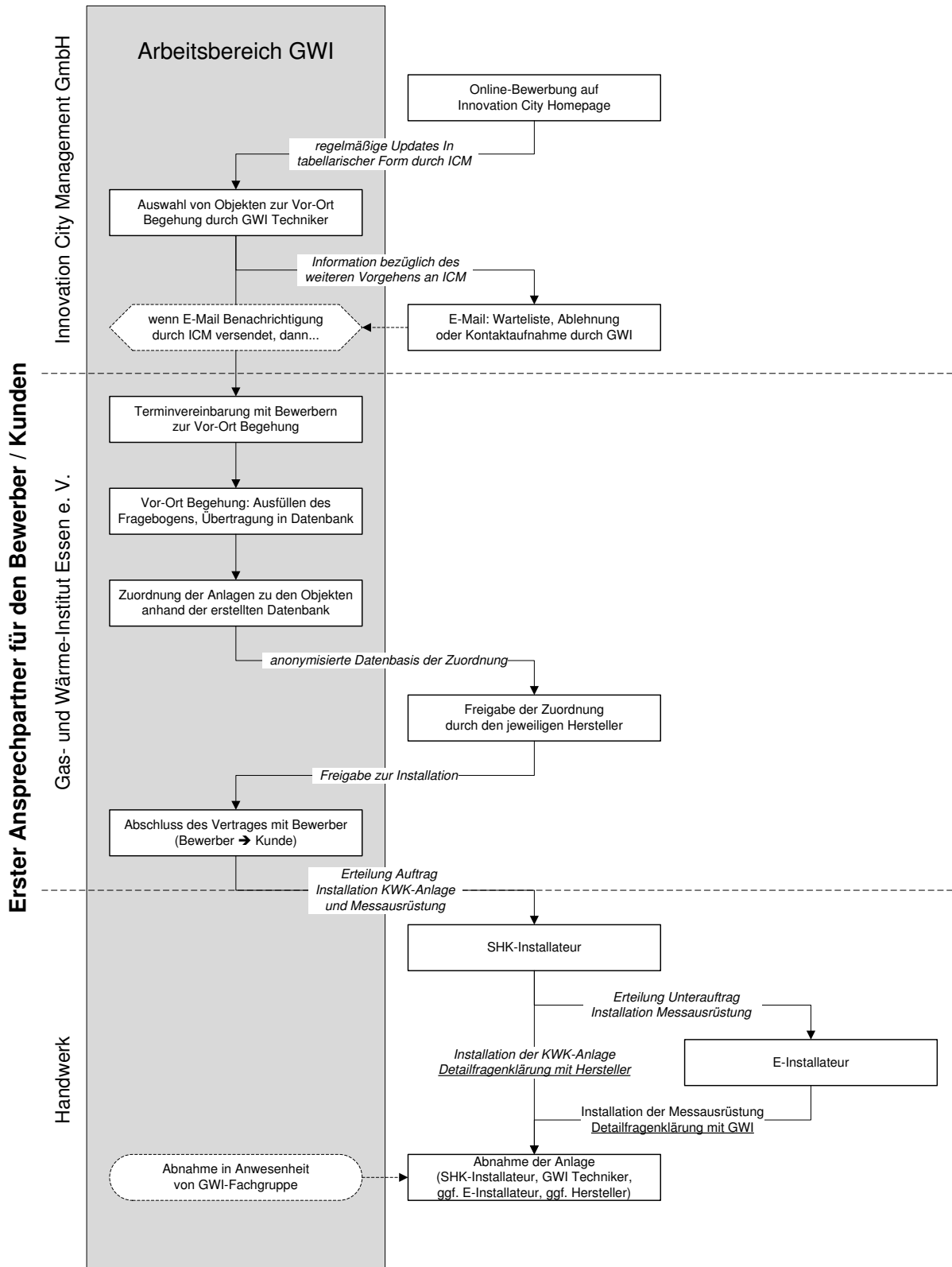


Abbildung 214: Arbeitsflussdiagramm der beteiligten Akteure bis zur Installation

A10 Fragebogen HRW (Referenzobjekte)

Befragung zum Thema Hausautomatisierung (Home Automation)

Ein Home Automation System ist eine zeitgemäße technische Lösung für Ihr Zuhause, mit dem Sie Ihre elektrische Geräte und Ihre Heizung einfach steuern können. Mit Hilfe eines solchen Systems lässt sich ebenfalls der Eigenverbrauch Ihres BHKW-Stroms in Ihrem Gebäude und somit die Wirtschaftlichkeit des Blockheizkraftwerks erhöhen.

1. Möchten Sie gern an einem Pilotprojekt zur Erhöhung des Stromeigenverbrauchs teilnehmen, bei dem die Hochschule Ruhr West (HRW) ein Home Automation System in Ihrer Wohnung installiert?

ja nein

Zur Teilnahme am Pilotprojekt ist es erforderlich, dass die Hochschule einen kleinen Computer als Zentrale des Home Automation Systems in Ihrer Wohnung aufstellt, der über Ihren Router mit dem Internet verbunden ist und Daten an eine Datenbank an der Hochschule sendet.

2. Sind Sie damit einverstanden, dass Ihr Router und Ihre Internetverbindung zur Datenübertragung genutzt werden, was einen Einfluss auf die ip-Telefonie und die Ihnen zur Verfügung stehende Bandbreite haben kann?

ja nein

2. Haben Sie bereits Erfahrungen mit Home Automation Systemen ?

- Ja, ich besitze bereits ein Home Automation System.
- Ich habe mich bereits mit den Möglichkeiten der Systeme befasst, habe aber noch keins angeschafft.
- Nein, ich habe mich bisher noch nicht mit Home Automation Systemen beschäftigt. Ich bin damit einverstanden, dass für das Projekt ein funkbasiertes System in meiner Wohnung / meinem Haus installiert wird.

3. Für welche(s) der folgenden Themen interessieren Sie sich ?

- Optimierung der Betriebsführung zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken.
- Energiesparen und Energiemanagement im Haushalt (ohne Einsatz von Home Automation).
- Energiemanagement des BHKWs unter Verwendung eines Home Automation Systems zur Senkung der Stromkosten.

4. Können Sie sich vorstellen, einige Ihrer Haushaltsgeräte bevorzugt zu bestimmten Zeiten zu benutzen, wenn Sie dadurch einen höheren Anteil Ihres erzeugten BHKW-Stroms selbst verbrauchen und somit Stromkosten sparen können?

- Nein
- Ja, allerdings unter der Voraussetzung, dass die Steuerung der Geräte vollautomatisch von einem Home Automation System übernommen wird.
- Ja. Neben der Unterstützung durch ein Home Automation System kann ich mir vorstellen, auch meine persönlichen Nutzungsgewohnheiten in einem gewissen Rahmen anzupassen.

5. Wie hoch sollte die Stromkosteneinsparung Ihrer Meinung nach mindestens ausfallen, damit Sie Ihre Nutzungsgewohnheiten anpassen würden?

Betrag:

6. Sind folgende Geräte in Ihrem Haushalt vorhanden und können Sie sich vorstellen, die Geräte regelmäßig oder gelegentlich bevorzugt zu der Zeit zu nutzen, in der Ihr BHKW Strom liefert?

Gerät	ja	nein
Waschmaschine		
Wäschetrockner		
Geschirrspüler		
Backofen und Mikrowelle		
Kaffeemaschine und Wasserkocher		
Staubsauger		

Nur Anzahl (Vorhandensein):

- Gefriertruhen /-schränke
- Kühlschränke

7. Haben Sie weitere Geräte mit hohem Stromverbrauch, die sich für ein Lastmanagement eignen würden ?

- nein
- ja

Folgende Geräte kommen in Frage:

8. Über welche Geräte verfügt Ihr Haushalt, die sich für die Visualisierung von Verbräuchen oder zur Steuerung der Geräte eignen würden ?

Gerät	ja	nein
Smartphone		
Tablet-PC		
Laptop		
Desktop-PC		

9. Nutzen Sie in Ihrem Haushalt einen Warmwasserboiler oder elektrische Zusatzheizgeräte?

Gerät	ja	nein
Warmwasserboiler		
Elektrische Zusatzheizgeräte		

10. Möchten Sie uns noch etwas mitteilen, was für uns / unser Projekt von Bedeutung sein könnte ?

A11 Wärmebedarfsberechnung InnovationCity

Tabelle 57: Berechnung des Wärmebedarfs im Projektgebiet InnovationCity

Gebäude nach IWU	bis 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009	Summe
EFH - Anzahl der Gebäude	839	245	351	201	69	45	112	60	76	1.998
Anzahl Wohnungen	1.034	301	433	259	88	56	135	70	84	2.460
Ø Wohnfläche in m ²	113	108	109	112	122	125	127	131	139	1.086
Wohnfläche in m ²	117.141	32.493	47.399	29.038	10.668	7.031	17.186	9.159	11.670	281.785
Wärmebedarf in kWh/a · m ²	163	146	163	161	136	106	117	107	76	1.174
Wärmebedarf in kWh/a	19.146.627	4.731.034	77.118.666	4.669.274	1.450.877	745.313	2017.661	979.142	884.562	42.336.355
RH - Anzahl der Gebäude	978	736	1.164	952	314	171	446	245	163	5.169
Anzahl Wohnungen	1.211	871	1.422	1.126	352	191	494	267	174	6.107
Ø Wohnfläche in m ²	103	98	95	101	115	120	118	119	127	996
Wohnfläche in m ²	124.433	85.003	135.409	114.300	40.599	22.970	58.144	31.664	22.073	634.596
Wärmebedarf in kWh/a · m ²	149	119	135	92	110	110	84	76	68	943
Wärmebedarf in kWh/a	18.588.976	10.149.336	18.293.809	10.458.464	4.465.892	2.524.419	4.884.110	2.400.129	1.494.336	73.259.474
MFH - Anzahl der Gebäude	1.459	605	735	125	127	105	544	337	315	4.352
Anzahl Wohnungen	75	68	62	67	73	75	73	78	85	652
Ø Wohnfläche in m ²	485.134	201.147	258.076	47.995	52.095	46.027	234.149	143.639	144.529	1.612.792
Wohnfläche in m ²	149	148	137	112	117	102	105	88	56	1.014
Wärmebedarf in kWh/a · m ²	72.285.000	29.709.398	35.459.621	5.394.625	6.074.237	4.694.795	24.585.631	12.654.626	8.079.194	198.937.127
GMH - Anzahl der Gebäude	0	0	0	0	12	0	0	0	0	12
Anzahl Wohnungen	0	0	0	0	328	0	0	0	0	328
Ø Wohnfläche in m ²	80	64	55	58	64	62	58	64	66	569
Wohnfläche in m ²	0	0	0	0	20.880	0	0	0	0	2.0880
Wärmebedarf in kWh/a · m ²	118	126	125	114	101	90	87	77	57	895
Wärmebedarf in kWh/a	0	0	0	0	2.117.232	0	0	0	0	2.117.232

A12 Einblick in Modelica / DYMOLA

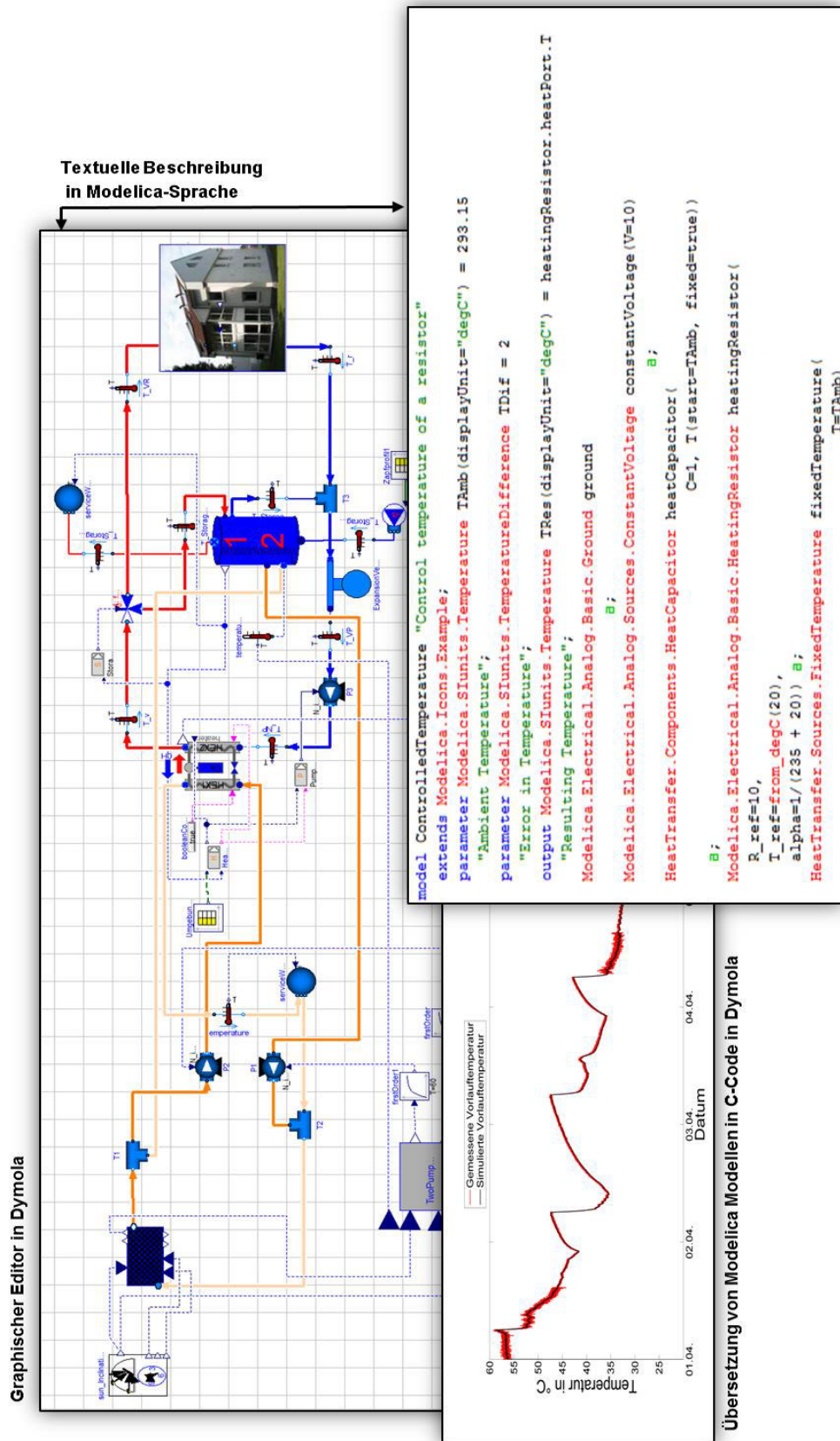


Abbildung 215: Verschiedene Ebenen in Modelica / DYMOLA

A13 Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen

Tabelle 58: Ökonomische und rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von Mikro-BHKWs in Wohngebäuden in Deutschland (2015). [47][49]

Strompreis	26,0	Ct / kWh	
Gaspreis	6,0	Ct / kWh	
Energiesteuer-Rückerstattung	0,55	Ct / kWh	[47]
KWK-Zuschlag	5,41	Ct / kWh	[47]
Einspeisevergütung *	3,21	Ct / kWh	[49]
Vermiedene Netznutzungsentgelte **	0,8	Ct / kWh	[50]

* durchschnittlicher EEX Baseload-Preis (KWK-Index) im ersten Quartal 2015

** der tatsächliche Wert wird vom lokalen Netzbetreiber festgesetzt; typische Vergütungen betragen 0.4 – 1.5 Ct / kWh [49]

A14 Detaillierte Beschreibung der Modelica Modelle

Thermisches Gebäudemodell

Im Rahmen des Projekts [51] wurden am GWI Modelle zur Beschreibung des hauseigenen Demonstrationshauses erstellt und validiert. Diese Entwicklungen umfassten sowohl Modelle zur Beschreibung von Einzelkomponenten im Bereich der Gebäudehülle (Wände, Fenster, Türen etc.) und der Versorgungstechnologien (Brennwertkessel, Mikro-KWK, etc.) als auch Gesamtmodelle zur Beschreibung des vollständigen Demonstrationshauses. Die erarbeiteten Modelle wurden mittels der am GWI gemessenen Daten validiert. Es wurde ein Werkzeug entwickelt, welches nicht nur die physikalisch genaue Abbildung von Gebäuden mit verschiedensten Anlagentechnologien ermöglicht, sondern darüber hinaus den Anwender in die Lage versetzt Parameterstudien und dynamische Systemsimulationen durchzuführen. Zusätzlich zu den verschiedenen physikalischen Einflüssen besteht die Möglichkeit, die Nutzereinflüsse in Form von Lüftungsprofilen und internen Wärmequellen (Menschen und Geräte) auf verschiedene Nutzerarten individuell anzupassen. Abbildung 216 zeigt das Modell des GWI-Demonstrationshauses (Mehrzonenmodell). Das Einfamilienhaus besteht aus vier Geschossen mit jeweils mehreren thermischen Zonen (Räume, Flur, Treppenhaus etc.). Der Bedarf an thermischer und elektrischer Energie des Gebäudes wird durch eine KWK-Anlage mit einem Warmwasserspeicher gedeckt.

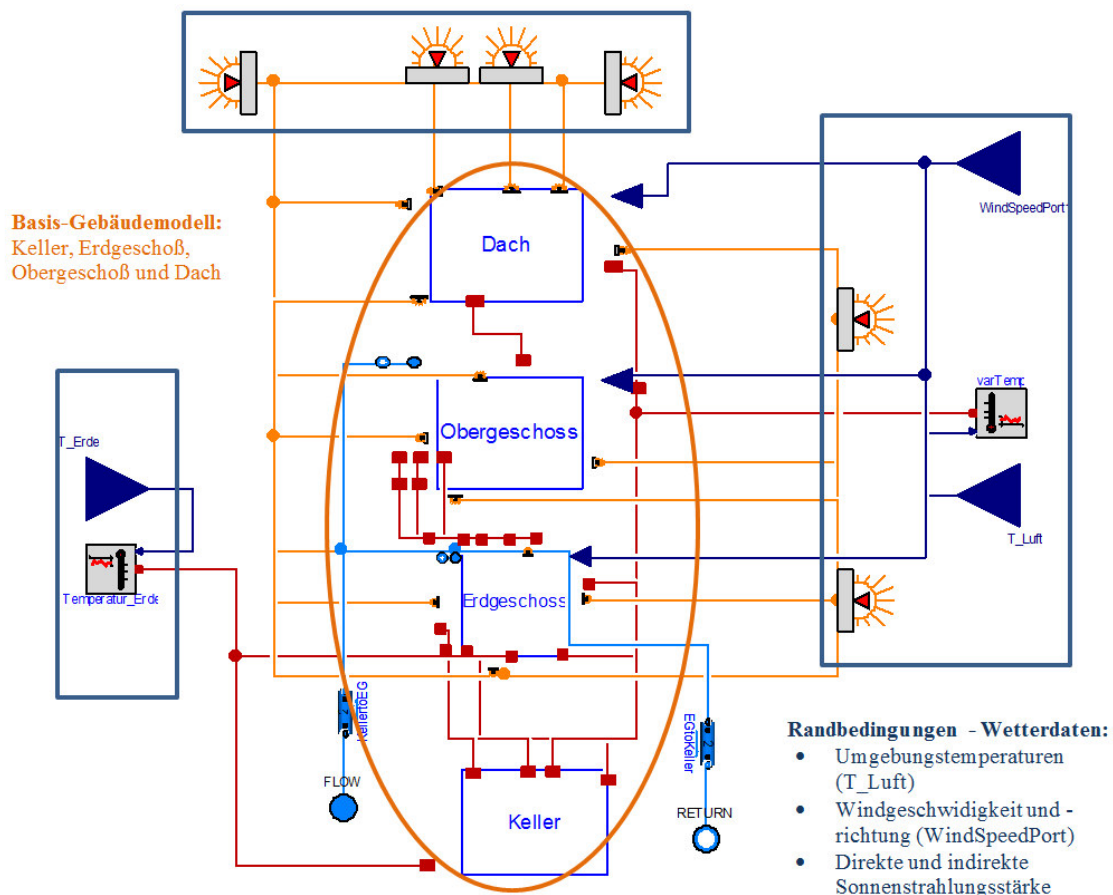


Abbildung 216: Mehrzonenmodell mit Randbedingungen ohne Heizkreis

In Abbildung 217 ist exemplarisch das Obergeschoss im Detail gezeigt. Es beinhaltet drei Schlafzimmer (ein Elternzimmer und zwei Kinderzimmer), Bad, Flur (Treppenhaus) sowie einen Wintergarten.

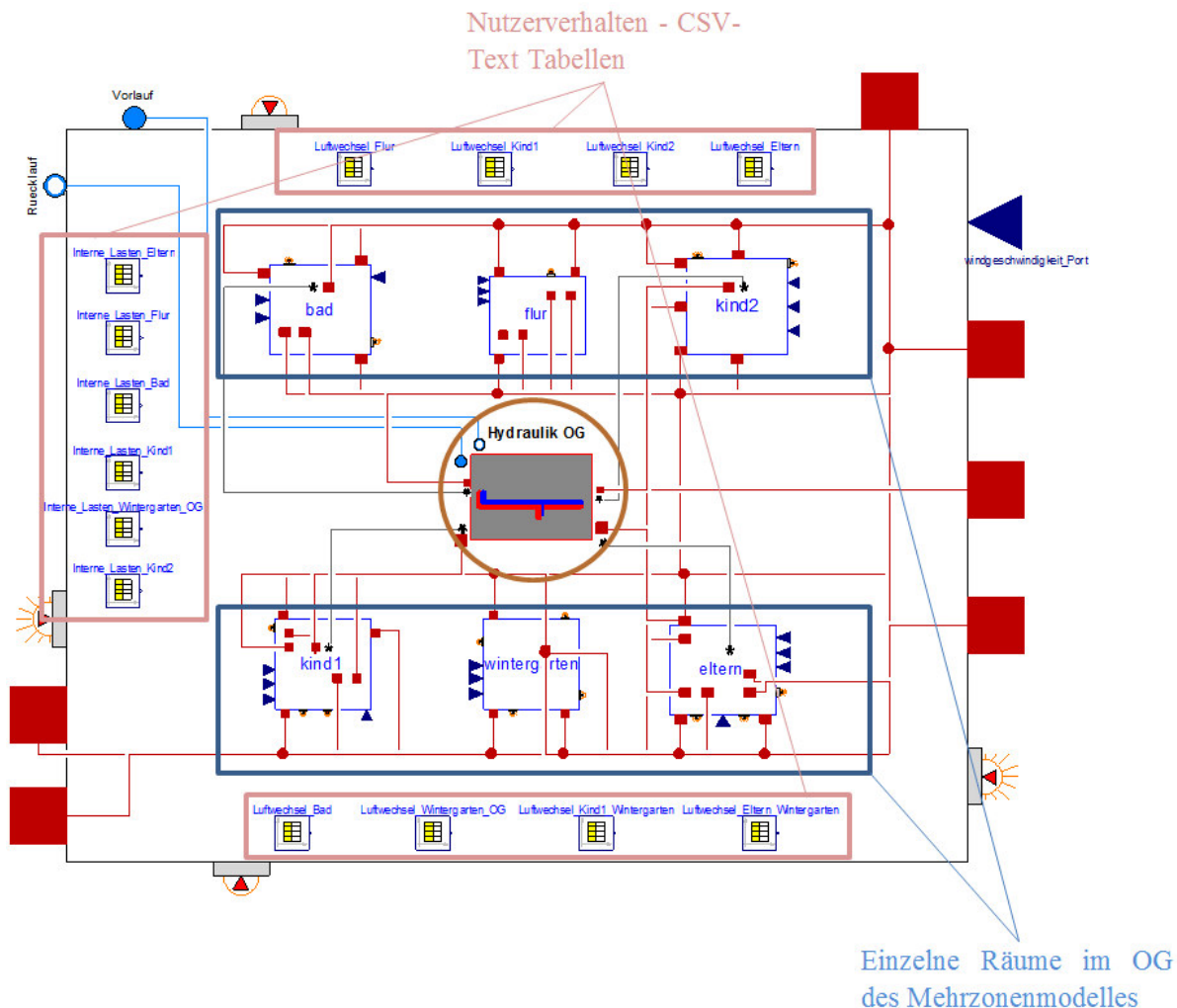


Abbildung 217: Modell Obergeschoss zusammen mit der Hydraulik im GWI-Demonstrationshaus

In dem dargestellten Mehrzonenmodell wurden die Hydraulik sowie die einzelnen Räume des Hauses detailliert abgebildet. Das heißt, jeder Raum erhält eine eigene Zone. Die nicht beheizten Kellerräume und der Dachboden wurden ebenso im Modell integriert. Alle in der Realität miteinander verbundenen Zonen sind auch im Modell entsprechend miteinander gekoppelt. Zudem wurden im Hydraulikmodell alle Heizkörper, die auch im realen Gebäude vorhanden sind, integriert. In Abbildung 218 ist die komplette Hydraulik im Obergeschoss des Hauses dargestellt. Detaillierte Randbedingungen wie Nutzungsprofile können für jeden Raum über eine Rohdatentabelle vorgegeben werden. So können unterschiedliche Nutzerverhalten mit verschiedenen Technologien verbunden werden, um eine Bewertung, z. B. hinsichtlich der Anlageneffizienz, vorzunehmen.

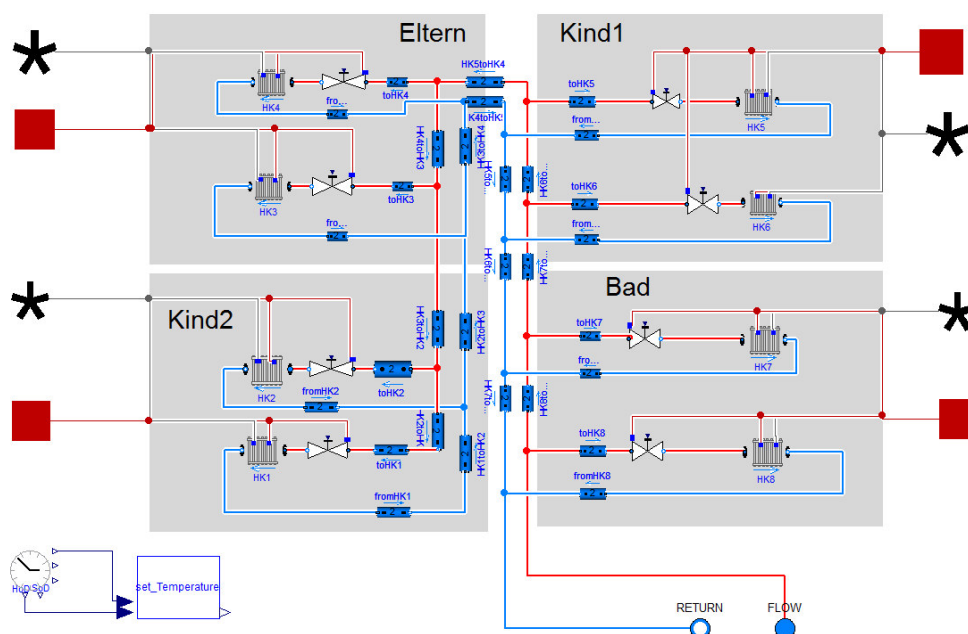


Abbildung 218: Obergeschoss mit Hydraulikmodell im Demonstrationshaus

Die gesamte Rechenzeit mit Anlagentechnik, bezogen auf ein Jahr beträgt für ein detailliertes Modell eines einzelnen Gebäudes (Mehrzonenmodell) im Mittel rund 48 Stunden. Dies kann aber je nach Komplexität der Verschaltung oder auch der Regelungstechnik stark variieren.

Für die Modellierungs- und Simulationsaufgaben im Rahmen der Energiekonzepterstellung für eine Gruppierung (100 Objekte) mussten neue Modellierungskonzepte entwickelt werden, welche trotz der größeren zu verarbeitenden Datenmengen eine geringe Simulationsdauer bei möglichst hoher Modellierungsgenauigkeit erlauben. Der Lösungsansatz basiert auf Reduzierung der simulierten Gebäudeanzahl sowie Vereinfachung des einzelnen detaillierten Gebäudemodells.

Nach der Bewertung der gesamten Struktur der Wohnarchitektur in dem untersuchten Stadtteil wurde die simulationstechnisch abgebildete Gebäudeanzahl auf zehn Referenzgebäude (wie in Kapitel 3.5 ausführlich beschrieben) reduziert. Um die zehn Referenzgebäude-Modelle vollständig in der Simulation parametrisieren zu können, fanden Begehungen (siehe Kapitel 3.2) mit umfangreichen Datenaufnahmen statt. Dabei wurde zum einen die Geometrie der Bauteile (außen und innen) wie Wände, Türen und Fenster aufgezeichnet und zum anderen das Nutzerverhalten ermittelt.

Ferner erfolgte die Reduzierung des simulationstechnischen Komplexitätsgrads des Mehrzonenmodells auf physikalischer und mathematischer Ebene, in dem alle thermischen Zonen in einem Einfamilienhausmodell (EFH) durch eine einzige Zone zusammengefasst wurden. Daraus entstand das Einzonenmodell mit insgesamt vier Außenwänden, Decke und Boden. Abbildung 219 stellt den Aufbau dieses Modells dar. Hier wurden die verschiedenen Wandaufbauten wie bereits im Mehrzonenmodell in Schichtbauweise berücksichtigt und physikalisch abgebildet, da neben dem Wärmedurchgang auch die Wärmespeicherung (z. B. in Beton) mit einbezogen wurde. Außerdem wurden die Fenster und Türen abgebildet. Auf die gesamte

Energiebilanz und die Darstellung des physikalischen Speichereffekts im Gebäude haben die Innenwände einen großen Einfluss und werden in dem entwickelten Einzonenmodell berücksichtigt. Auch Einflüsse wie die Windstärke und -richtung, Solarstrahlung, Umgebungstemperaturen sind Eingangsdaten für die Simulationen.

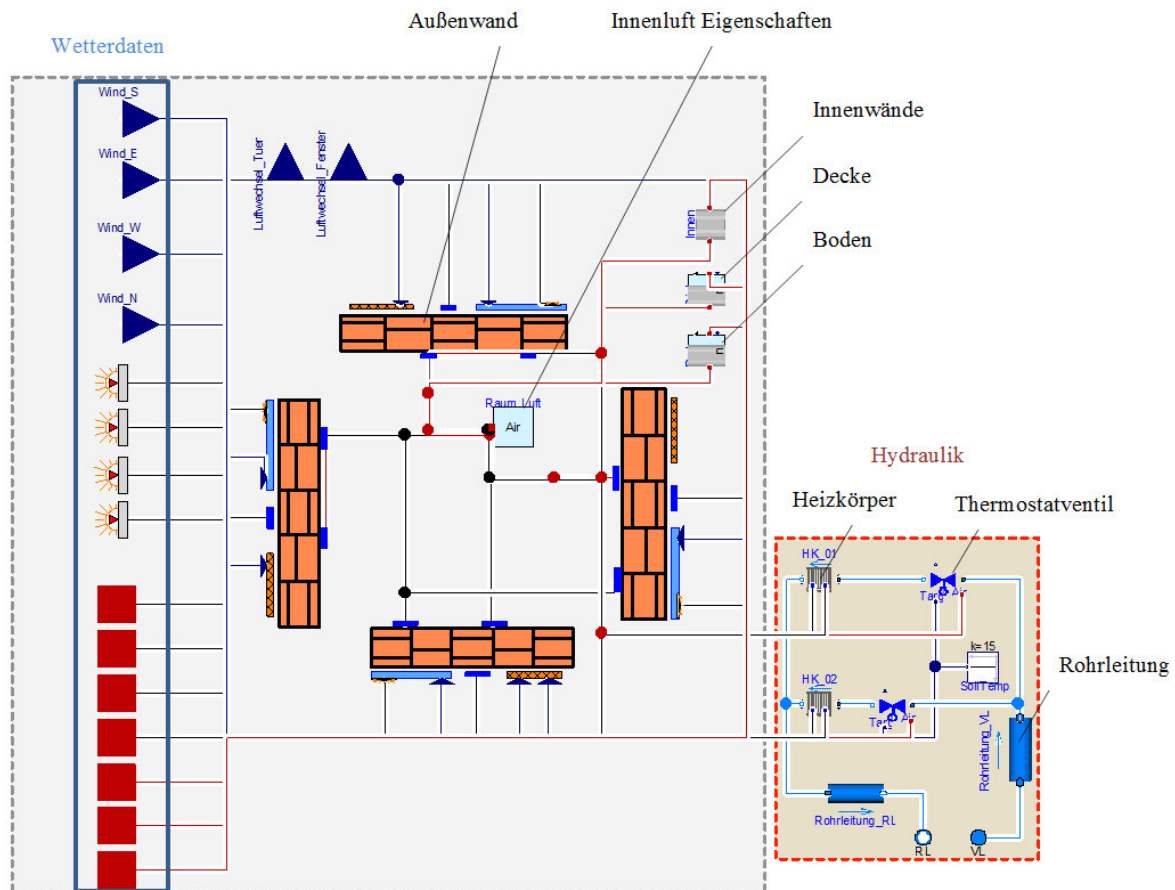


Abbildung 219: Modellierung eines Referenzgebäudes als Einzonenmodell in Modelica

Das betrachtete Einfamilienhaus besitzt des Weiteren als Mehrzonenmodell vier Etagen (Keller, Erdgeschoss, Obergeschoss und Spitzboden), welche alle beheizbar sind (siehe Abbildung 220). Es erfolgt eine etagenweise Diskretisierung unter Vernachlässigung der horizontalen Einteilung in Räume. Somit ergeben sich vier modellierte Bereiche mit voneinander getrennten Luftvolumen. Diese werden einzeln als homogen durchwärmtes Volumen ohne Temperaturschichtung betrachtet und können über Decken und Böden untereinander Wärme austauschen. Die thermische Gebäudehülle weist Dach- und Außenwandflächen mit Umgebungskontakt, wie auch Kellerwände und ein Fundament mit Kontakt zum Erdboden auf. Die das Gebäude mit ihrer symmetrischen Doppelhaushälfte verbindende Zwischenwand wird unter Annahme eines kongruenten Heizverhaltens als Adiabate zum Nebengebäude betrachtet.

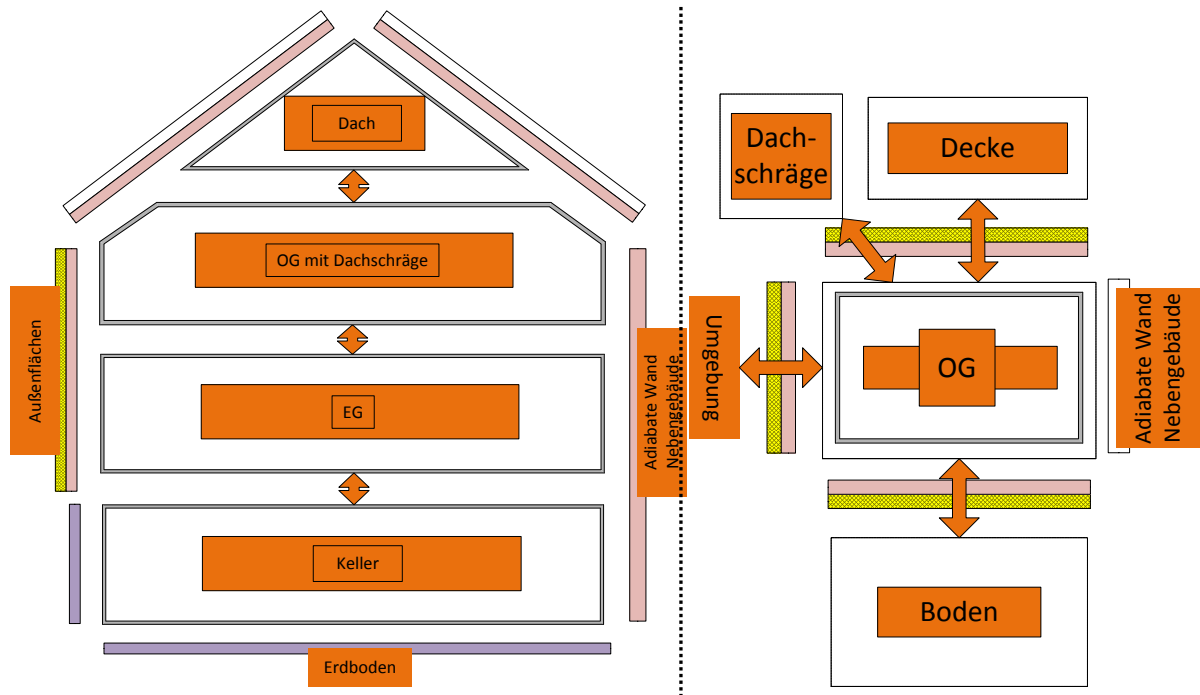


Abbildung 220: Querschnitte des Einfamilienhauses mit dargestellten thermischen Flächen

Beim Mehrfamilienhaus gelten dieselben Annahmen für die Betrachtung der physikalischen Vorgänge wie beim Einfamilienhaus. Zu der vertikalen Diskretisierung des Gebäudevolumens in Etagen kommt eine horizontale Einteilung (siehe Abbildung 221). Diese stellt die beheizten Wohnungen und das Treppenhaus bzw. den Eingangsflur dar und ermöglicht somit eine individuelle Beheizungsregelung der Wohnbereiche. Es ergeben sich somit zehn modellierte Abschnitte, bestehend aus zwei beheizten Wohnbereichen und einem Flur/Treppenhaus. Der Keller wird als ein Bereich zusammengefasst.

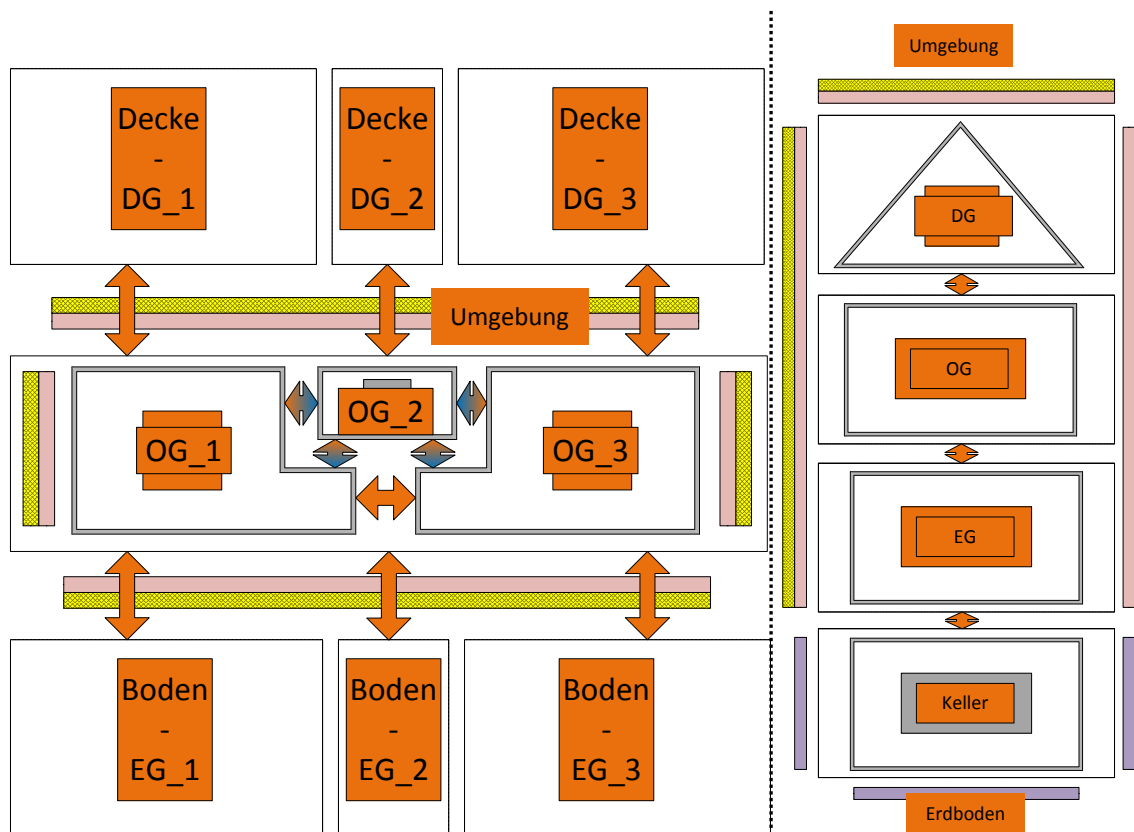


Abbildung 221: Querschnitte des Mehrfamilienhauses mit thermischen Flächen und inneren Strömen

Neben der reinen Bausubstanz wird auch das hydraulische Netz inklusive der Wärmeübergabe an den Raum über Heizkörper berücksichtigt. In Abbildung 219 sind ein Einzonenmodell und die Hydraulik (Heizkörper, Thermostatventile und Verbindungsleitungen) zu sehen. Anhand der Daten von Flachheizkörpern und der Geometrie sowie der Bauart wurde die Nennleistung bestimmt [52]. Diese ist die Bezugsgröße bei der Heizkörper-Modellierung, welche für die Berechnung der Wärmeabgabe ins Gebäude ausschlaggebend ist.

Die Berechnungen des Energiebedarfs und der Energieverluste sind von Faktoren wie klimatischen Randbedingungen (Wetterdaten), Temperatursollwerte im Innenraum, thermischen Eigenschaften der Bauelemente bzw. U-Werte für die Außenhülle und Bewohneranzahl sowie -verhalten abhängig.

Versorgungssystem

Neben der Gebäudehülle hat auch das Heizsystem Einfluss auf die Energieeffizienz. Das Heizsystem besteht hauptsächlich aus einem Wärmeversorger, einer Umwälzpumpe, dem Heizungsvorlaufmischer, einem Raumtemperaturregler (Thermostatventil oder PI-Regler) und einem Wärmeübertrager (Heizkörper). Der implementierte Heizkessel liefert für die Flächenheizung eine zeitlich konstante Temperatur, die vom Gebäudestandard abhängig ist. Die Pumpe kann in der Modellierung konstant oder variabel betrieben werden.

Innerhalb der vergangenen Jahrzehnte hat sich die Technologie der Wärmeversorgung erheblich weiterentwickelt, sodass das Jahr der Installation im Gebäude neben dem Wärmeversorgungssystem als Indiz für die Energieeffizienz der Heizungsanlage betrachtet werden kann. Die Anlagentechnik der im Projekt installierten Anlagen sowie auch die zugehörigen Komponenten wie Speicher, Rohre und Ventile wurden modelliert. Die Modelle sind anhand der Herstellerdaten parametrisiert worden, um das Verhalten der realen Komponenten möglichst authentisch abzubilden. Die verschiedenen Anlagen sind in Tabelle 59 aufgeführt. Die Kennlinienmodelle für Stirling-, Otto-Motoren und Brennstoffzellen sind sich dabei sehr ähnlich. Der Unterschied stellt sich u.a. durch einen integrierter Brennwertkessel im Stirling- und Otto-Modell dar. Auch die Regelungen sind bei Stirling- und Otto-Motoren unterschiedlich. Die Brennstoffzellen sind dauerhaft in Betrieb und die erzeugte Wärme wird in dem Fall kontinuierlich in den Warmwasserspeicher (WWS) eingespeist. Nachfolgend werden ein KWK-System und Wärmespeicher exemplarisch beschrieben. Die technischen Daten der verwendeten Technologien sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 59: Eine Übersicht der verwendeten Heizungstechnologien und WWS Modelle

Technologie	SOFC	Stirling	Stirling	Otto	Otto
Hersteller	Solid Power	Viessmann	Brötje	Vaillant	Vaillant
elektrische Leistung Primärsystem [kW]	1,5	1,0	1,0	1,0	1,3-4,7
thermische Leistung Primärsystem [kW]	0,5	5,3	5,3	2,5	4,7-12,5
thermische Leistung Zusatzheizgerät [kW]	3,5-20,6	3,6-26,0	3,8-26,3	2,5-28,3	5,9-35,4
elektrischer Wirkungsgrad Primärsystem [%]	60,0	14,0	14,0	26,3	24,6
thermischer Wirkungsgrad Primärsystem [%]	25,0	108,0	107,4	92,0	90
Pufferspeichertyp	Kombi	Kombi	Kombi	Kombi	Kombi
Pufferspeichervolumen [l]	750	750	230	300	1.000

In Abbildung 222 sind die Komponenten der KWK-Anlage und deren Parameter mit Erklärung dargestellt. Das Modell beinhaltet zwei Wärmetauscher für die Wärmeübertragung vom Gerät zum Wärmeübertragungsmedium und vom Gerät zur Umwelt (Abgase). Außerdem werden die verbrauchten und generierten Energiemengen kontinuierlich berechnet. Die Wärmeverluste des Geräts sind im Modell dargestellt und werden in der Energiebilanz integriert.

Die Regelung ist vom Typ der KWK-Anlage abhängig und wird in einem zusätzlichen Modell dargestellt.

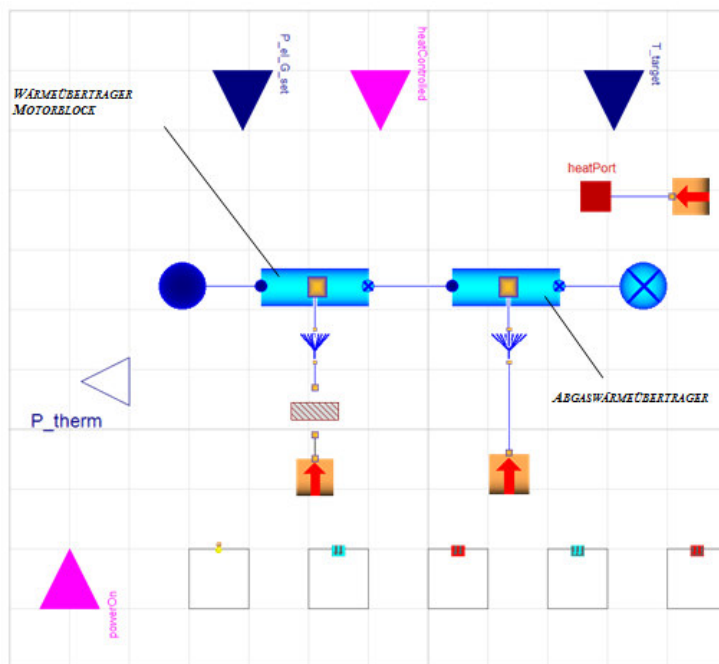


Abbildung 222: Modell der KWK-Anlage ohne Regelung (Stirling, Otto und Brennstoffzelle)

Aus wirtschaftlichen und energetischen Gründen wird eine KWK-Anlage grundsätzlich mit einem Wärmespeicher kombiniert. Die realen Vorgänge in einem Wärmespeicher sind weit aus komplexer als im Modell dargestellt. Eine exakte Beschreibung des Temperaturverlaufs und der Strömungsverhältnisse wäre durch ein aufwändig abgestimmtes dreidimensionales, fluidmechanisches Finite-Elemente-Modell möglich. Da die expliziten strömungsmechanischen Eigenschaften des Speichers jedoch nicht Gegenstand der Untersuchungen sind, sondern in erster Linie die globalen thermischen Einflüsse auf die gesamte Anlage, ist die hier angeführte Modellierung ausreichend. Eine grafische Darstellung des Kombi-Warmwasserspeichers ist in Abbildung 223 zu sehen.

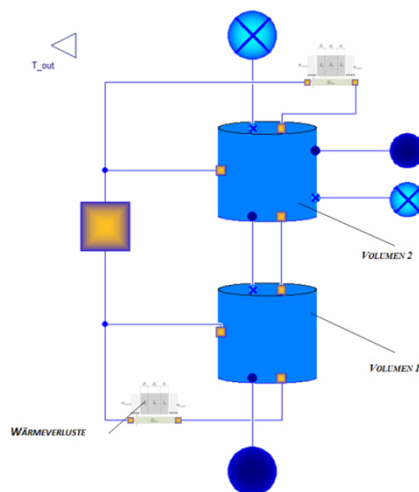


Abbildung 223: Modelica Struktur des Wärmespeichers

Die Modelle *VOLUMEN 1* und *VOLUMEN 2* bedienen sich als Wärmetauscher mit unterschiedlichen Eingangsdaten. Dadurch wird der Speicher in dem Fall (anlagenabhängig) mit zwei getrennten Schichten für Heizung und Warmwasser abgebildet. Geometrie und Wärmeübertragungskoeffizient sind als Parameter einstellbar. Über das Modell *WÄRMEVERLUSTE* sind die Verluste an die Umgebung in den Berechnungen berücksichtigt. In der Tabelle 60 werden die Parameter ausführlich erläutert.

Tabelle 60: Beschreibung der Parameter für den Wärmespeicher

Parameter	Einheit
Rohr Medium-Modell	
Speicher Medium-Modell	
Warmwassertemperatur, am Austritt des Speichers gemessen	An/Aus
Wärmeübergang an die Umgebung	An/Aus
Wärmeübergangskoeffizient für den Speicher	
Wärmeübergangskoeffizient für das Rohr	
Wärmeübergangskoeffizienten für die Speicherschichten	An/Aus
Speicherinnendurchmesser	M
Speicheraußendurchmesser	M
gesamtes Tankvolumen	L

Regelung

Die KWK-Anlagen-Regelungen unterscheiden sich je nach Hersteller und Technologie. Mit Regelungen sind hier die Vor- und Rücklauftemperatur, Takt-Dauer, das Herauf- und Herunterfahren und die Betriebsweise der Anlage gemeint. Aufgrund hoher Nutzungsgrade von KWK-Anlagen können fossile Brennstoffe in entscheidender Menge eingespart werden. Um einen wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen, sollte eine KWK-Anlage zwischen 4.000 und 5.000 Betriebsstunden im Jahr unter Volllast laufen. Dabei ist eine genaue Abstimmung an den Strom- und Wärmebedarf der verwendeten Verbraucher erforderlich. Für diese Aufgabe sind diese mit passenden Steuer- und Regelkomponenten ausgerüstet. Man unterscheidet zwischen wärme- oder stromgeführter bzw. -orientierter Betriebsweise. Hier soll auf die wärmegeführte Betriebsweise, die am häufigsten im Ein- bis Zweifamilienhaussektor angewendet wird, eingegangen werden. Wärmegeführt bedeutet in dem Fall, dass die Anlagen einen thermischen Warmwasserspeicher beladen und ab einer bestimmten Speichertemperatur abschalten. Sobald der Speicher auf einen unteren Temperaturgrenzwert abgekühlt ist, wird die KWK-Anlage wieder eingeschaltet. Sowohl die Temperatur des Heizungsspeichers als auch die des Trinkwarmwasserspeichers werden bei der Regelung berücksichtigt, siehe Abbildung 224. Sollte die Anlage bereits eingeschaltet sein, die Leistung aber trotzdem nicht ausreichen um eine ausreichende Wärmeversorgung sicherzustellen, wird zusätzlich das Zusatzheizgerät eingesetzt

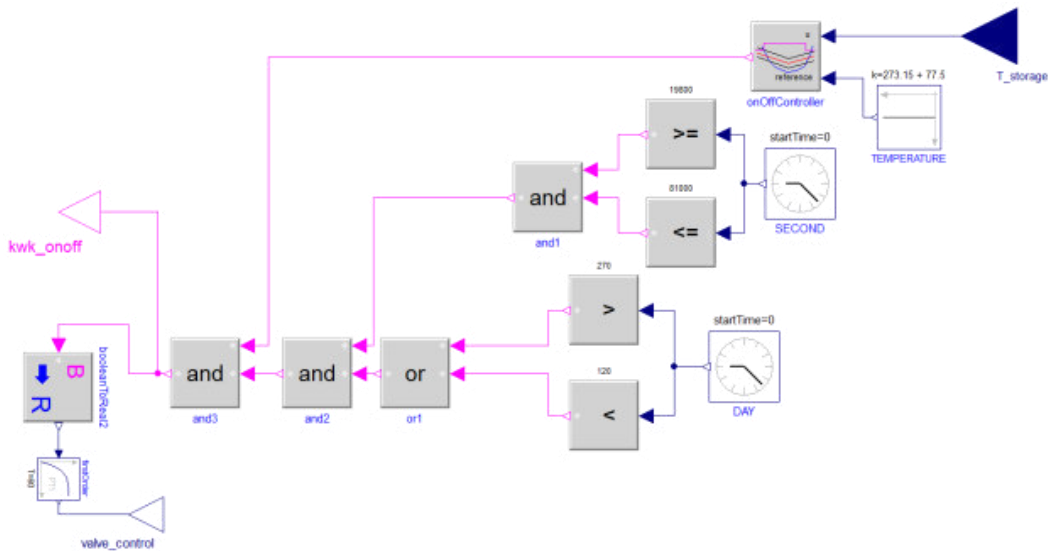
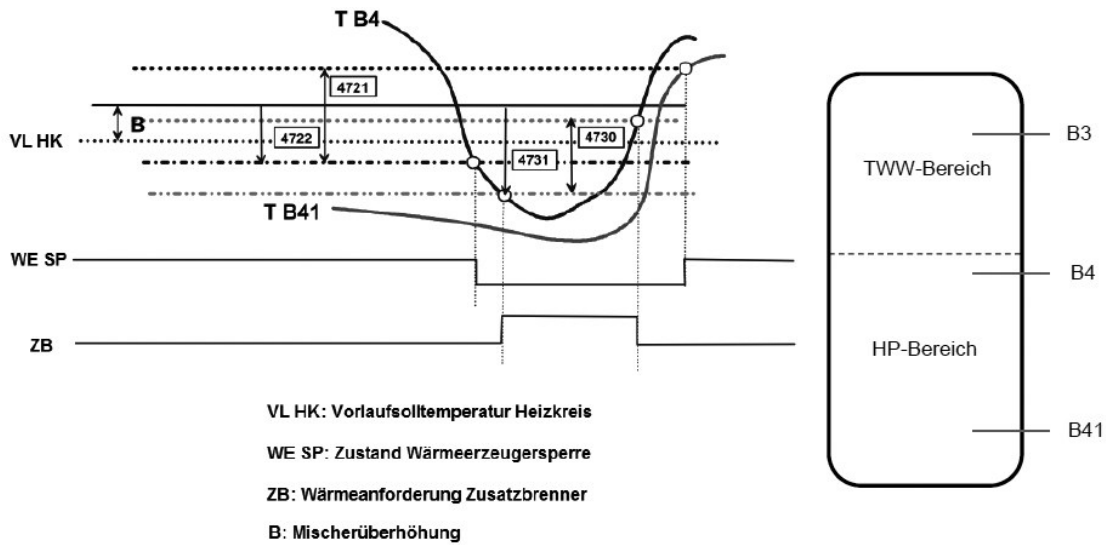


Abbildung 224: Regelungsmodell einer Stirling KWK-Anlage (BRÖTJE EcoGen)

Parallel sorgt eine witterungsgeführte Heizungsregelung dafür, dass die Vorlauftemperatur an den tatsächlichen Wärmebedarf angepasst wird. Die gemessene Außentemperatur und der eingestellte Wert der Raumtemperatur, wie auch die Gebäudeandbedingungen bestimmen die resultierende Vorlauftemperatur im Heizkreis. Die Beziehung zwischen Außen- und Vorlauf-temperatur wird durch die Heizkennlinien dargestellt. Die Steilheit einer Heizkennlinie bestimmt, wie stark sich eine Änderung der Außentemperatur auf die Vorlauf-temperatur auswirkt. Die Heizkennlinie hängt von verschiedenen Faktoren ab. Typische Werte bei einer konventionellen Heizung sind zwischen 1,4 und 1,6. Eine Heizkennlinie mit einem Wert von 0,5 wird üblicherweise bei Fußbodenheizungen eingesetzt.

Ferner ergänzt eine Nachtabsenkung, falls vorhanden, die Gebäude-Regelung. Zusätzlich zur „An/Aus“ Funktion mit vorgeschriebenen Zeitpunkten gehört die Solltemperatur in dem Nachtabsenkung-Modell dazu. Diese Reduzierung erfolgt über die Einstellung in der Heizungsregelung durch das Festlegen einer neuen Heizkennlinie. Dadurch bleibt der Massenstrom unverändert und es werden alle Räume gleichmäßig abgesenkt.

Kopplung Gebäude und Technologie

Um die Gebäude mitsamt ihrer Technik in der Dynamik und über die komplette Heizperiode bewerten zu können, werden Simulationen mit den betrachteten Systemen durchgeführt.

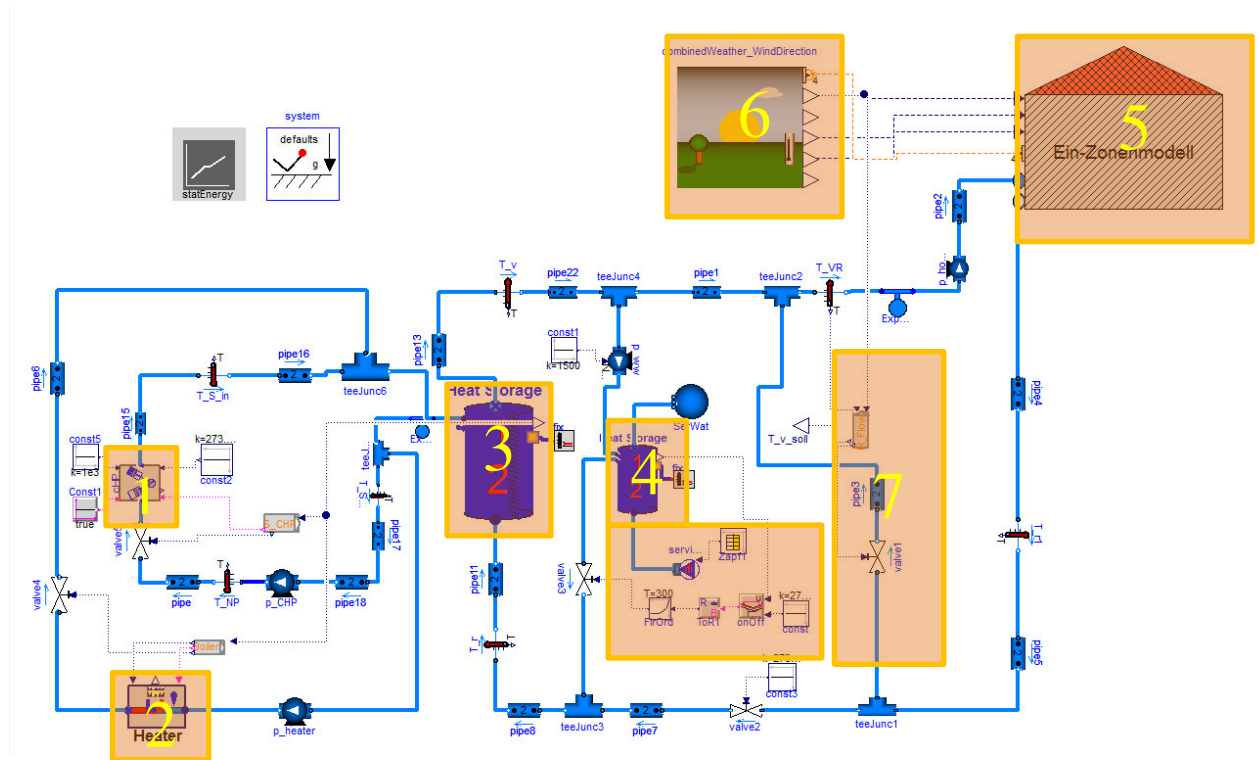


Abbildung 225: In Modelica abgebildetes Gesamtsystem

In Abbildung 225 wird ein gekoppeltes System gezeigt, wobei mit 1 das KWK-Modul, mit 2 das Zusatzheizgerät, mit 3 der Pufferspeicher, mit 4 der Trinkwarmwasserspeicher, mit 5 das Hausmodell, mit 6 das Wettermodell und mit 7 die Rücklaufanhebungsmechanismen gekennzeichnet sind. Somit können sowohl die Einflüsse der Anlagentechnik auf das Gebäude und umgekehrt ermittelt werden, als auch die Einflüsse beispielsweise der Speichergröße auf die Betriebszeiten der KWK-Anlagen. Durch die dynamischen Betrachtungen können diese Speichereffekte sowohl in der Gebäudemasse (Abkühlung / Aufheizung) als auch in der Gebäudetechnik (Wasserspeicher) berücksichtigt werden. Beim Aufbau der hydraulischen Systeme ist darauf zu achten, dass es immer einen Punkt im hydraulischen Kreislauf geben muss, der das System bestimmt. Dies ist in der Haustechnik ein Ausdehnungsgefäß, das dafür sorgt, dass das System überhaupt simuliert werden kann. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass beim Einsatz von Ventilen (vor allem Dreiweeventile) der genaue hydraulische Abgleich gewährleistet ist. Ansonsten kann es hier zu Simulationsabbrüchen bzw. sehr langsamen Simulationen kommen.

A15 Screenshots openHAB-Visualisierung

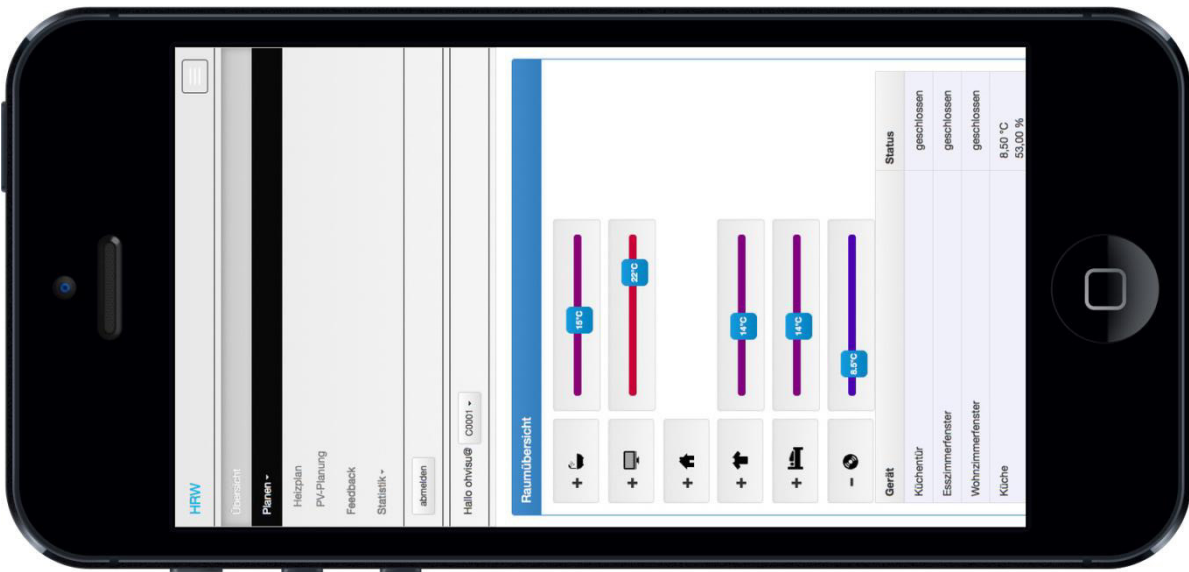


Abbildung 226: Darstellung der mobilen Applikation | Teil 1



Abbildung 227: Darstellung der mobilen Applikation | Teil 2

A16 Screenshot der Projekthomepage



The screenshot shows the homepage for the '100 KWK-Anlagen in Bottrop' project. The header features the project logo and a navigation menu with 'Kontakt | Impressum'. The main content area is divided into several sections:

- Navigation:** A vertical menu on the left includes 'News', 'Technologie', 'Fortschritt', 'Projektförderung', 'Presseschau', 'Eindrücke', and 'Service'.
- Main Content:**
 - 100 KWK-Anlagen in Bottrop:** A central section with a map of Bottrop and a detailed text description of the project, including its goals and partners.
 - Projektbeschreibung:** Text explaining the project's focus on CO₂ reduction and energy efficiency in the InnovationCity Bottrop.
 - Logo:** The 'KWK NRW' logo with the tagline 'Strom trifft Wärme'.
- Projektumgebung:** A vertical list of logos for partner organizations: 'gwi Gas- und Wärme Institut Essen e.V.', 'InnovationCity Ruhr', 'HRW HOCHSCHULE RUHR WEST UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES', 'DVGW', 'ELE', and 'ETN'.
- Projekträger:** Logos for 'Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen' and 'EUROPÄISCHE UNION'.

At the bottom, a footer provides contact information: © Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. · Hafenstraße 101 · 45386 Essen · Tel. +49 (0)201 36 13-0 · Fax +49 (0)201 36 13-111 · Info@100kwk.de

Abbildung 228: Darstellung der Projekthomepage