

# Optimierung von Mikro-KWK-Systemen

## Abschlussbericht

Vorhaben im Verbundprojekt „Regionales Virtuelles Kraftwerk“

Förderkennzeichen: 03ET1042B

Laufzeit des Vorhabens: 1.11.2011 – 30.04.2015

**Technische Universität München**

**Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik**

**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner**

Bearbeiter: Dr.-Ing. Peter Tzscheutschler  
MSc. Wessam El-Baz  
Dr.-Ing. Christian Heilek  
Dr.-Ing. Josef Lipp  
Dipl.-Ing. Mark Windeknecht

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

München, Januar 2016

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**



## Kurzfassung

Mikro-KWK Systeme sind hocheffiziente Anlagen, zur Bereitstellung von Strom und Wärme. In Verbindung mit Wärmespeichern ist ein flexibler planbarer Einsatz in der Objektenergieversorgung und dadurch ein Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem möglich.

Gegenstand des Forschungsvorhabens „Optimierung von Mikro-KWK Systemen“ war die Untersuchung von Mikro-KWK-Systemen durch Versuche im Labor, Feldmessungen und numerische Simulation. Das Ziel war dabei die Optimierung des Betriebsverhaltens der Anlagen zur Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems im Gebäude aber auch dahingehend, die Erzeugungsanlagen flexibler einzusetzen, um die Wirtschaftlichkeit durch bedarfsgerechte Bereitstellung von Strom und Wärme zu verbessern.

Als signifikante Parameter wurden die Ausnutzungsdauer des Mikro-KWK Systems und die Eigennutzung des erzeugten Stroms identifiziert. Der Forschungsansatz zur Optimierung dieser Parameter umfasst Datengewinnung aus Feldmessungen, Modellierung und Simulation des Gesamtsystems und die praktische Umsetzung am Versuchsstand im Labor.

Durch den erreichten optimierten Betrieb konnten die Startvorgänge des Mikro-KWK Systems und die Betriebsdauer des Zusatzheizgeräts um jeweils rund 25 % reduziert werden. Durch den Betrieb der KWK-Anlage bei höheren Börsenstrompreisen können die Erlöse um knapp 10 % gegenüber der Standardregelung gesteigert werden.



## Inhalt

|   |    |
|---|----|
| Inhalt .....  | 5  |
| 1 Einleitung .....  | 7  |
| 1.1 Projektziele .....  | 7  |
| 1.2 Methodischer Ansatz .....   | 8  |
| 2 Experimentelle Untersuchungen.....  | 11 |
| 2.1 Versuchsstand für Mikro-KWK Systeme.....                                  | 11 |
| 2.2 Messungen an einem WhisperGen Stirling BHKW.....                          | 17 |
| 2.3 Messungen an einem BlueGen SOFC Brennstoffzellensystem .....              | 28 |
| 2.4 Analyse des Verhaltens thermischer Speicher .....                         | 31 |
| 2.5 Feldversuche .....  | 33 |
| 2.6 Ableitung von Typtagen .....  | 37 |
| 3 Modellierung und Simulation.....  | 41 |
| 3.1 Gebäude und Energiebedarf .....   | 41 |
| 3.2 Komponenten der Heizungsanlage .....                                      | 45 |
| 3.3 Komponenten der Stromversorgung.....                                      | 48 |
| 3.4 Exemplarische Ergebnisse .....  | 50 |
| 4 Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK Anlagen.....                          | 51 |
| 4.1 Flexibilisierung des KWK Betriebs.....                                    | 52 |
| 4.2 Ergebnisse.....   | 54 |
| 5 Auswirkungen der Einspeisung aus KWK-Anlagen auf das Energiesystem.....     | 57 |
| 5.1 Untersuchungsgegenstand.....  | 57 |
| 5.2 Methodik .....  | 57 |
| 5.3 Daten .....   | 59 |
| 5.4 Szenarien.....  | 64 |
| 5.5 Ergebnisse.....   | 65 |
| 6 Aktivitäten im Rahmen des EBC Annex 54.....                                 | 73 |
| 6.1 Subtask A - Technical Development.....                                    | 74 |
| 6.2 Subtask B - Performance Assessment .....                                  | 75 |
| 6.3 Subtask C - Robust Mechanisms for Diffusion .....                         | 77 |
| 6.4 Schlussfolgerungen .....  | 78 |
| 7 Zusammenfassung und Fazit.....  | 81 |
| A Anhang.....   | 85 |
| 7.1 Hydraulik und Messstellenschema des Mikro-KWK Versuchsstands[Wild12]..... | 86 |
| 7.2 Projektrelevante Publikationen und Präsentationen .....                   | 89 |

7.3 Quellen ..... 93

# 1 Einleitung

2008 beschloss die Bundesregierung im Rahmen des Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramms der Bundesregierung (IEKP), den Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) an der Stromerzeugung in Deutschland bis 2020 auf 25 % zu verdoppeln. Die nun verabschiedete Novelle des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes präzisiert dieses Ziel auf 110 TWh/a KWK Strom bis zum Jahr 2020 und 120 TWh/a bis 2025. Damit verbunden soll die Kraft-Wärme-Kopplung durch eine Emissionsminderung von 4 Millionen Tonnen einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Der seit Jahrzehnten praktizierte Einsatz von Groß-KWK-Anlagen in Fernwärmenetzen kommt dort an seine Grenzen, wo der Ausbau dieser Netze, durch hohe Trassenlängen oder geringe Wärmeabnahme, nicht wirtschaftlich möglich ist. Für die Objektversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern, kleinen Wärmeinseln und kleinen Gewerbeeinheiten bieten sich Mikro-KWK-Systeme an, die bereits ab einer elektrischen Leistung von 1 kW am Markt verfügbar sind.

Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien steigt die Belastung sowohl der Transport- als auch der Verteilnetze. Während der Ausbau überregionaler Stromleitungen vor allem durch die überwiegend im Norden installierten Windkraftanlagen bedingt wird, bereitet im Süden Deutschlands der bereits hohe Ausbaugrad an Photovoltaik Probleme in den Ortsnetzen. Besonders bei lokal auftretenden Problemen müssen lokal wirkende Lösungen gefunden werden. Hier können Mikro-KWK-Systeme als planbare Erzeuger einen Beitrag leisten, wenn von der bisher wärmegeführten zu einer stromgeführten Betriebsweise übergegangen wird. Durch den schon heute bei Mikro-KWK-Anlagen üblicherweise vorhandenen Wärmespeicher lässt sich hier zeitweise eine Entkopplung von Stromerzeugung und Deckung des Wärmebedarfs erreichen.

## 1.1 Projektziele

Ziel dieses Projekts ist es, Mikro-KWK-Systeme zu analysieren, Optimierungspotenziale zur Effizienzsteigerung aufzuzeigen und eine energiewirtschaftliche Bewertung durchzuführen.

Dazu werden neben einer numerischen Simulation auch experimentelle Messungen am Prüfstand und in Feldversuchen durchgeführt.

Abbildung 1-1 zeigt mögliche Optimierungsansätze zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Systemen.

Unterschieden werden systemische und betriebliche Ansätze. Auf der **Systemseite** ist, neben der Auslegung des KWK-Systems nach wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten, vor allem die Einbindung in das Heizungssystem und die Anbindung an den thermischen Speicher von Relevanz.

Im **Betrieb** ermöglicht der thermische Speicher eine zeitweilige Entkopplung von Stromerzeugung

gung und Wärmeabnahme. Diese Flexibilität kann genutzt werden, um nach derzeitigen wirtschaftlichen Gesichtspunkten den Anteil der Eigennutzung des erzeugten Stroms zu erhöhen. Zukünftig ist auch für Mikro-KWK-Systeme die Betriebsoptimierung aus Sicht des Stromsystems anzustreben. Durch die Einbindung der Anlagen in ein Smart Grid können sie aktiv zur Integration erneuerbarer Energien beitragen.

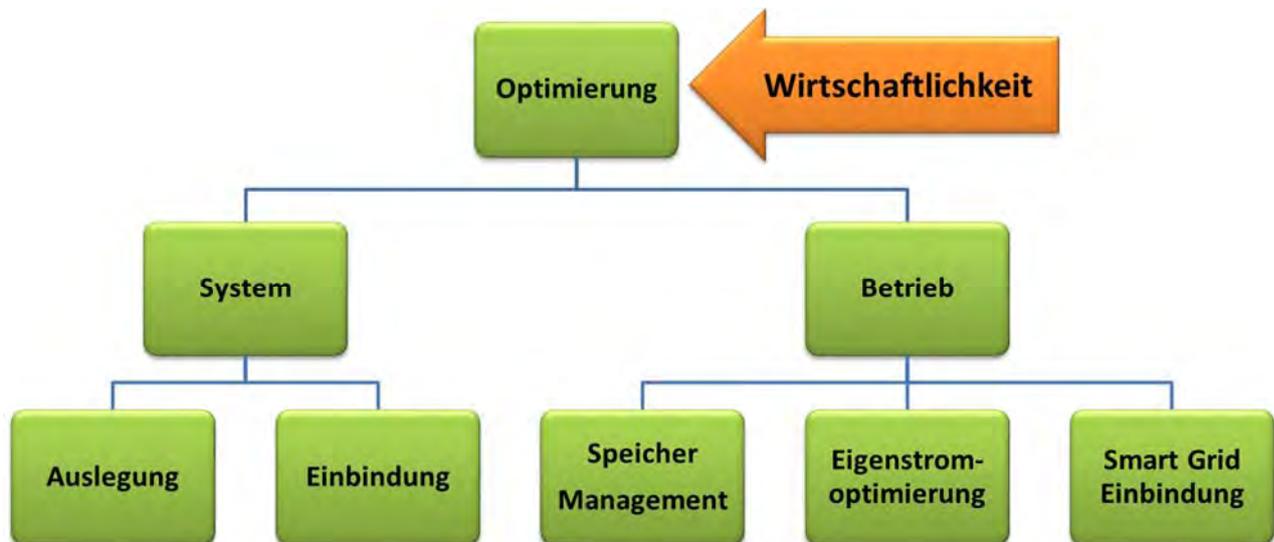


Abbildung 1-1: Optimierungsansätze bei Mikro-KWK-Systemen

## 1.2 Methodischer Ansatz

Der methodische Ansatz zur Bearbeitung dieses Projekts gliedert sich im Wesentlichen in vier Teile, die in Abbildung 1-2 auch in ihrem Zusammenwirken schematisch dargestellt sind:

1. Die **Modellierung** des Systems mit allen relevanten Komponenten. Neben dem Mikro-KWK-System umfasst dies z. B. auch das zu versorgende Gebäude und den Wärmespeicher. Eingesetzt werden moderne Modellierungs- und Simulationstools wie TRN-SYS oder SimulationX. Die Simulation erlaubt, in kurzer Zeit eine Vielzahl von Szenarien oder Parametervariationen durchzuführen. Eine detailliertere Beschreibung enthält [Abschnitt 3](#).
2. Das Verhalten von Mikro-KWK-Systemen kann im **Laborexperiment** am Versuchstand untersucht werden. Vorteile hierbei sind die definierten Umgebungsbedingungen, die Reproduzierbarkeit von Systemzuständen und die Möglichkeit, eine Vielzahl von Parametern messtechnisch zu erfassen. Im [Abschnitt 2](#) sind die im Rahmen dieses Projekts entstandenen Versuchseinrichtungen und die prinzipielle Durchführung von Versuchen erläutert.
3. Erkenntnisse über den realen Betrieb von Mikro-KWK-Systemen im Praxisbetrieb werden durch **Feldversuche** gewonnen. In [Abschnitt 2.5](#) ist exemplarisch der Feldtest einer Anlage beschrieben.

4. Die energiewirtschaftlichen Auswirkungen einer größeren Anzahl von Klein-KWK-Systemen auf das Stromsystem werden in Abschnitt 5 untersucht.

Im Feldversuch gewonnene Daten werden für die Parametrierung der Modelle und Lastdaten für Simulationen verwendet. Simulationsergebnisse werden wiederum am Versuchsstand als Vorgabedaten für Lastverläufe genutzt. Die Ergebnisse der Laborexperimente fließen in die Modellierung ein. Erkenntnisse aus Simulationsrechnungen des Gesamtsystems können in Feldversuchen genutzt werden, um den Betrieb des Mikro-KWK-Systems zu optimieren.

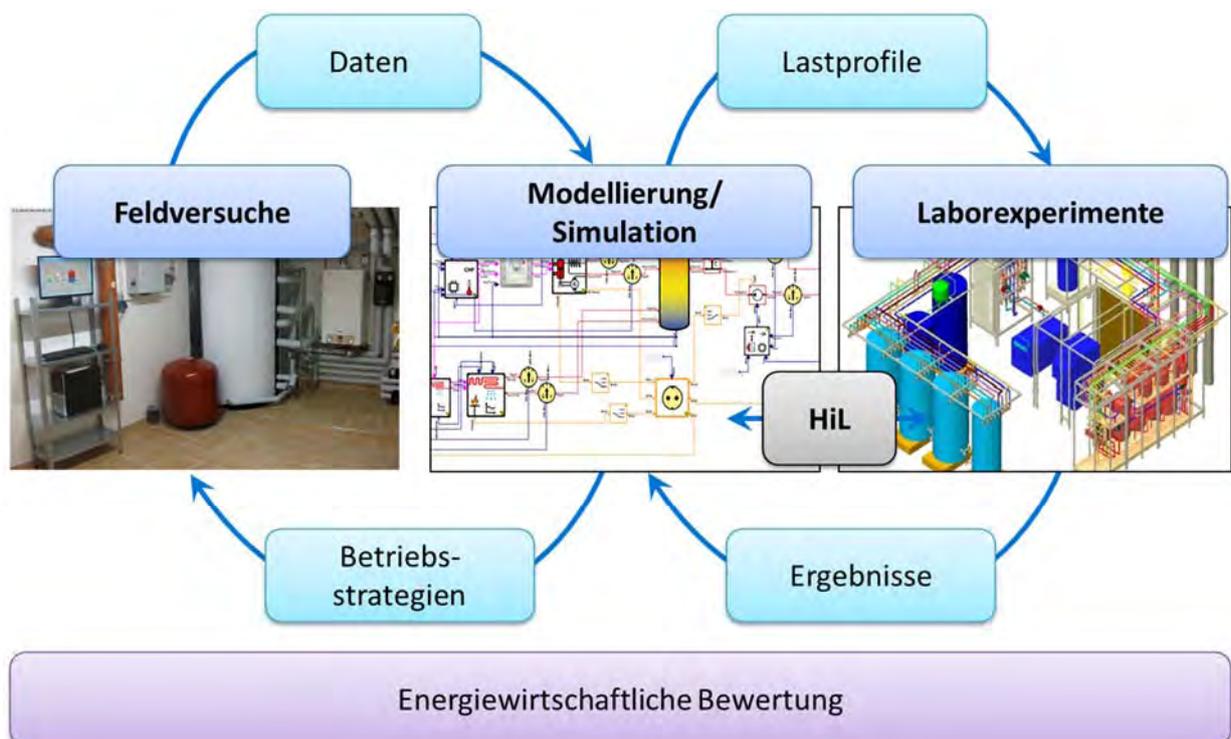


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung des methodischen Ansatzes



## 2 Experimentelle Untersuchungen

Ein Schwerpunkt liegt in der experimentellen Arbeit, d. h. dem Betrieb von technischen Systemen an Versuchsständen. Die dadurch gewonnenen Daten liefern wichtige Informationen über die untersuchten Technologien und dienen als Eingangsdaten für die spätere Simulation von Systemen. Umgekehrt können aus der simulativen Optimierung erarbeitete Ergebnisse experimentell validiert werden.

### 2.1 Versuchsstand für Mikro-KWK-Systeme

Der Fokus in diesem Projekt liegt auf Mikro-KWK-Systemen in der Leistungsklasse um 1 kW elektrische Leistung. Ursprünglich war geplant, den vorhandenen Prüfstand (Schema siehe [Abbildung 2-1](#)) für Messungen an diesen Systemen zu verwenden. Erste Simulationen haben jedoch ergeben, dass die Wärmeverluste dieses Prüfstands aufgrund seiner Komplexität und der Leitungslängen zu hoch sind und die Ergebnisse der Versuche zu sehr beeinflussen würden. Durch die geringeren Leistungen hätten auch Umbaumaßnahmen an der Mess- und Regeltechnik durchgeführt werden müssen. Daher wurde entschieden, einen kleineren, einfacheren Versuchsstand mit möglichst kurzen Leitungslängen zu errichten.

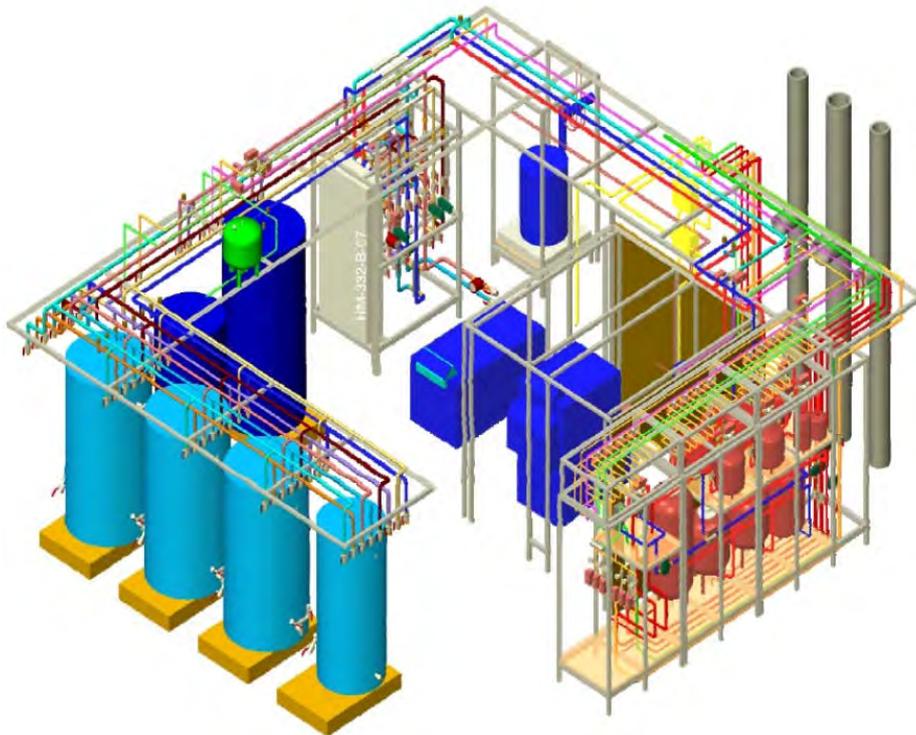


Abbildung 2-1: Versuchsstand für Mikro-KWK-Systeme 5-kW-Klasse

### 2.1.1 Konzeption des Versuchsstands

Im Rahmen der Konzeption des Versuchsstands wurden zunächst die Anforderungen an die Anlage definiert und anschließend das nachfolgend beschriebene hydraulische und messtechnische Schema entwickelt. Dabei konnte auf Erfahrungen mit dem o. g. Versuchsstand zurückgegriffen werden.

#### Anforderungen

Folgenden Anforderungen soll der Versuchsstand genügen:

- Abbildung des thermischen Verhaltens von Ein- und Zweifamilienhäusern und damit verbunden thermische Leistungen von bis zu 50 kW.
- Realitätsnahe Darstellung der thermischen Lasten durch Beheizung und Brauchwarmwasserbereitung inklusive Zirkulationsverlusten. Daraus resultiert der dynamische Betrieb der Wärmesenken.
- Einbindung von thermischen Speichern für die Heizwärme und das Brauchwarmwasser.
- Erfassung aller relevanten Flüsse von Erdgas, elektrischer Energie und Wärme in hoher zeitlicher Auflösung.
- Darstellung der relevanten Temperaturniveaus, in den Wärmespeichern auch ortsaufgelöst.

#### Schema des Versuchsstands

Das aus obigen Anforderungen entwickelte Schema zeigt Abbildung 2-2. Darin ist auf der **Erzeugerseite** (rechts) das Mikro-KWK-Modul dargestellt. Neben der elektrischen Leistungsaufnahme und -abgabe werden der Gasverbrauch, der wasserseitige Durchfluss und die Temperaturen von Vorlauf, Rücklauf und Abgas gemessen. Als zentrales Element ist in der Mitte der **Wärmespeicher**, hier als Kombispeicher, abgebildet. Gemäß den Spezifikationen des Herstellers muss der Wasserkreislauf des Mikro-KWK-Moduls (WhisperGen) vom übrigen Heizungswasser getrennt werden. Diese Systemtrennung wurde durch Anbindung des BHKW-Moduls an einen im Speicher integrierten Wärmetauscher realisiert. Neben den Temperaturen an allen Anschlüssen sind auch zehn Temperaturfühler über die Höhe des Speichers verteilt angebracht (hier nicht dargestellt). Auf der **Verbrauchsseite** (links) werden wiederum alle relevanten Temperaturen und Durchflüsse gemessen. Ein Wärmetauscher im Heizkreis wird über ein Regelventil kontrolliert mit Kühlwasser durchflossen. Analog wird mit den Zirkulationsverlusten auf der Brauchwarmwasserseite verfahren. Über motorbetriebene Regelventile werden die Wärmesenken so geregelt, dass die Wärmeabnahme vorgegebenen Lastprofilen entspricht. Brauchwarmwasserentnahmen werden über schaltbare Ventile mit unterschiedlich eingestellten Durchflüssen nachgebildet, die über Zapfprofile angesteuert werden. Die erzeugte elektrische Energie wird in das Stromnetz des Institutsgebäudes eingespeist.

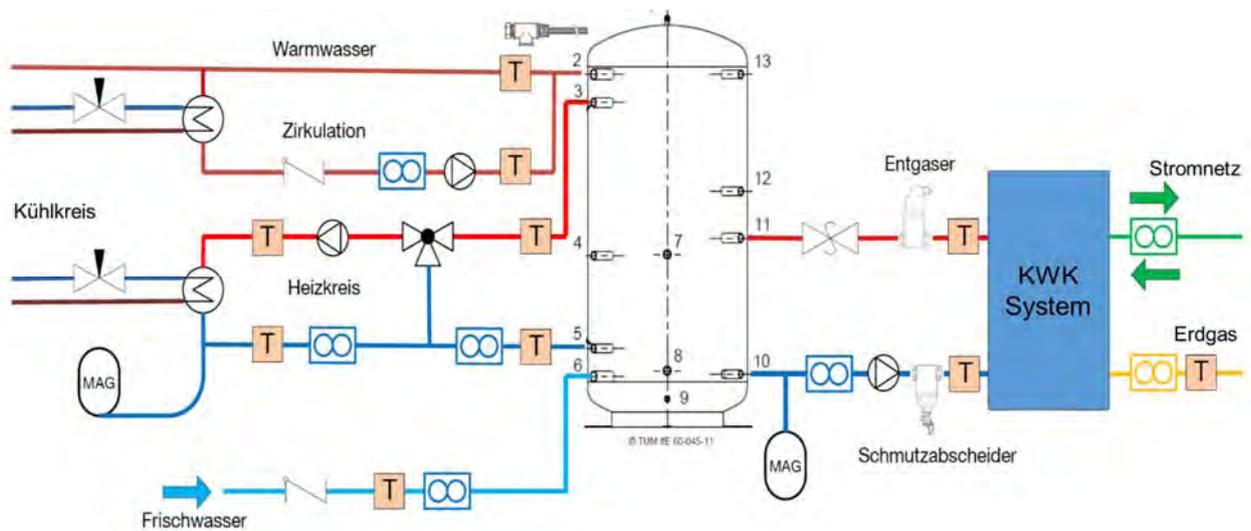


Abbildung 2-2: Schematischer Aufbau des Mikro-KWK-Versuchsstands

### Messtechnik und Messdatenerfassungssystem

Zur Aufnahme der physikalischen Messgrößen sind folgende Sensoren verbaut:

- Pt100-Temperatursensoren werden in Vierleiter-Ausführung zur Temperaturentnahme verbaut. Die Sensoren sind mit frontaler Anströmung direkt in den Rohrleitungen verbaut, damit wird eine geringe Trägheit der Messwerte sichergestellt.
- Zur Durchflussmessung werden in den wasserführenden Rohrleitungen magnetisch induktive Sensoren verwendet.
- Der Gasverbrauch wird über einen Experimentiergaszähler mit Impulsausgang erfasst.
- Die vom BHKW-Modul bezogene bzw. eingespeiste elektrische Leistung wird über Wirkleistungszähler gemessen.
- Schaltzustände und Signale innerhalb des Systems (z. B. Ansteuerung einer Pumpe) werden über Relais geführt und ebenfalls aufgezeichnet.

Für die Erfassung und Auswertung der Messdaten wird ein cRio-System von National Instruments verwendet, das alle Parameter sekundlich aufzeichnet. Dieses System wird auch zur Steuerung des Versuchsstands verwendet. Die Programme zur Messdatenerfassung und Steuerung des Versuchsstands wurden mit LabView erstellt.

Abbildung 2-3 zeigt eine Ansicht des Versuchsstands. In der Mitte ist der Kombispeicher sichtbar, vorne links das WhisperGen Mikro-BHKW, vorne rechts der Schaltschrank mit den Komponenten zur Steuerung und Regelung des Versuchsstands sowie zur Messwerterfassung.

Ein besonderes Augenmerk wird auf den thermischen Speicher gelegt. Am Versuchsstand wurde hierzu ein Kombispeicher mit 750 l Volumen integriert. Bei diesem Speichertyp wird Wärme für den Heizbetrieb gepuffert. Ein innenliegender Rohrwärmetauscher erwärmt aus diesem Wärmespeicher das Brauchwarmwasser. Um die Temperaturschichtung im Speicher erfassen zu können, wurden zehn Temperaturfühler in verschiedenen Höhen des Speichers

angebracht.

In Abbildung 2-4 ist die Verbraucherseite des Versuchsstands dargestellt. Auf der linken Seite ist in schwarz der Heizkreismischer zu sehen. Auf der rechten Seite sind oben die motorbetriebenen Regelventile (blau) und unten die Zapfventile zur Brauchwarmwasserentnahme (rot) erkennbar.



**Abbildung 2-3: Ansicht Versuchsstand für Mikro-KWK-Systeme**



**Abbildung 2-4: Ansicht Versuchsstand für Mikro-KWK-Systeme – Verbraucherseite**

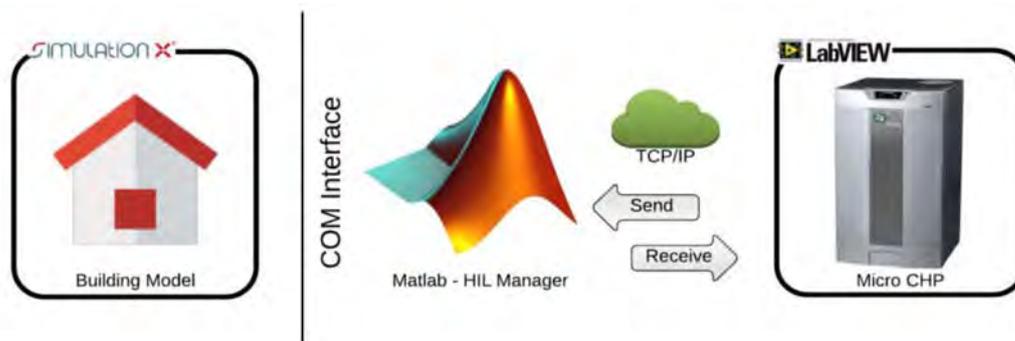
### 2.1.2 Hardware in the Loop

Zunächst wurde die Heizlast des Gebäudes über thermische Lastprofile an den Versuchsstand übergeben. Die Wärmesenke wurde auf diese Leistung geregelt. Damit es dabei nicht zu unrealistischen Zuständen kommt, wurde die Rücklauftemperatur nach unten hin begrenzt. Konnte die angeforderte Wärmemenge eines Zeitschritts nicht vollständig vom System erbracht werden, wurde die Wärmemenge des nachfolgenden Zeitschritts entsprechend erhöht. Mit diesen Maßnahmen konnte ein ausreichend realitätsnahes Verhalten des Versuchsstands erreicht werden.

Diese Vorgehensweise berücksichtigt jedoch das tatsächliche Verhalten der Rücklauftemperatur im Heizkreis nur näherungsweise. Wenn an einem kalten Tag der Wärmebedarf steigt, dann öffnen sich die Thermostatventile an den Heizkörpern, und die Durchflussmenge im Heizkreis steigt. Damit steigt auch die Rücklauftemperatur an. Dadurch verändert sich das Verhalten des Wärmespeichers.

Um dies zu berücksichtigen, wurden die vorgegebenen Lastprofile der Heizlast durch ein Gebäudesimulationsmodell ersetzt und an den Versuchsstand gekoppelt. Dabei wird die am Versuchsstand gemessene Vorlauftemperatur und Durchflussmenge an die Simulation übergeben. Diese ermittelt daraus die Vorgabewerte für Rücklauftemperatur und Durchflussmenge und übergibt sie an den Versuchsstand zurück. Am Versuchsstand werden dann beide Größen eingeregelt.

Als Simulationsumgebung für das Gebäudemodell wird SimulationX eingesetzt. Die Kommunikation und Synchronisation wurde durch ein MatLab-Skript erreicht, das über ein COM Interface mit SimulationX kommuniziert und über TCP/IP mit LabView ([Abbildung 2-5](#)). [EIBa15]

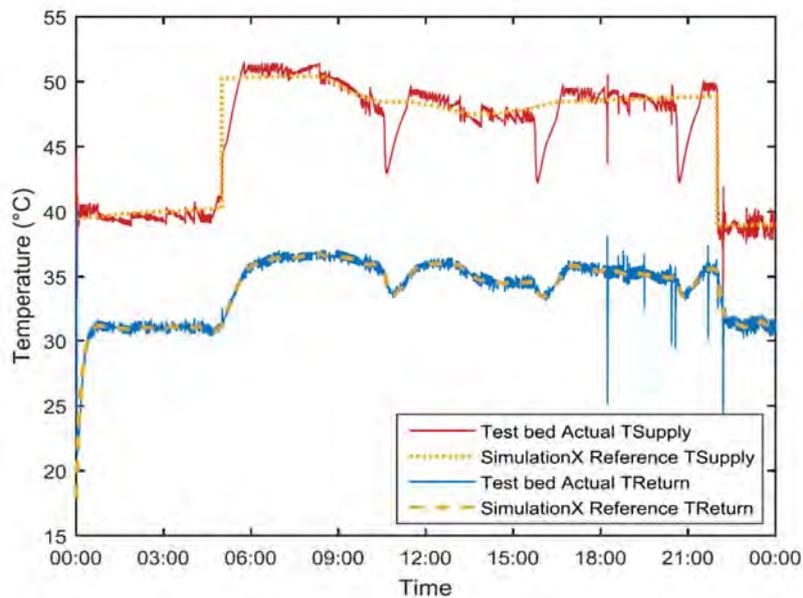


**Abbildung 2-5: HiL – Kommunikation zwischen Versuchsstand und Simulationsmodell**

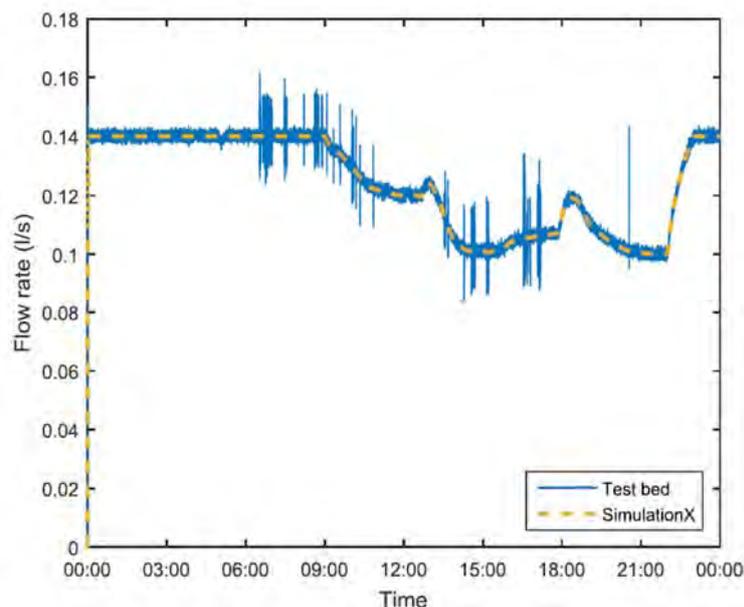
In [Abbildung 2-6](#) sind beispielhaft Verläufe von Vor- und Rücklauftemperatur des Heizkreises dargestellt. Die gestrichelte obere Kurve zeigt die simulierte Vorlauftemperatur ohne Anbindung an den Versuchsstand. Um ca. 5 Uhr morgens ist ein steiler Anstieg erkennbar. Der am Versuchsstand gemessene Verlauf (rot) lässt dagegen die in der Realität vorhandene Trägheit erkennen, so dass hier der Anstieg weniger steil ist. Die beiden unteren Kurven stellen die

simulierte (gestrichelt) und gemessene (blau) Rücklauftemperatur dar und dokumentieren die gute Übereinstimmung zwischen dem Vorgabewert aus der Simulation und dem am Versuchsstand erreichten Wert durch Regelung der Wärmesenke.

In Abbildung 2-7 ist der Durchfluss des Heizkreises dargestellt. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zwischen dem Sollwert aus der Simulation und dem am Versuchsstand eingeregelter Durchfluss erkennbar.



**Abbildung 2-6: HiL – Verlauf der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen [EIBa15]**



**Abbildung 2-7: HiL – Verlauf Heizkreisdurchfluss [EIBa15]**

Ein Vorteil des Hardware-in-the-Loop-Einsatzes besteht auch darin, dass zukünftig auch die thermische Masse des simulierten Gebäudes berücksichtigt und damit in die Optimierung eingebunden werden kann. Auch der Einfluss von unterschiedlichen Bauweisen auf den Betrieb der Mikro-KWK-Anlage kann untersucht werden.

## 2.2 Messungen an einem WhisperGen Stirling BHKW

Zunächst wurden experimentelle Versuche mit einer WhisperGen Stirling Mikro-KWK-Anlage von EHE durchgeführt. Abbildung 2-8 gibt eine Übersicht der wichtigsten technischen Parameter dieses Systems. Die elektrische Leistung beträgt 1,0 kW, die thermische Leistung bei Betrieb des Stirling 5,5 bis 7,8 kW. Durch einen integrierten Zusatzbrenner können bis zu 14,5 kW an Wärmeleistung erreicht werden.



|   |  |
|---|--|
| $\dot{Q}_{th,Stirlingmotor}$ [kW]                           | 7,5 – 8,3                                  |
| $\dot{Q}_{th,ges}$ [kW]                                     | 13,2 – 14,5                                |
| $P_{el}$ [kW]   | 1,0  |
| $\eta_{th,Stirlingmotor}$ heizwertbezogen <sup>26</sup> [%] | > 90                                       |
| $\eta_{el,Stirlingmotor}$ heizwertbezogen [%]               | 10 – 11                                    |
| $\sigma$ (berechnet)  | 0,127                                      |
| $T_{VL,max}$ [°C]   | 85   |
| <b>Motor</b>  | doppelt wirkender 4-Zylinder Stirlingmotor |
| Schall-Leistungspegel [db(A)]                               | 48   |
| Abmessungen [L x B x H] [mm]                                | 563 x 491 x 838                            |
| Gewicht [kg]  | 142  |

Abbildung 2-8: EHE WhisperGen Mikro-KWK-Modul – technische Daten [Lipp15]

Nachfolgende Abbildung 2-9 zeigt schematisch die Einbindung der Mikro-KWK-Anlage in den Versuchsstand. Sie speist über einen Wärmetauscher auf einen Kombispeicher. Dieser dient primär als Pufferspeicher für den Heizkreis, über einen zweiten innenliegenden Wärmetauscher wird jedoch auch das Brauchwarmwasser erwärmt.

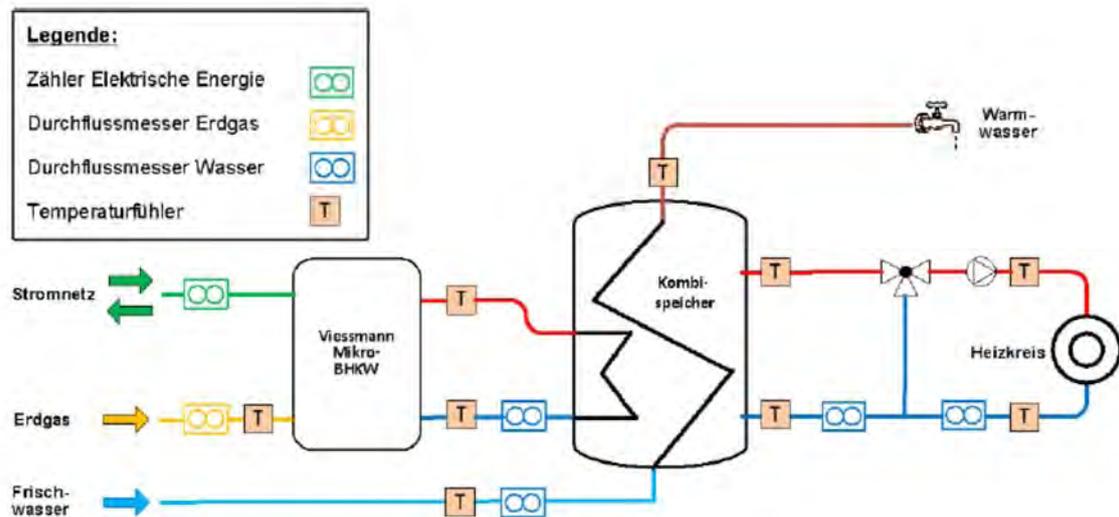


Abbildung 2-9: BHKW-Anlagenkonfiguration mit indirekt geladenem Kombispeicher [Lipp15]

## 2.2.1 Stationäres Verhalten

Zunächst wurden Messungen bei stationärem Betrieb des Mikro-KWK-Moduls durchgeführt. Bei Nennbetrieb des KWK-Moduls wird die Rücklauftemperatur am Versuchsstand auf einen konstanten Wert geregelt. Die Messung beginnt dann, sobald ein stationärer Zustand erreicht ist.

Abbildung 2-10 zeigt eine Messung des WhisperGen BHKW im stationären Zustand. Dieser Zustand wurde 22 min. nach Beginn der Messung erreicht und bis zum Abschalten nach 95 min. eingehalten. Der mittlere Gasverbrauch betrug 8,4 kW, die abgegebene Wärmeleistung 7,2 kW, die elektrische Leistung 1,0 kW. Daraus ergibt sich ein elektrischer Wirkungsgrad von 11,9 %, ein thermischer Wirkungsgrad von 85,7 % und ein Gesamtwirkungsgrad von 97,6 % bezogen auf den Heizwert von Erdgas. Die Anlage arbeitet sehr effizient, jedoch wird nur eine Stromkennzahl von 0,19 erreicht.

Eine Übersicht der Ergebnisse ist in [Abbildung 2-11](#) dargestellt. Zu beachten ist, dass der Nullpunkt der Abszisse der Diagramme jeweils unterdrückt wurde, um die Änderungen der Messgrößen deutlicher hervorzuheben.

Die elektrische Leistung bleibt mit geringen Schwankungen um die 965 W annähernd konstant. Mit steigender Rücklauftemperatur wird die kalte Seite der Stirlingmaschine nicht mehr so gut gekühlt. In Folge steigt auch die Temperatur auf der warmen Seite an, um weiterhin die gewünschte elektrische Leistung zu erzeugen. Der Gasverbrauch des Brenners steigt mit steigender Rücklauftemperatur von 9,0 auf knapp 9,4 kW an. Die ausgekoppelte Wärme sinkt von 7,9 auf 7,6 kW ab.

Der elektrische Wirkungsgrad (Abbildung 2-12) beträgt knapp über 10 %. Er sinkt aufgrund des höheren Gasverbrauchs jedoch nur geringfügig. Deutlicher ist der Rückgang des thermischen Wirkungsgrads von 88 auf 82 % und des Gesamtwirkungsgrads von 98 auf 92 %.

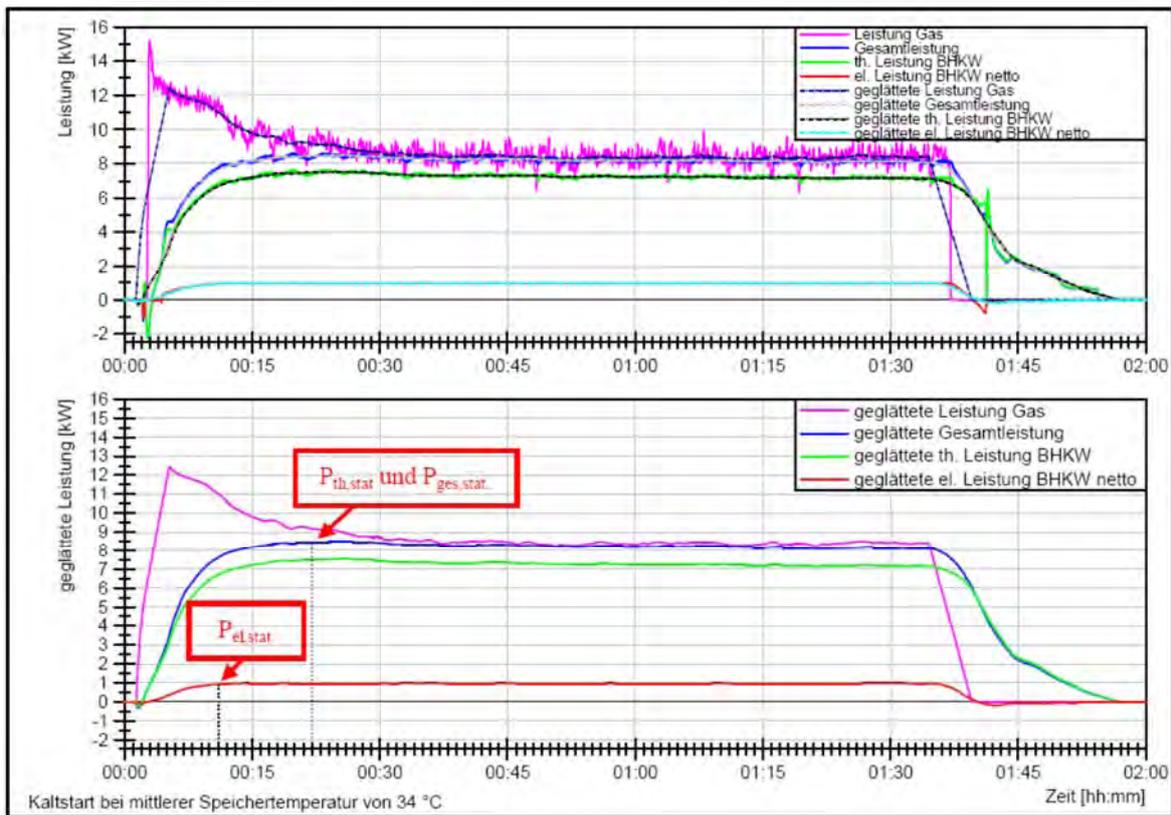


Abbildung 2-10: Stationäre Messung WhisperGen [Wild12]

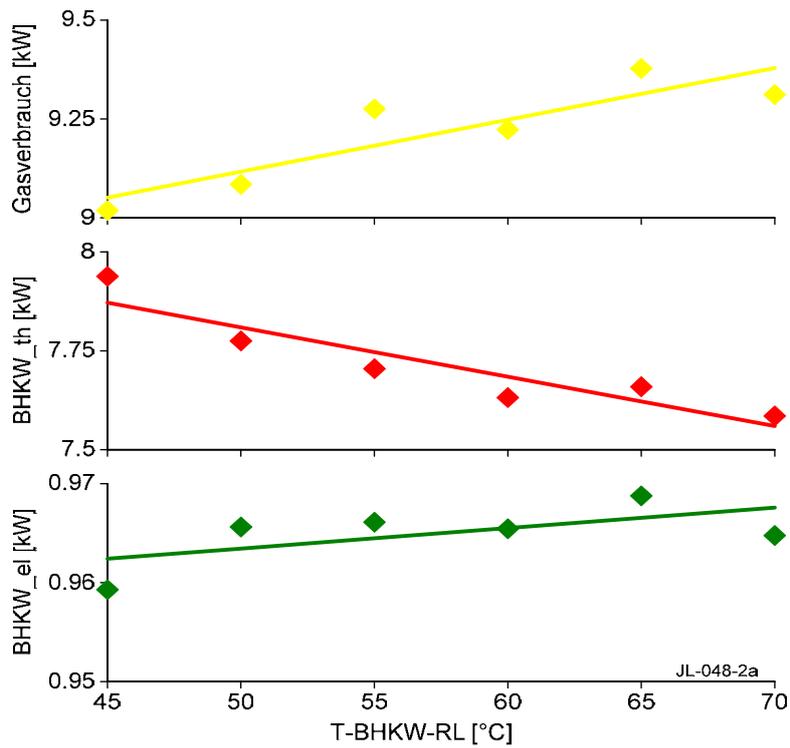


Abbildung 2-11: Leistungen des BHKW im stationären Betrieb

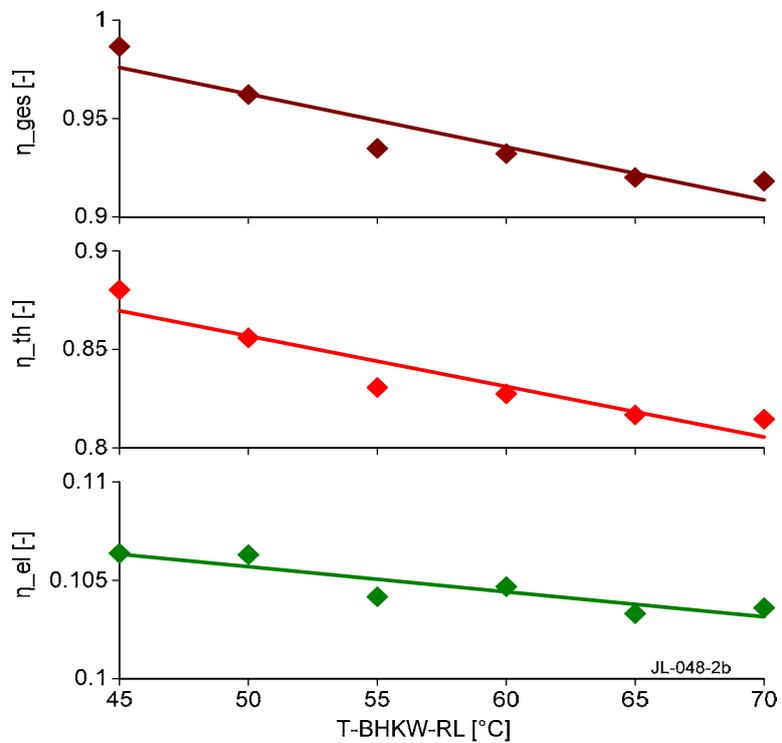


Abbildung 2-12: Wirkungsgrade des BHKW im stationären Betrieb

## 2.2.2 Dynamisches Verhalten

### Kalt- und Warmstart

Exemplarisch zeigt Abbildung 2-13 einen **Kaltstartversuch**. Die ersten zwei Minuten sind in Abbildung 2-14 vergrößert dargestellt. Kaltstart bedeutet, dass sich das BHKW-Modul nach längerem Stillstand bis auf Raumtemperatur abgekühlt hat. Nach erfolgtem Startsignal schaltet nach ca. 25 s die Pumpe ein, und nach 55 s der Hauptbrenner. Zunächst wird Wärme aus dem Speicher bezogen, nach rund 90 s beginnt die Wärmelieferung des BHKW an den Speicher. Der Generatorbetrieb beginnt rund 155 s nach dem Startsignal. Hier wird die deutlich längere Anlaufzeit einer Stirlingmaschine gegenüber einem Ottomotor sichtbar. Nach 11 min. erreicht der Generator Nennlast, nach 22 min. kann die Wärmeleistung als stationär angesehen werden.

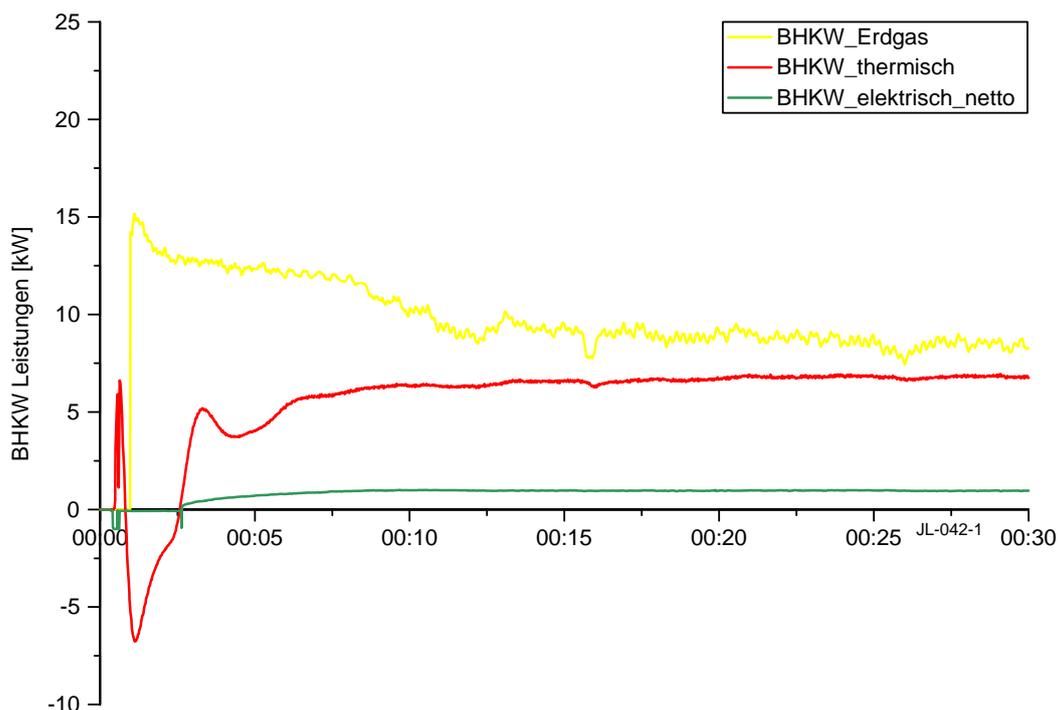


Abbildung 2-13: Kaltstartversuch WhisperGen

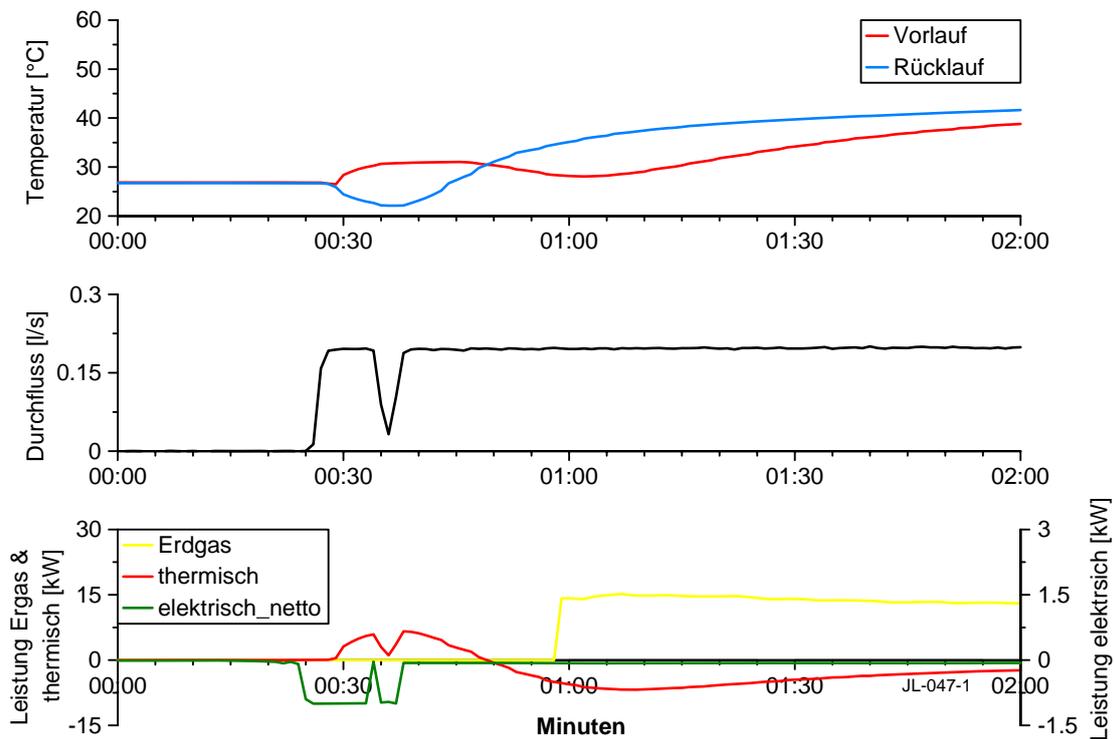


Abbildung 2-14: Kaltstartversuch WhisperGen – Detail

Im Gegensatz zum Kaltstart ist der **Warmstart** dadurch gekennzeichnet, dass im BHKW-Modul noch Restwärme der letzten Betriebsphase vorhanden ist. Da die Rahmenbedingungen für den Warmstart in der Literatur nicht eindeutig definiert sind, wird hier nach [Lipp15] von einer Betriebspause von maximal zwei Stunden ausgegangen. Nachfolgend ist in [Abbildung 2-15](#) der zeitliche Ablauf eines Warmstarts dargestellt. Wiederum sind die ersten zwei Minuten als Detail in [Abbildung 2-16](#) herausgegriffen. Der Verlauf entspricht zunächst dem des Kaltstarts, jedoch startet der Brenner beim Warmstart ca. 20 s später. Die elektrische Nennleistung wird wiederum nach ca. 9 min. erreicht, eine stationäre thermische Leistung jedoch bereits nach rund 11 min.

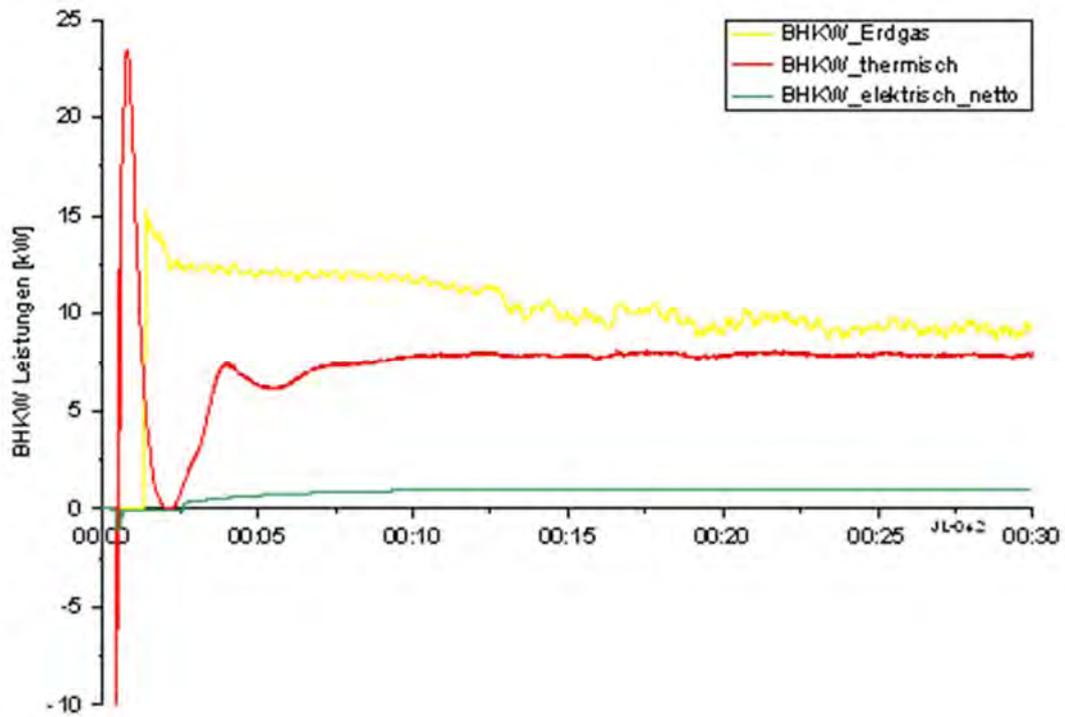


Abbildung 2-15: Warmstartversuch WhisperGen

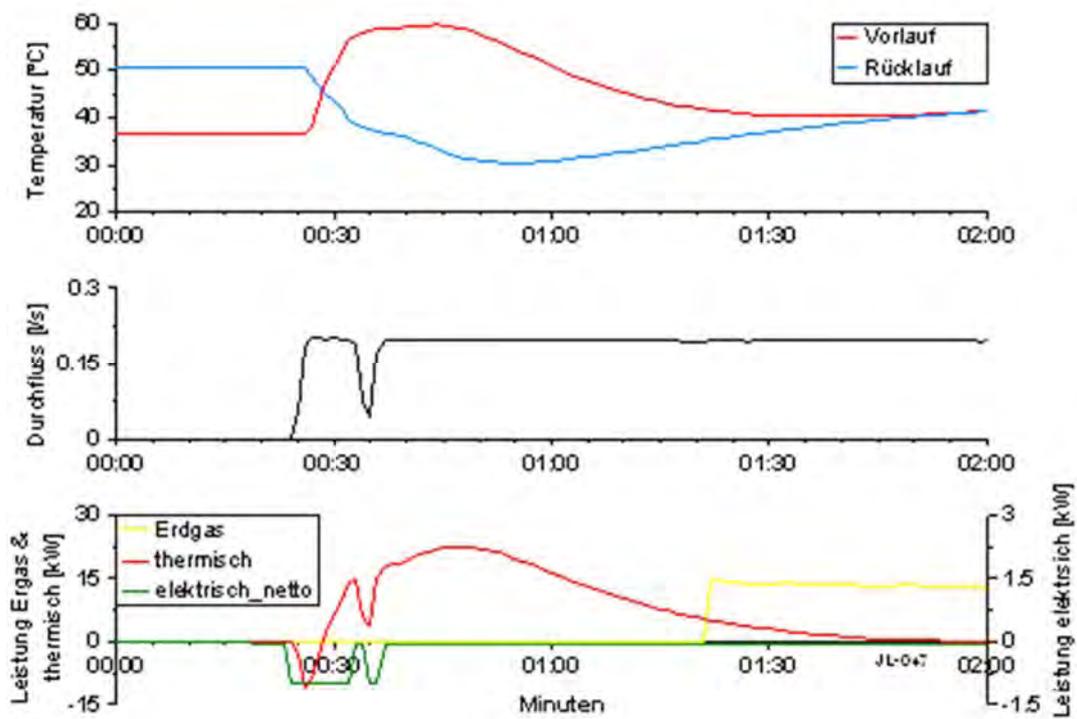


Abbildung 2-16: Warmstartversuch WhisperGen – Detail

### Ausschaltvorgang

Beim Abschalten des BHKW-Moduls wird zunächst der Gaszufluss gestoppt. Die Stirlingmaschine läuft aufgrund der Restwärme noch nach (1), geht dann jedoch in den motorischen Betrieb über, bis die Temperatur in der Stirlingmaschine auf 250 °C abgesunken ist (2). Nach 13 min. schaltet der Lüfter ab (3), nach knapp 19 min. auch die Heizkreispumpe (4).

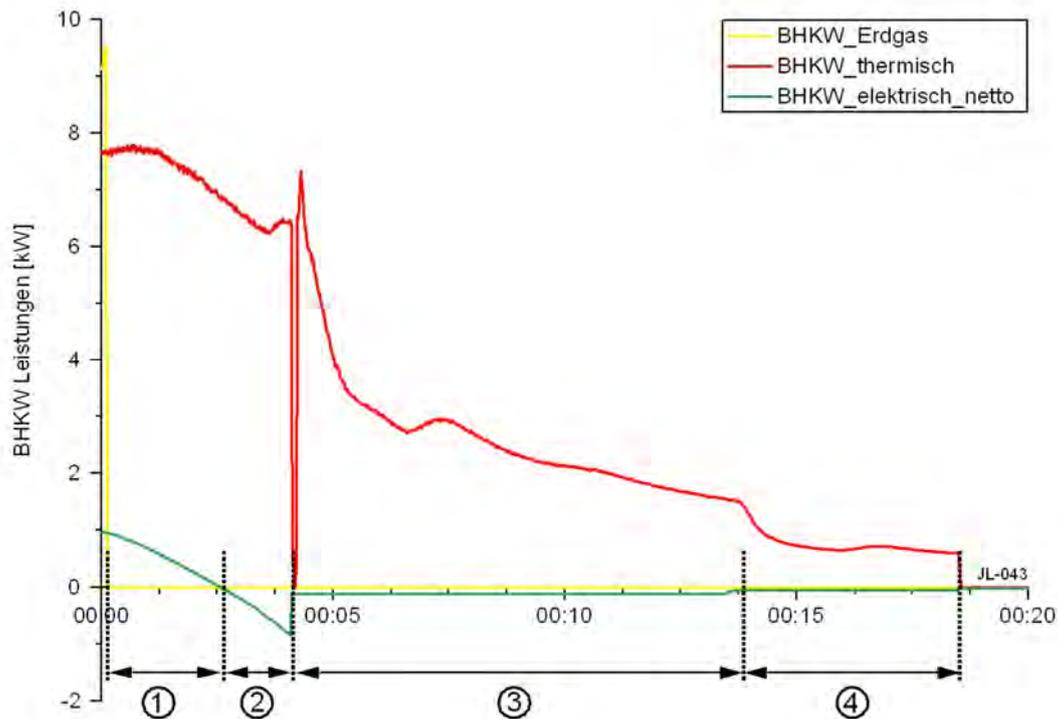


Abbildung 2-17: Ausschaltvorgang WhisperGen

### Typtage

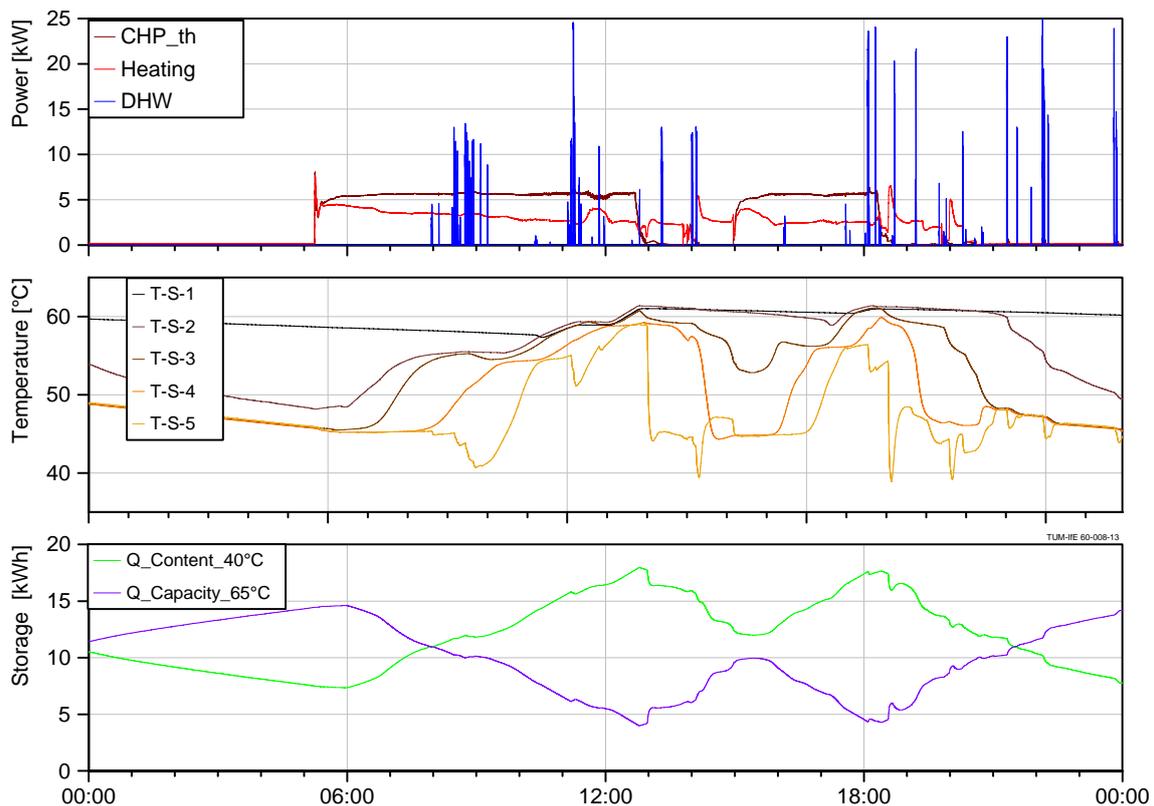
Zur Bewertung eines KWK-Systems werden Lastprofile von Typtagen am Versuchsstand gefahren. Abbildung 2-18 zeigt dies am Beispiel eines winterlichen Typtages. Die Vorgabedaten für die Raumwärme und den Warmwasserbedarf wurden von Messdaten abgeleitet, die am 24.11.2011 im Feldversuch gemessenen wurden.

Der Heizwärmebedarf (rote Linie im oberen Diagramm) ist durch das Ende der Nachtabsenkung um etwa 6 Uhr morgens und einen geringeren Bedarf in den Mittagsstunden sowie den Beginn der Nachtabsenkung um etwa 20:30 Uhr gekennzeichnet.

Warmwasserzapfungen (blaue Linie) finden vor allem in den Morgen- und Abendstunden statt, aber auch mittags.

Die integrierte Steuerung schaltet das BHKW mit steigendem Wärmebedarf um 6 Uhr morgens ein und gegen 13 Uhr ab – am Nachmittag läuft es noch zwischen 15 und 18 Uhr (braune Linie).

Das mittlere Diagramm in [Abbildung 2-18](#) gibt Aufschluss über den Betriebszustand des thermischen Speichers. Dieser Speicher hat einen Inhalt von 750 l und einen innenliegenden Wärmetauscher für die Brauchwarmwasserbereitung. Dargestellt sind die Temperaturen von fünf Fühlern, die in verschiedenen Höhen (1 oben–5 unten) am Speicher angebracht sind. Steigt eine Temperaturkurve an, wird dieser Bereich des Speichers geladen, sinkt die Temperatur ab, wird der Bereich entladen.



**Abbildung 2-18: Messung Typtag Winter – WhisperGen [Lipp13]**

Deutlich sichtbar ist, dass der Speicher gegen 13 Uhr vollständig geladen ist und das BHKW abschalten muss. Niedrige Temperaturen um die 40 °C werden im unteren Teil des Speichers nur erreicht, wenn Warmwasser gezapft wird und dann kaltes Frischwasser in den Wärmetauscher der Warmwasserbereitung strömt.

Das unterste Diagramm zeigt als grüne Linie den Energieinhalt des Speichers, bezogen auf ein Nutztemperaturniveau von 40 °C. In lila ist die verfügbare Speicherkapazität dargestellt. Dies entspricht der Wärmemenge, die noch eingespeichert werden kann, um den gesamten Speicher auf 65 °C aufzuheizen. Speichereinhalt und verfügbare Kapazität verhalten sich reziprok zueinander. Beide Größen können zur Optimierung des KWK-Betriebs herangezogen werden:

- Der Speichereinhalt ist der bestimmende Parameter dafür, wie lange die KWK-Anlage

ausgeschaltet werden kann, bevor der Speicher wieder mit Wärme beliefert werden muss.

- Die verfügbare Kapazität erlaubt Rückschlüsse darauf, wie lange die KWK-Anlage noch betrieben werden kann, bevor sie bei vollem Speicher abschalten muss.

Die Messungen an weiteren Typtagen sind in [Lipp15] ausführlich dokumentiert.

### 2.2.3 Langzeitverhalten

Am Mikro-KWK-Versuchsstand wurden im Jahr 2012 viele Messungen mit dem WhisperGen Mikro-BHKW durchgeführt. Das Versuchsprogramm dauerte annähernd ein Jahr. Neben stationären Versuchen mit unterschiedlicher Rücklaufemperatur wurden Kalt- und Warmstartversuche und vor allem dynamische Versuche mit Typtagen durchgeführt. Ziel dieser Messung war es jedoch **nicht**, Degradationseffekte zu bestimmen. Jedoch konnte festgestellt werden, dass die thermische Leistung des BHKW, sowie die zugeführte Gasleistung, bei konstanter Stromerzeugung anstieg.

Bei Motoren kann es aufgrund von Reibungseffekten, Abnutzung oder Ähnlichem zu Wirkungsgradeinbußen kommen. Bei Stirling-BHKW können darüber hinaus auch Undichtigkeiten des Arbeitsgases zum Absinken der mechanischen Leistung führen.

Um dies zu analysieren, wurden die BHKW-Leistungen sowie die Wirkungsgrade ex post für die Monate Februar bis Dezember 2012 analysiert. Es wurden jeweils mindestens zwei Versuchsdurchläufe verwendet, bei denen das BHKW mindestens drei Stunden lief und die Rücklaufemperatur durchschnittlich 56 °C betrug. Durch die Minimalbetriebszeit konnte sichergestellt werden, dass das BHKW mindestens zwei Stunden lief, bevor die Leistung sowie die BHKW-Rücklaufemperatur über einen Zeitraum von mindestens einer Stunde gemittelt wurden. Die mittlere elektrisch und thermisch abgegebene BHKW-Leistung und die zugehörige mittlere Gasbezugsleistung zeigt Abbildung 2-19. Die erzeugte elektrische (Netto-)Leistung lag über den Gesamtzeitraum annähernd konstant bei 965 W. Die thermisch abgegebene Leistung betrug zu Beginn des Jahres knapp 7,1 kW und stieg gegen Ende des Jahres auf über 7,8 kW an, was einem Anstieg von ungefähr 10 % entspricht. Die Gasbezugsleistung hat sich im betrachteten Zeitraum von 8,3 auf 9,3 kW erhöht.

Nachfolgend zeigt Abbildung 2-20 die korrespondierenden Wirkungsgradverläufe. Da sowohl die abgegebene thermische Leistung als auch die zugeführte Gasleistung gestiegen sind, bleibt der thermische Wirkungsgrad im Jahresverlauf annähernd unverändert. Durch den bei gleicher elektrischer Leistung gestiegenen Gasbezug sinkt der elektrische Wirkungsgrad von anfänglich knapp 12 % auf fast 10 % ab.

Es kann festgehalten werden, dass im Verlauf der Zeit, bei konstanter elektrischer Leistung, mehr Gas aufgewendet werden musste, welches nur zur Wärmeerzeugung verwendet wurde. Die Folgen daraus sind eine deutliche Reduzierung des elektrischen Wirkungsgrades sowie

der Stromkennzahl. Dadurch, dass bei wärmegeführter Betriebsweise bei gleichem Wärmebedarf die Betriebszeit des BHKW sinkt, sinkt auch der Stromausstoß, und somit wird die Wirtschaftlichkeit des Systems schlechter.

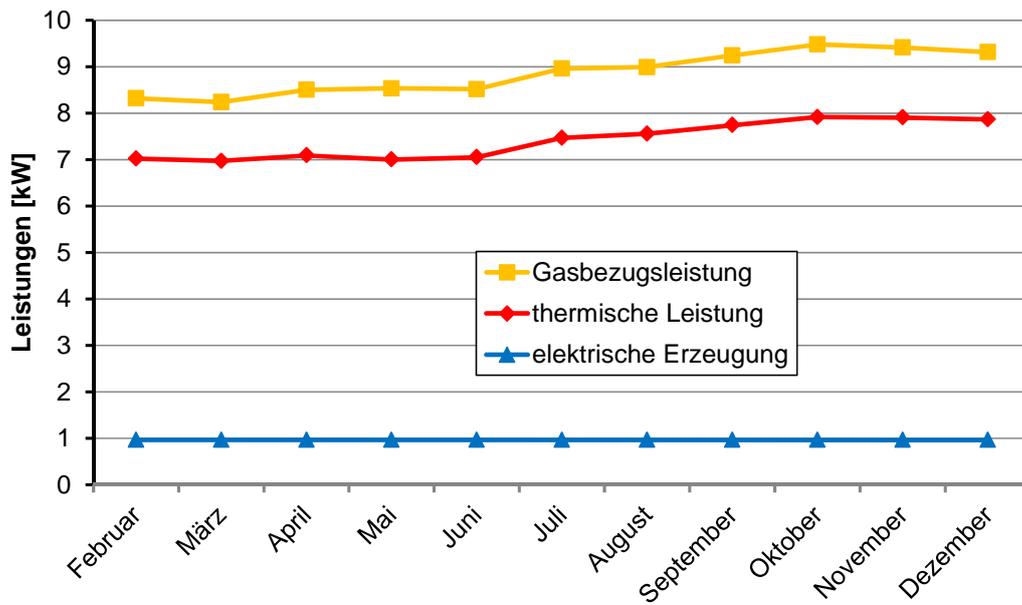


Abbildung 2-19: Mittlere Leistungen des BHKW im Verlauf des Jahres 2012

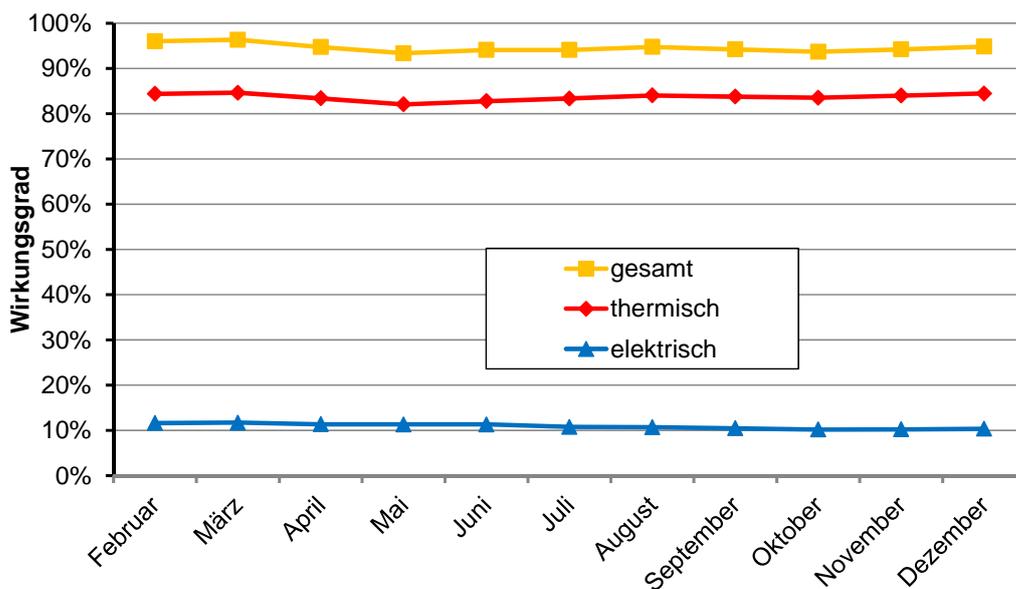


Abbildung 2-20: Mittlere Wirkungsgrade des BHKW im Verlauf des Jahres 2012

## 2.3 Messungen an einem BlueGEN-SOFC-Brennstoffzellensystem

Im Rahmen des Projekts wurde ein BlueGEN-Mikro-KWK-System beschafft. Dabei handelt es sich um eine 1,5 kW<sub>el</sub> SOFC-Brennstoffzelle des Herstellers Ceramic Fuel Cells, die mit Erdgas betrieben wird. (Nachdem die Ceramic Fuel Cells GmbH 2015 Insolvenz anmelden musste, wurde sie von der SolidPower GmbH übernommen.)

Thermische Zyklen beeinflussen die Lebensdauer einer SOFC-Brennstoffzelle sehr stark. Deshalb ist das BlueGEN-System auch als Grundlaststzeuger einzuplanen. Durch die Möglichkeit, die Leistung zu modulieren, kann jedoch in gewissen Grenzen auf den variierenden Wärme- und Strombedarf der Nutzer reagiert werden.

Im Vorfeld zu den Messungen am Versuchsstand wurden Simulationen gerechnet, die neben den Anforderungsprofilen an Heizwärme und Warmwasser auch den elektrischen Energiebedarf der Nutzer einschließen. Diese Daten dienen auch zur Auslegung der Komponenten des Versuchsstands, da die Brennstoffzelle ohne Unterbrechung betrieben werden sollte, wenn sie einmal in Betrieb genommen wurde.

Die thermische Leistung des Systems ist vom Hersteller mit bis zu 600 W angegeben [Blue15]. Die maximale Wärmeleistung kann jedoch nur bei geringen Rücklauftemperaturen erreicht werden. Daher sieht das Konzept vor, die Wärme in einen Brauchwarmwasserspeicher einzukoppeln und nicht in den Pufferspeicher des Heizungssystems. Das Anlagenschema zeigt Abbildung 2-21.

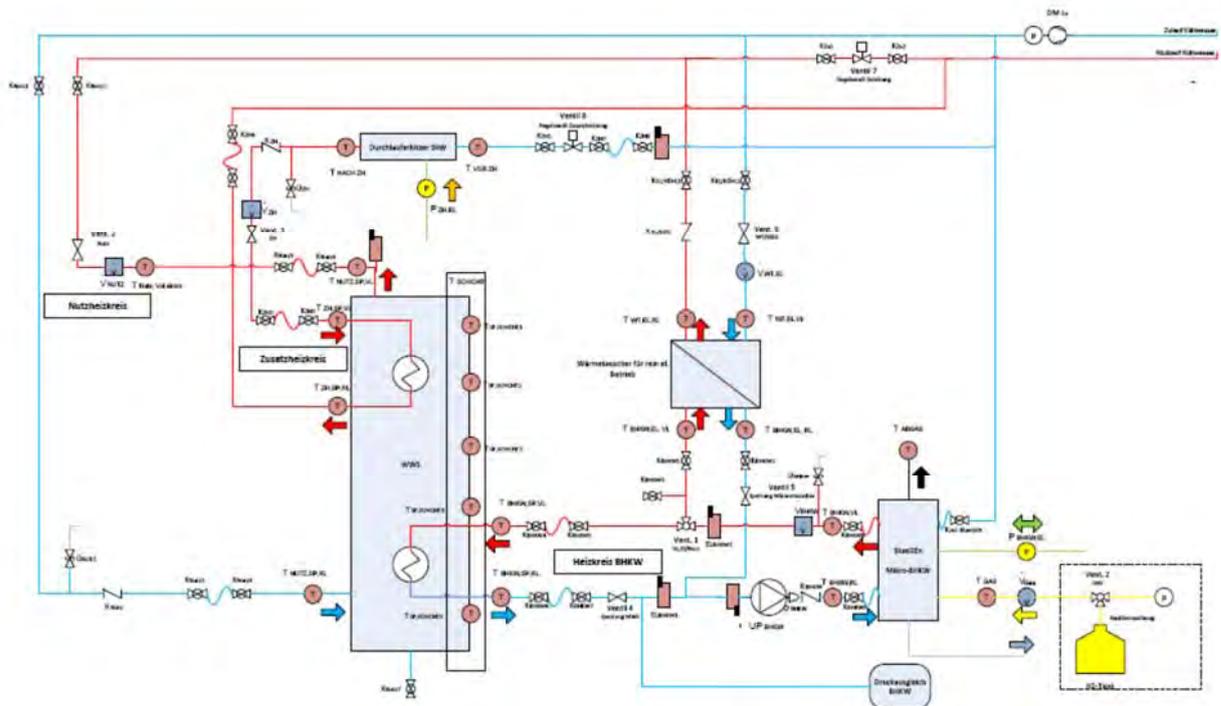
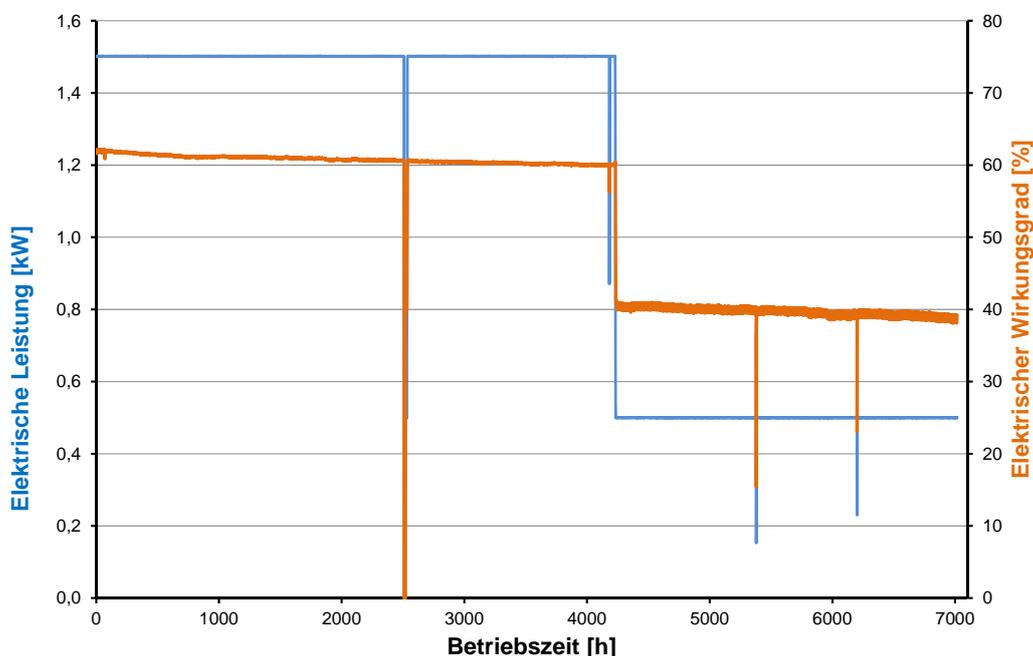


Abbildung 2-21: Anlagenschema Versuchsaufbau BlueGEN-SOFC-BHKW

Neben dem SOFC-Mikro-KWK-System ist der Warmwasserspeicher sichtbar. Dieser ist mit einem elektrischen Zusatzheizer ausgestattet, der die Speicherbeladung durch ein konventionelles Heizsystem bzw. eine thermische Solaranlage simuliert. Zusätzlich wurde ein weiterer Wärmetauscher vorgesehen, der bei Störungen oder Umbauarbeiten am Versuchsstand die Wärmeabfuhr aus der Brennstoffzelle sicherstellt.

Mit deutlicher Verzögerung aufgrund von Baumaßnahmen in der Laborhalle konnte das Brennstoffzellen-Mikro-KWK-System BlueGENn in Betrieb genommen werden.

Abbildung 2-22 zeigt die zeitlichen Verläufe von elektrischer Einspeiseleistung und elektrischem Wirkungsgrad über die ersten 7.100 Betriebsstunden.



**Abbildung 2-22: Elektrische Leistung und elektrischer Wirkungsgrad des BlueGEN-Mikro-KWK-Systems**

Bei früheren Modellen dieses Typs konnte innerhalb der ersten rund 1.000 Betriebsstunden eine deutliche Degradation, einhergehend mit einem Rückgang des elektrischen Wirkungsgrades, beobachtet werden. Bei dieser Anlage wurde ebenfalls ein leichter Anstieg des Gasbezugs bei konstanter Einspeiseleistung registriert, der Wirkungsgrad ist jedoch lediglich geringfügig von 62 auf 61 % abgesunken. Nach 4.000 Betriebsstunden lag er noch bei 60 %.

Die in der Abbildung ersichtliche Betriebsunterbrechung bei 2.600 Betriebsstunden hat ihre Ursache in einer geplanten Unterbrechung der Gasversorgung durch die Stadtwerke München.

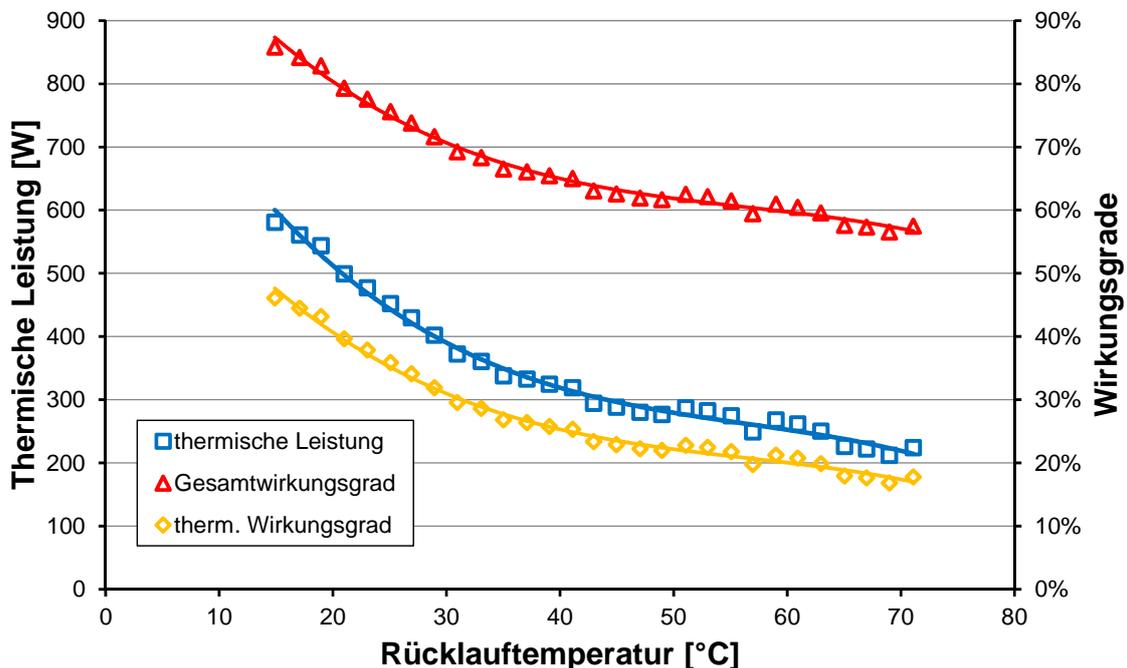
Nach 4.700 Betriebsstunden wurde die elektrische Leistung auf 500 W reduziert. Ursache hierfür waren anstehende Wartungsarbeiten, die aufgrund der Insolvenz des Herstellers (Ceramic

Fuel Cells GmbH) erst ausgeführt werden konnten, nachdem ein Wartungsvertrag mit dem Rechtsnachfolger (SolidPower GmbH) geschlossen wurde.

Der SOFC-Stack wird bei rund 850 °C betrieben. Auch bei geringerer Leistung bleiben die Wärmeverluste annähernd unverändert. Dies führt dazu, dass bei 500 W elektrischer Leistung der elektrische Wirkungsgrad auf rund 40 % absinkt.

In nachfolgender Abbildung 2-23 sind die thermische Leistung, der thermische und der Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit der Rücklauf­temperatur dargestellt. Die elektrische Leistung beträgt für alle Messpunkte 500 W. Bei 15 °C Rücklauf­temperatur wurde eine thermische Leistung von 580 W erreicht. Mit ansteigender Rücklauf­temperatur kann aus dem Abgas der Brennstoffzelle weniger Wärme ausgekoppelt werden, und die Abgasverluste steigen. Die Wärmeleistung geht bis auf 220 W bei 70 °C zurück. Entsprechend sinkt auch der thermische Wirkungsgrad von 45 auf 18 % und der Gesamtwirkungsgrad des KWK-Systems von 86 auf 57 %.

In Anschluss an die Messungen bei 500 W elektrischer Leistung wird diese schrittweise erhöht, und die Leistungs- und Wirkungsgradkurven werden ebenfalls ermittelt.

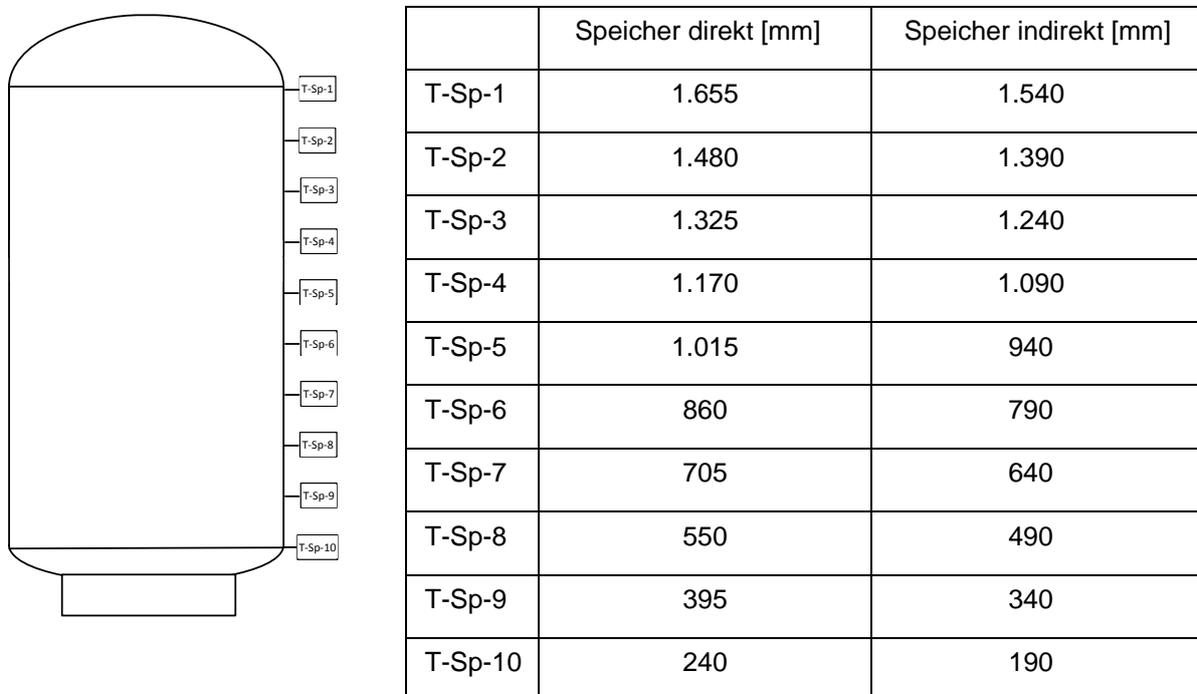


**Abbildung 2-23:** Thermische Leistung und Wirkungsgrade des BlueGEN-Mikro-KWK-Systems bei 500 W elektrischer Leistung

## 2.4 Analyse des Verhaltens thermischer Speicher

Bei der Installation von Mikro-KWK-Systemen sind Speicher zur Nivellierung der thermischen Last unabdingbar. Momentan gibt es zwei unterschiedliche Speichersysteme, die für den Einsatz mit Mikro-KWK-Systemen geeignet sind: Direkt geladene Speicher sind, wie der Name schon sagt, direkt an das KWK-Modul angebunden. Das heißt, dass das warme Wasser des BHKW-Vorlaufs in den oberen Bereich des Speichers eintritt und kaltes Wasser aus dem unteren Teil zurück zum BHKW fließt. Das gespeicherte Wasser ist demzufolge identisch mit dem Wasser des BHKW-Kreises. Indirekt geladene Speicher dagegen werden über einen Wärmetauscher, der sich im unteren Drittel des Speichers befindet, geladen. Das Wasser des BHKW-Kreises und des Speichers werden nicht vermischt (Systemtrennung).

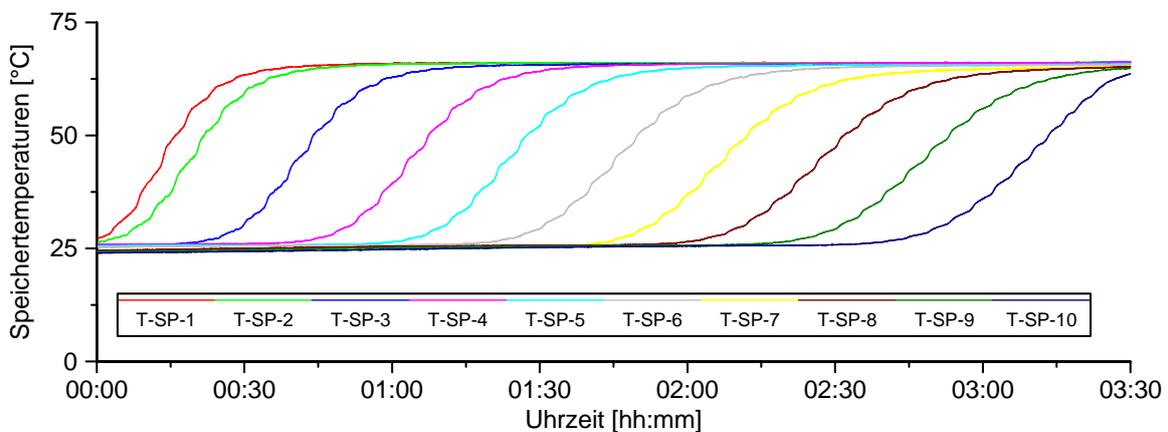
Für simulatorische Arbeiten oder Exergieuntersuchungen ist das exakte Wissen des thermischen Verhaltens eines Speichers bei Be- und Entladung unentbehrlich. Dafür wurde am Mikro-KWK-Versuchsstand der Verlauf der Speichertemperaturen bei verschiedenen Betriebszuständen für jeweils einen Pufferspeicher (Wikora Pufferspeicher Heizung WPH 1000) und einen Kombispeicher (Sanevo Multihygiene Pufferspeicher 800 L) analysiert. Zur Messung der Speichertemperaturen wurden zehn Anlegefühler am Rand des Speichers unterhalb der Isolierung äquidistant zwischen dem höchsten und niedrigsten Punkt an den „zylindrischen“ Speicher angebracht. Die Anordnung sowie die Position der Anlegefühler zeigt Abbildung 2-24.



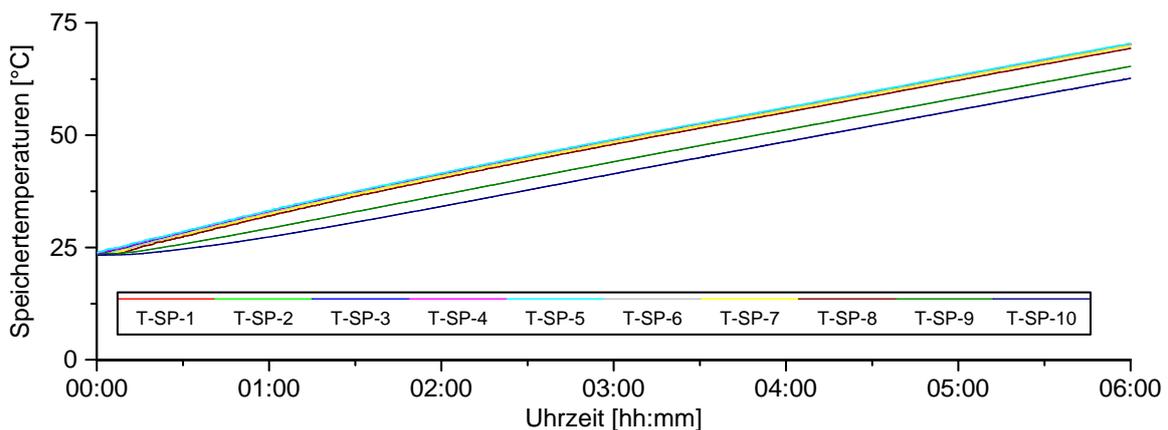
**Abbildung 2-24:** Skizze zur Anordnung der Speicheranlegetemperaturfühler

Den Verlauf der Speichertemperaturen zeigen Abbildung 2-25 für direkte und Abbildung 2-26

für indirekte Speicherbeladung. In beiden Fällen wurden vor Messbeginn die Speicher auf ca. 25 °C abgekühlt. Bei der direkten Speicherbeladung steigt die oberste Speichertemperatur (T-Sp-1) sofort an und erreicht nach ca. 30 min. die Maximaltemperatur (66 °C, entspricht der BHKW-Vorlauftemperatur). Anschließend steigen auch die unteren Temperaturwerte. Der unterste Bereich des Speichers bleibt von der Beladung sehr lange (über zwei Stunden) unberührt, weshalb kaltes Rücklaufwasser für einen effizienten BHKW-Betrieb vorliegt. Durch den schnellen Temperaturanstieg der oberen Schichten steht dagegen sehr schnell heißes Wasser für den Verbraucher zur Verfügung.



**Abbildung 2-25: Verlauf der Speichertemperaturen bei direkter und indirekter Beladung I**



**Abbildung 2-26: Verlauf der Speichertemperaturen bei direkter und indirekter Beladung I**

Genau anders verlaufen die Speichertemperaturen bei indirekter Beladung. Durch die Wärmeabgabe des Wärmetauschers im unteren Bereich des Speichers wird dieser erwärmt. Wegen der geringeren Dichte steigt das warme Wasser im Speicher nach oben, was zu einer nahezu konstanten Temperatur innerhalb der Speicherfühler T-Sp-1 bis T-Sp-8 führt. Dies hat zur

Folge, dass erstens sehr lange kein heißes Wasser den Verbrauchern zur Verfügung steht und zweitens die BHKW-Rücklauftemperatur ansteigt, was einen geringeren thermischen Wirkungsgrad zur Folge hat.

Abbildung 2-27 zeigt die identische Messung in einer anderen Darstellungsform. Durch das gewählte Speicherhöhe-Speichertemperatur(h- $\theta$ )-Diagramm kann der zeitliche Verlauf der Speichertemperaturen innerhalb des Speichers exakt dargestellt werden. Die Startkurve (0 h) ist nahezu parallel zur h-Achse. Bei direkter Speicherbeladung steigen die Temperaturen im oberen Teil des Speichers an, während der untere Bereich kalt bleibt. Es ergibt sich demnach eine gute thermische Schichtung. Die Mischzone, also der Übergangsbereich zwischen warmem und kaltem Bereich des Speichers, ist dünn und wandert kontinuierlich nach unten. Bei der indirekten Ladung ist fast der gesamte Speicher auf einem konstanten Temperaturniveau. Die Isotherme wandert im h- $\theta$ -Diagramm nach rechts hin zu den hohen Temperaturen. Eine thermische Schicht bildet sich nicht aus, eine Mischzone existiert nicht.

Eine detailliertere Beschreibung und weitere Analysen sind in der Doktorarbeit von Josef Lipp enthalten [Lipp15].

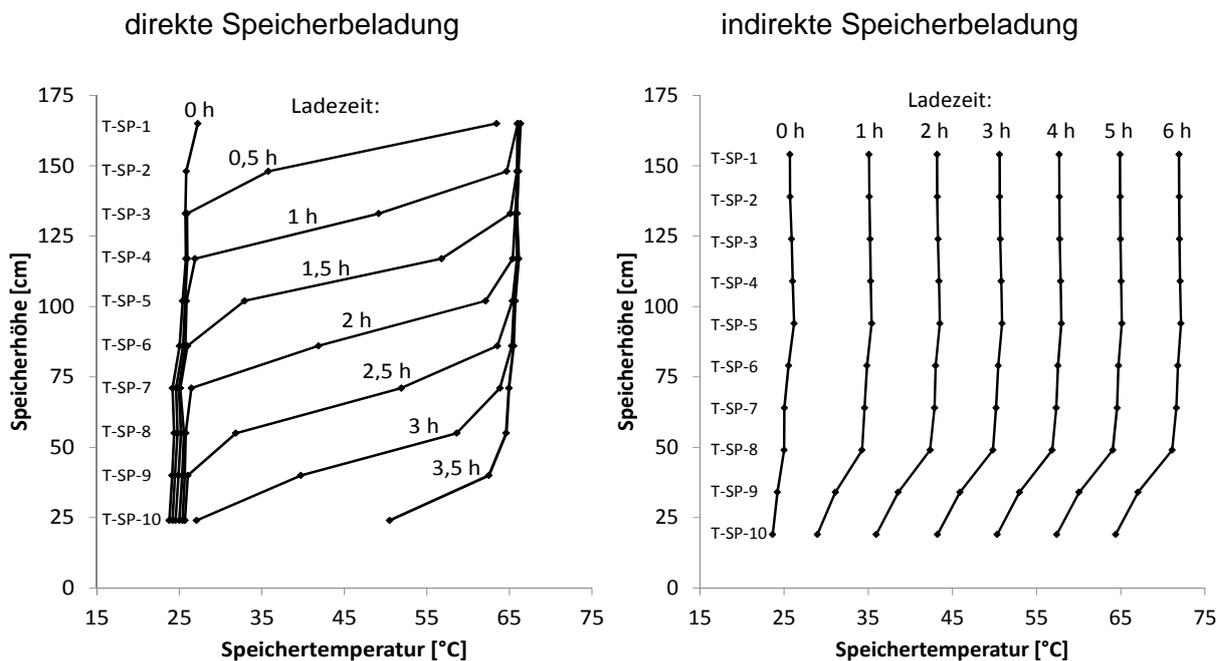


Abbildung 2-27: Verlauf der Speichertemperaturen bei direkter und indirekter Beladung II

## 2.5 Feldversuche

Reale Messdaten sind erforderlich, um Simulationsmodelle der Mikro-KWK-Systeme zu parametrieren. Aus ihnen werden auch Vorgabedaten wie zeitliche Verläufe der Heizlast und Warmwasserprofile abgeleitet. Dazu werden in Feldversuchen real installierte Systeme mit

Messtechnik ausgestattet und die Messdaten analysiert. Darüber hinaus erlauben Feldversuche wertvolle Einblicke in den Praxisbetrieb der Anlagen.

### 2.5.1 Beispiel Mikro-BHKW in Miesbach

Ein Vitotwin Mikro-BHKW der Firma Viessmann wurde in ein Einfamilienhaus in Miesbach installiert, das eine Wohnfläche von 150 m<sup>2</sup> aufweist und von drei Personen bewohnt wird. Das Gebäude ist Baujahr 1967 und wurde 1989 energetisch saniert. Laut Energieausweis beträgt der Primärenergieaufwand 117 kWh/(m<sup>2</sup>·a).

Das Vitotwin Mikro-BHKW von Viessmann besteht aus einem Microgen–Stirling-Modul und einem darüber verbauten Zusatzheizgerät. Die elektrische Leistung beträgt 1 kW<sub>el</sub>, die thermische Leistung bei Betrieb des Stirlingmotors 6 kW<sub>th</sub>. Das Zusatzheizgerät kann die Wärmeleistung um 6 bis 20 kW<sub>th</sub> erhöhen [Vis15]. Als Wärmespeicher wurde ein Vitocell 340-M Kombispeicher mit 950 l Inhalt und integriertem Wellrohrwärmetauscher für die Brauchwarmwasserbereitung verwendet. Das BHKW wird über einen ebenfalls in den Speicher integrierten Wärmetauscher angebunden, und dadurch die vom Hersteller geforderte Systemtrennung erreicht. Der Einbau des Systems erfolgte im März 2011.

Im Rahmen des Feldversuchs wurden Messsensoren installiert, die alle relevanten energetischen Flüsse erfassen. Dazu wurden die in Abbildung 2-28 eingezeichneten Temperaturfühler und Durchflusszähler eingebaut, wie auch ein Gaszähler und Wirkleistungszähler für die vom BHKW aufgenommene bzw. abgegebene Leistung. Die Datenerfassung erfolgt über ein National Instruments compactRio-System. Per Fernabfrage wurden die Datensätze einmal täglich in eine Datenbank des Lehrstuhls übertragen.

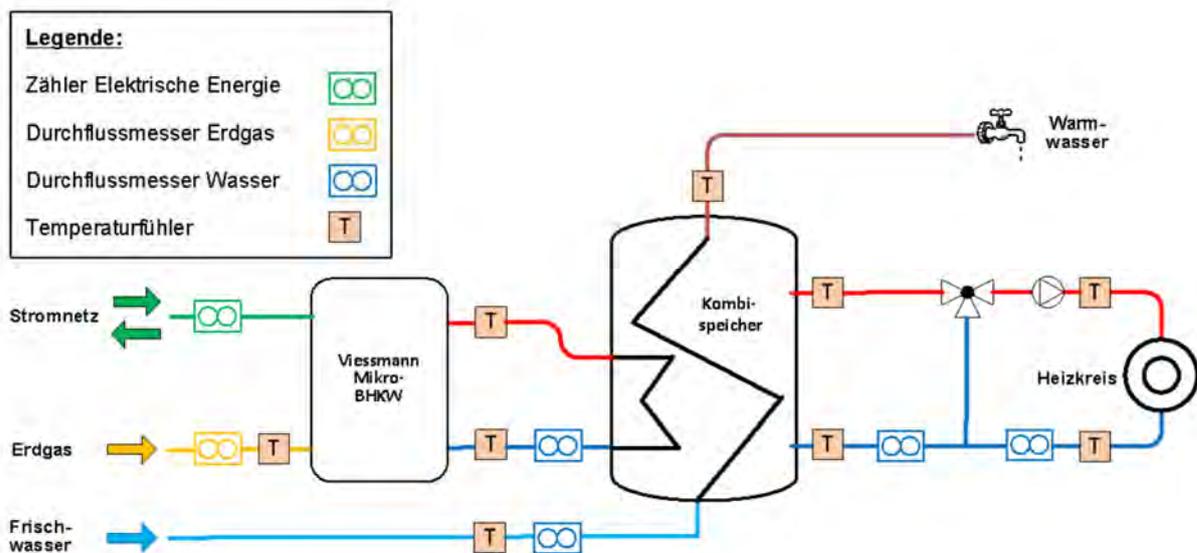
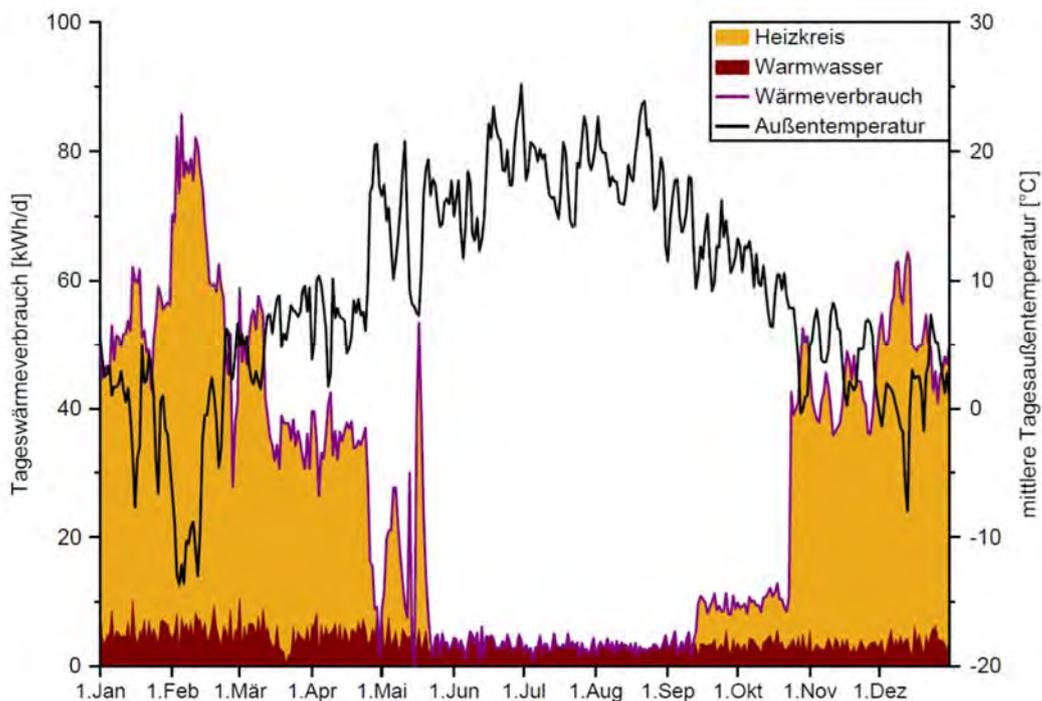


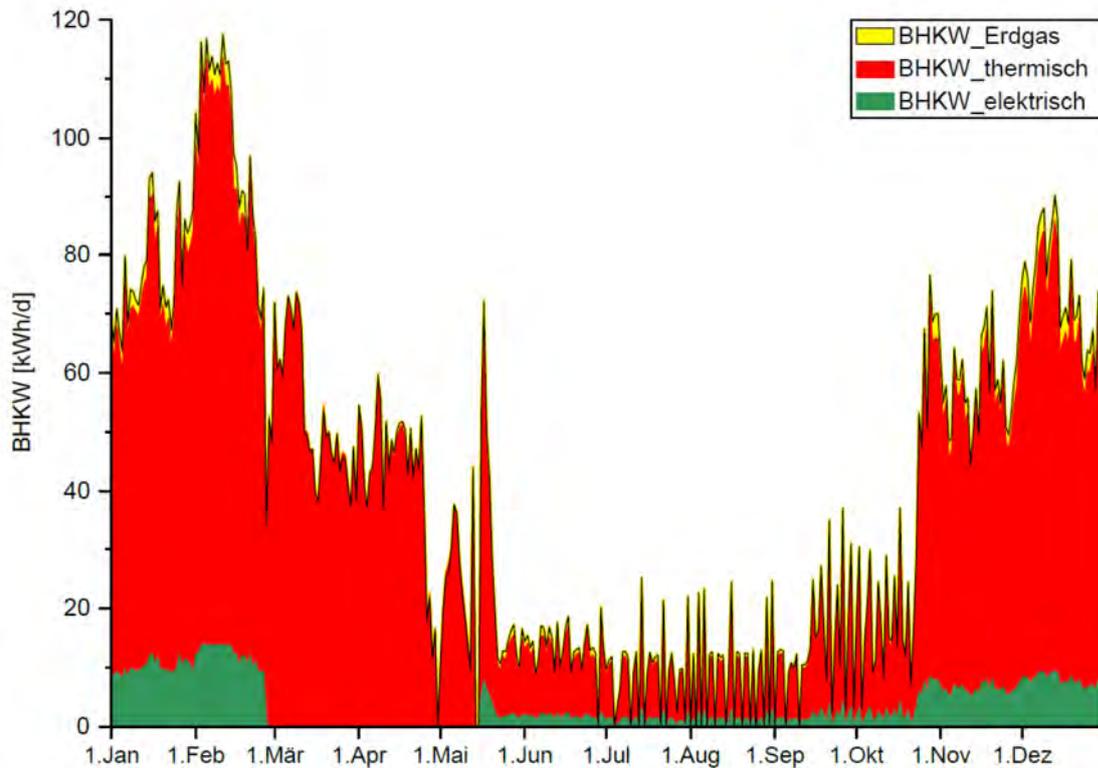
Abbildung 2-28: Schema des Mikro-KWK-Systems in Miesbach

In Abbildung 2-29 ist neben dem Wärmebedarf für Raumheizung und Brauchwarmwasser die mittlere Tagesaußentemperatur des Jahres 2012 dargestellt. Deutlich erkennbar ist der hohe Wärmebedarf bei niedrigen Außentemperaturen im Februar und Dezember. Im Sommer wurde das Heizsystem abgeschaltet und auch bei Temperaturen unter 15°C nicht betrieben. Von Mitte September bis Mitte Oktober wurden nur Teile des Gebäudes beheizt. Brauchwarmwasser wurde das gesamte Jahr bezogen.

Die Wärmebereitstellung und Stromerzeugung durch das Mikro-BHKW-System zeigt Abbildung 2-30. Daraus ist ersichtlich, dass die Stirlingmaschine von Anfang März bis Mitte Mai nicht betrieben wurde, Gründe hierfür sind nicht bekannt. Aufgrund der Nachtabsenkung wurden auch bei den niedrigen Temperaturen im Februar nicht mehr als 13,8 kWh/d Strom durch das BHKW erzeugt. Aufgrund des Wärmebedarfs wären rund 19 kWh/d möglich gewesen. Im Sommer liegen die erzeugten Strommengen bei 1 bis 2 kWh/d, was einer täglichen Laufzeit von ein bis zwei Stunden entspricht, um den Warmwasserbedarf zu decken.



**Abbildung 2-29:** Heizwärme- und Warmwasserbedarf im Jahr 2012 in Miesbach [Lipp15]



**Abbildung 2-30: Wärmebereitstellung und Stromerzeugung im Jahr 2012 in Miesbach [Lipp15]**

Die Energiebilanz des Mikro-KWK-Systems in Miesbach zeigt [Abbildung 2-31](#). Das BHKW erreicht einen Gesamtnutzungsgrad von knapp 96 %, dabei werden 9 % der eingesetzten Erdgasmenge in Form elektrischer Energie bereitgestellt und 87 % in Form von Wärme. Knapp 20 % der vom BHKW (inkl. Zusatzbrenner) gelieferten Wärme gehen vor allem als Speicher- verluste verloren, so dass die nutzbare Energiemenge noch 77 % beträgt.

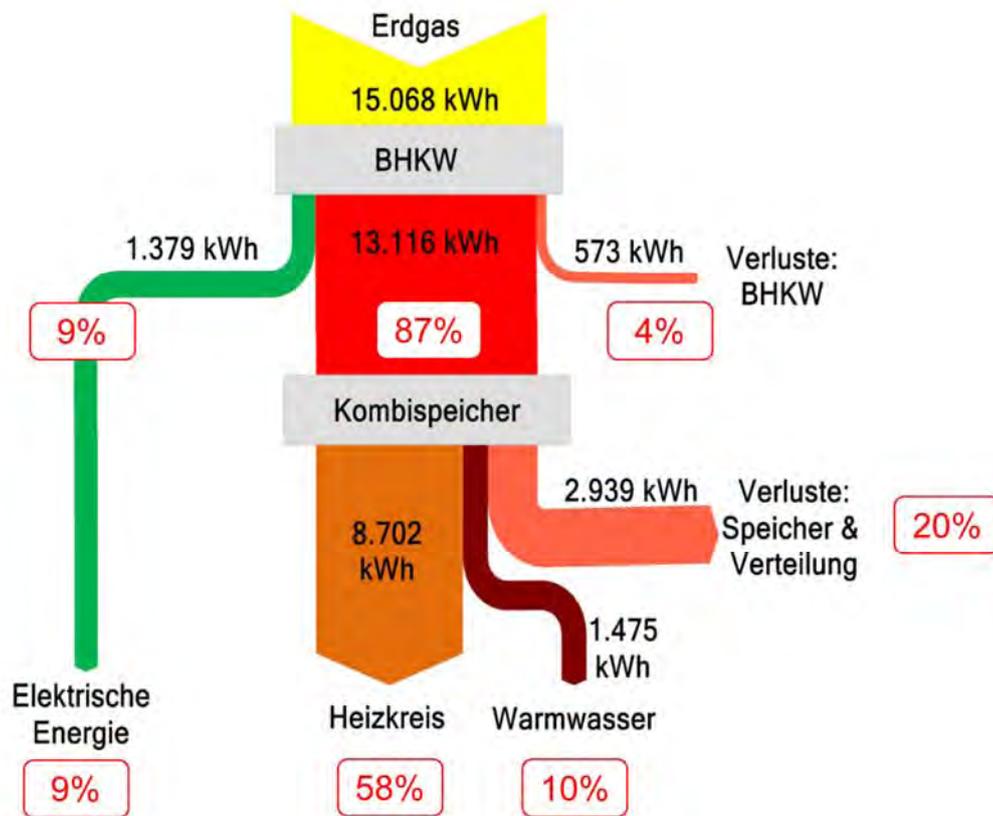


Abbildung 2-31: Jahresbilanz in Miesbach des Jahres 2012

## 2.6 Ableitung von Typtagen

Während es möglich ist, den Betrieb eines Mikro-KWK-Systems über ein Jahr mit einem Simulationsmodell nachzubilden, kann dieser Zeitraum bei Messungen im Labor meist nicht abgedeckt werden. Hier liegt der Schwerpunkt darin, die Charakteristika des untersuchten Systems kennenzulernen und den Betrieb der Anlage zu optimieren. Daher werden im Laborversuch einzelne Tage vermessen, die typische im Laufe eines Jahres auftretende Lastsituationen nachbilden.

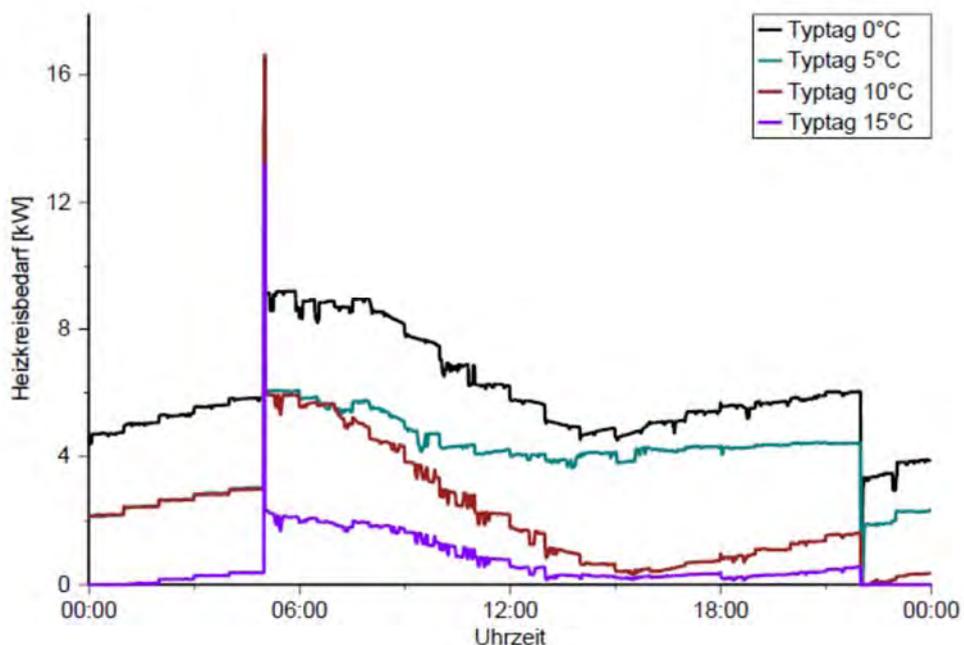
Typtage werden dadurch definiert, dass sie typische Eigenschaften aufweisen, die an ausreichend vielen Tagen eines Jahres auftreten. Eine Gruppierung der Tage – Tagtyp – ist beispielsweise nach Jahreszeiten, Wochentagen oder Außentemperaturbereichen möglich. Ein Typtag soll reale Bedingungen für den repräsentierten Tagtyp abbilden, d. h. in den Wertebereichen, Verteilungen und Gradienten der beschreibenden Parametern übereinstimmen. Daher werden als Basis für Typtage real gemessene oder auch simulierte Tage in ausreichend hoher zeitlicher Auflösung verwendet.

Wie in [Müh07] gezeigt, erlauben bereits drei bis fünf Typtage eine aussagekräftige Jahresbetrachtung des untersuchten Systems.

Für die Auswahl der repräsentativen Typtage aus den jeweiligen Tagtypen wurde am Lehrstuhl

ein computergestütztes Verfahren entwickelt. Der wichtigste Parameter ist hier der Wärmebedarf eines Tages, der signifikant von der Außentemperatur beeinflusst wird. Zunächst werden alle Tage anhand der mittleren Tagesaußentemperatur in die Gruppen Sommer-, Übergangs- und Wintertage gruppiert. Im nächsten Schritt werden die sekundlichen Werte zu insgesamt 96 15-Minuten-Blöcken verdichtet. Nun erfolgt der Vergleich aller Einzeltagesblöcke mit dem mittleren Wert dieses Blocks in der jeweiligen Gruppe. Als Typtag wird derjenige Tag festgelegt, der über alle Blöcke die geringsten Abweichungen zu den Blockmittelwerten aufweist. Das Verfahren ist in [Sän13] detaillierter erläutert.

Aus Feldmessungen mit Mikro-KWK-Anlagen in Einfamilienhäusern wurden vier Typtage abgeleitet, die im Wesentlichen vom Tagesmittel der Außentemperatur abhängen, wie aus [Abbildung 2-32](#) ersichtlich ist. Bei der Analyse der Messwerte hat sich gezeigt, dass die mittlere Tagesaußentemperatur gegenüber der Jahreszeit einen dominierenden Einfluss auf den Wärmebedarf aufweist.



**Abbildung 2-32: Heizwärmebedarf der Typtage [Lipp15]**

Die Heizkreistemperatur wird in der Nacht abgesenkt. Daraus resultiert eine Anheizspitze am frühen Morgen. Tagsüber ist der Einfluss der Sonneneinstrahlung durch einen Rückgang der Heizlast am frühen Nachmittag erkennbar.

Die Analyse der in Feldmessungen gewonnenen Daten zeigte keinen signifikanten Zusammenhang des Warmwasserbedarfs mit der Außentemperatur. Deshalb wurde für die Versuche nur ein Warmwasserprofil angewandt. Dieses Profil ist in [Abbildung 2-33](#) dargestellt und bildet

die verschiedenen Zapfvorgänge jeweils als entnommene Wärmemenge ab. Zusätzlich werden Zirkulationsverluste als Verlustleistung von 350 W über den Zeitraum von 6 Uhr morgens bis 22 Uhr abends berücksichtigt.

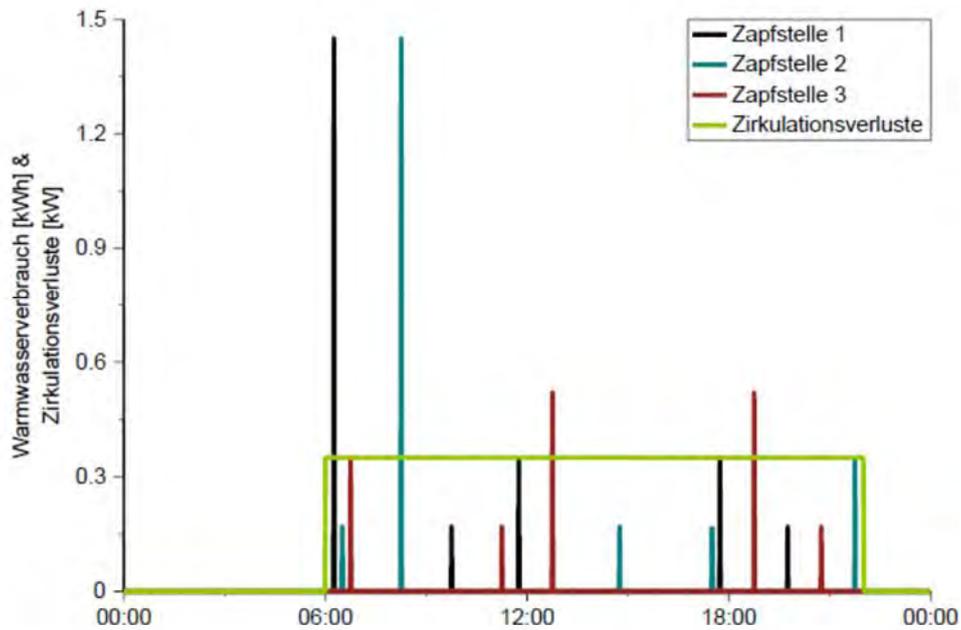


Abbildung 2-33: Warmwasserverbrauch und Zirkulationsverluste [Lipp15]

Diese Typtage wurden für Versuche im Labor verwendet und liegen z. B. den in Abschnitt 4 dargestellten Ergebnissen zugrunde.

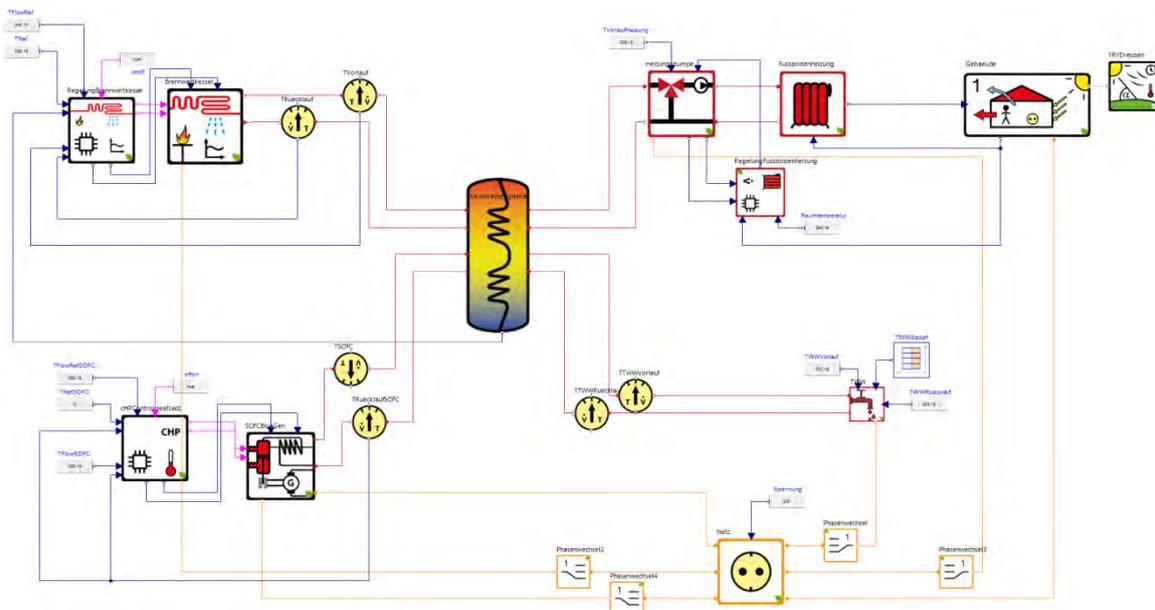


### 3 Modellierung und Simulation

Prüfstandsversuche sind sehr zeitaufwendig. Deshalb werden parallel dazu Simulationsmodelle verwendet, um das Zusammenwirken von Gebäude und Energieverbrauchern im Haushalt mit dem BHKW abzubilden und zu optimieren.

Als Software werden SimulationX und das Green Building Package verwendet. SimulationX verwendet die Modellierungssprache Modelica. Das Green Building Package stellt Simulationskomponenten für Gebäude und Gebäudetechnik bereit. Abbildung 3-1 zeigt ein Schema des entwickelten Simulationsmodells einer Anlage mit einer SOFC-Brennstoffzelle. Darin sind verschiedene Komponenten vorgesehen, die bei Bedarf durch Setzen der entsprechenden Eingabeparameter in die Simulationsläufe integriert werden können.

Die Simulation wurde in Sekundenschritten ausgeführt, der Verlauf der relevanten Parameter in 15-Minuten-Schritten protokolliert. Es wird der CVODE-Solver bei den Berechnungen genutzt.



**Abbildung 3-1: Übersicht auf das Simulationsmodell in SimulationX**

Die im Modell enthaltenen Komponenten sind im Folgenden kurz beschrieben:

#### 3.1 Gebäude und Energiebedarf

##### 3.1.1 Gebäude

Als Gebäude wurde ein modernes, zweistöckiges Einfamilienhaus nach EnEV 2014 erstellt. Es wurde als ein 1-Zonen-Modell mit Flachdach erstellt. Das Haus hat eine Grundfläche von 69 m<sup>2</sup>. Die Fläche der Wände wurde mit insgesamt 183,8 m<sup>2</sup> angenommen und hat einen U-

Wert von  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die Verluste durch Wärmebrücken werden mit zusätzlichen  $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  angenommen. Die Wanddicke beträgt  $0,36 \text{ m}$ . Die Fenstereigenschaften wurden auf Energieeffizienz optimiert. Deshalb wurde die Nord- und Ostseite besser isoliert auf Kosten der solaren Erträge, die bei diesen Orientierungen sowieso nicht hoch ausfallen würden. Die Fläche umfasst ca.  $7 \text{ m}^2$  bei einem U-Wert von  $0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$  und g-Wert von  $0,5$ . Die großflächigen Fenster von insgesamt  $40,8 \text{ m}^2$  mit einer Süd- und Westorientierung hingegen sind weniger gut isoliert ( $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), jedoch erlauben sie eine bessere Nutzung der solaren Strahlung (g-Wert =  $0,63$ ). Die Wärmeübergangskoeffizienten wurden innen mit  $7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  und außen mit  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  angenommen. Das Flachdach hat entsprechend der Grundfläche  $69 \text{ m}^2$  und einen U-Wert von  $0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei einer Dicke von  $0,53 \text{ m}$ . Das Simulationsprogramm berücksichtigt auch innere thermische Massen. Hierfür werden insgesamt  $13,8 \text{ m}^3$  angenommen bei einer Dichte von  $1.800 \text{ kg/m}^3$ . Die Wärmekapazität beträgt  $0,92 \text{ kJ/kgK}$ . Die Lüftungsverluste werden mit  $0,5 \text{ 1/h}$  angenommen.

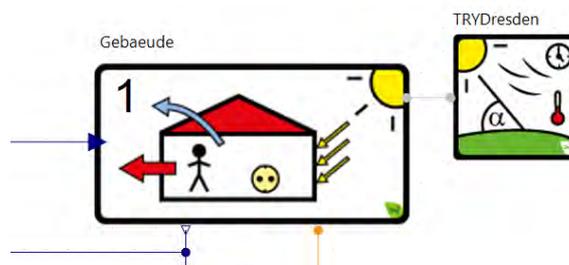


Abbildung 3-2: Gebäude mit Wetterdaten auf der grafischen Benutzeroberfläche

### 3.1.2 Wärmeübergabesystem

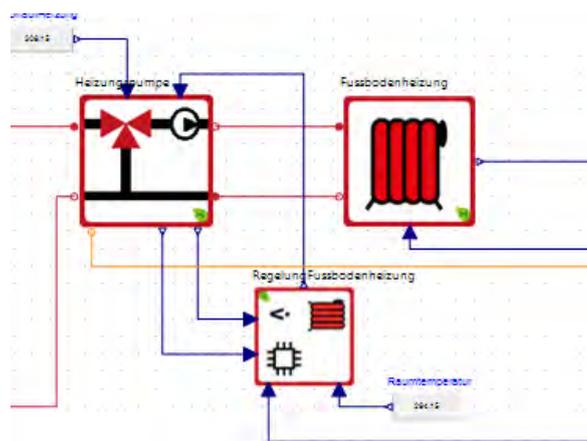


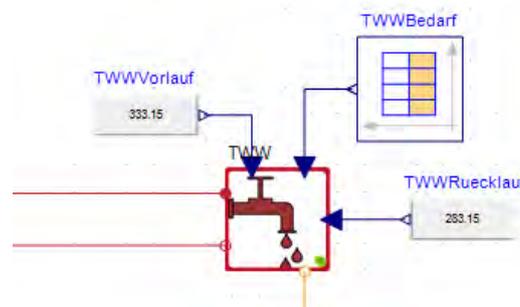
Abbildung 3-3: Heizungssystem

Das Gebäude wird mit einer Fußbodenheizung beheizt. Die Heizfläche wird mit der doppelten

Grundfläche angenommen, so dass bei einer Heizleistung von  $60 \text{ W/m}^2$  insgesamt  $8,3 \text{ kW}$  in das Gebäude eingebracht werden können. Die Heizung wird bei einer Vorlauftemperatur von  $35 \text{ °C}$  mit Wasser betrieben ( $150 \text{ l}$  Fassungsvermögen). Abbildung 3-3 zeigt die Komponenten der Heizung: Pumpe und Heizkreismischer, Regelung, Fußbodenheizung. In der Regelung wird auch die angestrebte Raumtemperatur von  $21 \text{ °C}$  eingegeben. Sie wird über eine Hysterese von  $\pm 0,2 \text{ K}$  geregelt.

Der Heizwärmebedarfsgang ergibt sich aus der Simulation auf Basis der Umgebungsbedingungen eines Testreferenzjahres.

### 3.1.3 Warmwasser



**Abbildung 3-4: Trinkwarmwasserzapfung**

Die Modellierung des Warmwasserbedarfs orientiert sich an der VDI-Richtlinie 4655 [VDI4655]. Diese gibt für eine 4-köpfige Familie einen Warmwasserbedarf von  $2.000 \text{ kWh/a}$  an. Die Verteilung dieser Wärmemenge auf die einzelnen Tage wird für die Simulation gegenüber der Richtlinie leicht abgeändert. In der Richtlinie gibt es insgesamt 10 Typtage. Diese werden unterschieden nach Wintertag, Sommertag und Übertag mit jeweils Werktag und Sonntag. Für die Winter- und Übertage wird darüber hinaus noch zwischen bewölkt und heiter unterschieden. Mit der Richtlinie 4655 lassen sich dann einzelne Tagesverbräuche berechnen, welche dann auf ein dem jeweiligen Typtag entsprechendes Lastprofil verteilt werden. Da dies für Simulation zu aufwendig wäre und eine zu große Datenmenge ergeben würde, werden Vereinfachungen getroffen. Zunächst wird die Anzahl der Typtage auf 6 verringert. Es gibt nur noch Übergangs-, Winter- und Sommertage jeweils mit Werk- und Sonntag. Außerdem wird das minutengenaue Lastprofil auf 15-Minuten-Schritte verdichtet. Als Winter wird die Zeit von Dezember bis Februar verwendet, für den Übergang die Zeit von März bis Mai sowie von September bis November und für den Sommer die Zeit von Juni bis August. Mit diesen Annahmen ergibt sich ein Warmwasserbedarf von insgesamt ca.  $1.911 \text{ kWh}$  pro Jahr.

Für die Simulation wird eine Warmwassertemperatur von  $60 \text{ °C}$  angenommen. Diese ist nach DVGW-Arbeitsblatt W551 [DVGW04] mindestens nötig, um einer Legionelleninfektion vorzubeugen. Die Temperatur des Kaltwassers wird mit  $10 \text{ °C}$  angenommen.

### 3.1.4 Strombedarf

Der Stromverbrauch des Einfamilienhauses wird über die in der VDI-Richtlinie 4655 [VDI4655] enthaltenen Lastprofile berechnet. Für einen 4-Personen-Haushalt wird ein Jahresverbrauch von 7.000 kWh veranschlagt. In Abbildung 3-5 ist exemplarisch der Verlauf des Strombedarfs eines Werktages gezeigt.

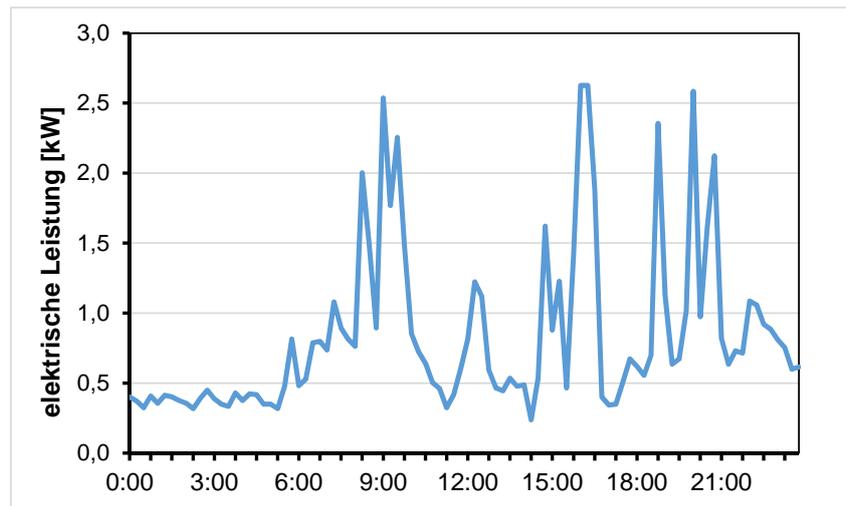


Abbildung 3-5: Strombedarf eines Wochentages

Für die Personen im Haus wird ein Anwesenheitsprofil angelegt, welches zwischen Wochentagen, Samstagen und Sonntagen unterscheidet. Die zeitliche Auflösung ist 30 min. Das Profil ist in Abbildung 3-6 dargestellt. Einzelne Personen tragen mit einer durchschnittlichen Wärmeabgabe von 100 W zu den inneren Wärmegewinnen bei.

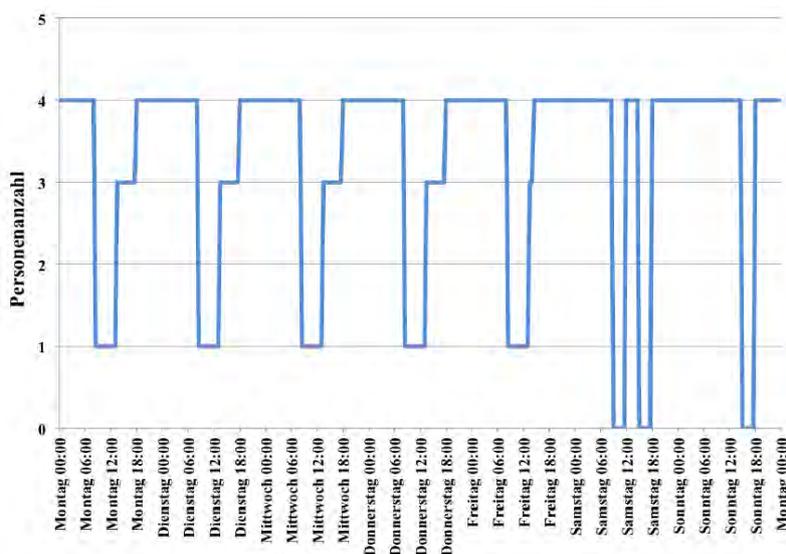


Abbildung 3-6: Anwesenheitsprofil des EFHs

## 3.2 Komponenten der Heizungsanlage

Das Heizsystem kann aus den folgenden Komponenten bestehen. Diese werden je nach Szenario in das Gesamtmodell eingebunden und parametrisiert.

### 3.2.1 BHKW-System

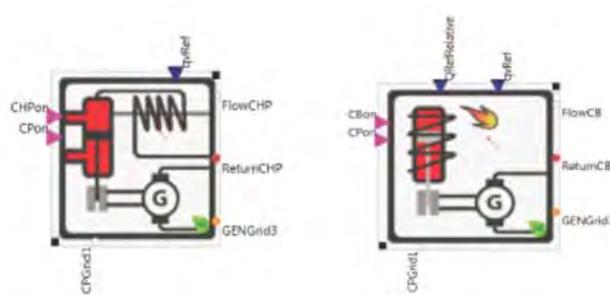


Abbildung 3-7: BHKW-Komponenten in SimulationX

Das Green Building Package enthält bereits Blöcke für BHKWs mit Gasmotoren, Brennstoffzellen und Stirlingmaschinen. Jedoch wurden hier die in Annex 42 [Annex42] entwickelten Modelle implementiert.

### Brennstoffzellensystem

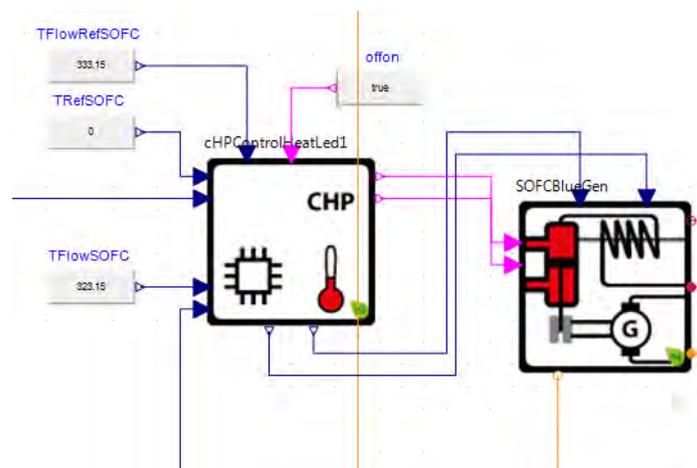
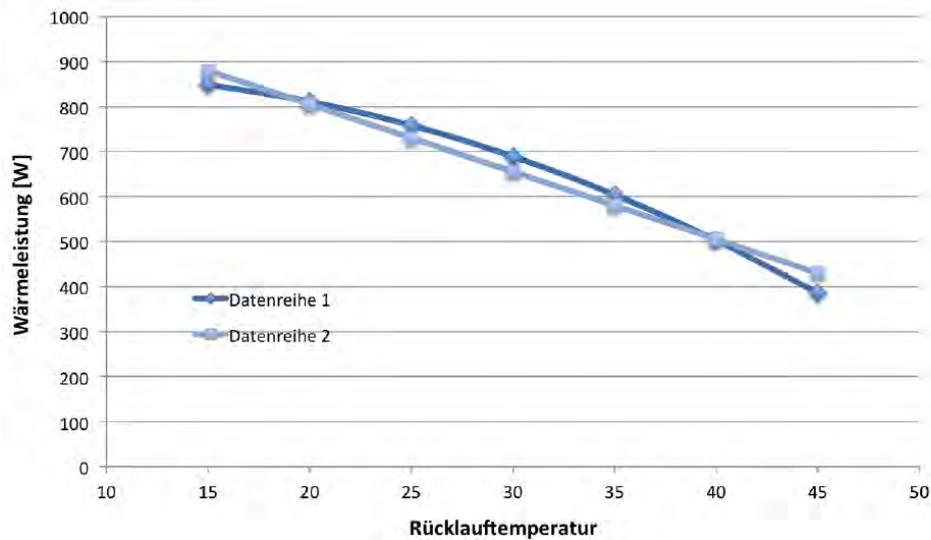


Abbildung 3-8: Brennstoffzelle mit Regelung in SimulationX

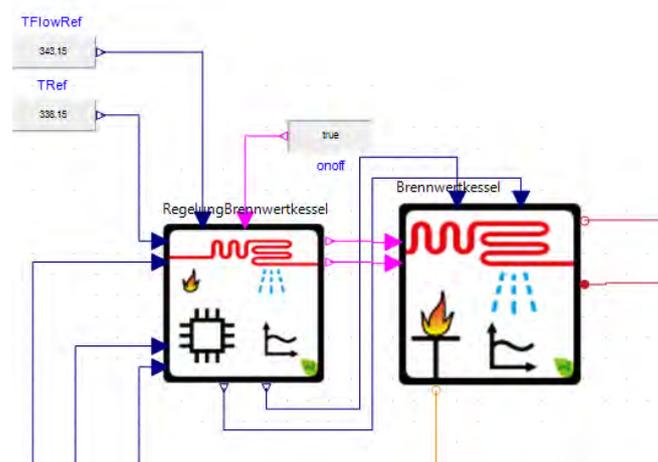
Die oben dargestellte SOFC-Brennstoffzelle wird mit Erdgas versorgt. Sie kann nicht moduliert oder ausgeschaltet werden. Deshalb läuft sie immer mit einer elektrischen Leistung von  $1,5 \text{ kW}_{el}$ . Der Wärme wird mit einem konstanten Volumenstrom von  $120 \text{ l/h}$  an den Speicher geliefert.

Für diesen Wert liegen auch Daten zur Brennstoffzelle vor, welche die Wärmeleistung abhängig von der Wassertemperatur angeben. Diese Kurve wurde linearisiert, damit sie in der Regelung hinterlegt werden kann. Die als Datenreihe 1 in der Abbildung 3-9 gezeigte Kennlinie wurde von Prof. Sommer (FH Köln) zur Verfügung gestellt [Somm14]. Datenreihe 2 zeigt eine daraus gewonnene linearisierte Kennlinie.



**Abbildung 3-9:** Wärmeleistung der Brennstoffzelle in Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur

### 3.2.2 Zusatzwärmeerzeuger



**Abbildung 3-10:** Symbolische Darstellung des Brennwertkessels und der Regelung

Die Wärmeleistung eines BHKW wird in der Regel nicht auf den Maximalbedarf ausgelegt. Um

Lastspitzen abdecken zu können, wird ein Zusatzheizgerät benötigt. Dies gilt insbesondere für das oben betrachtete BlueGEN-Brennstoffzellensystem, mit maximal 0,6 kW Wärmeleistung (bei 1,5 kW elektrisch). Die Heizleistung des hier zugrunde gelegten Brennwertkessels beträgt 13 kW. Der Gesamtwirkungsgrad liegt bei 96 %. Der Brennwertkessel wird so modelliert, dass er ausgeschaltet wird, sobald die Temperatur des Vorlaufs über 83 °C liegt oder die Temperatur des Rücklaufs auf über 73 °C ansteigt. Die Durchflussmenge wird über die Vorlauftemperatur geregelt, ist diese drei Kelvin oder mehr höher als die Referenztemperatur von 70 °C, so wird die Anlage mit maximaler Durchflussmenge von 3 m<sup>3</sup>/h betrieben. Ist die Vorlauftemperatur 10 Kelvin oder mehr kälter als die Referenztemperatur von 70 °C, so wird die Anlage mit minimaler Durchflussmenge von 0,9 m<sup>3</sup>/h betrieben. Die Werte dazwischen werden linear interpoliert.

### 3.2.3 Speicher



**Abbildung 3-11: Symbolische Darstellung des Pufferspeichers**

Der Speicher ist in der Simulation als 750-l-Kombispeicher ausgelegt und wird von der Brennstoffzelle und dem Gasbrennwertkessel gespeist. Wärme wird über die Durchlauferwärmung des Trinkwarmwassers sowie die Raumheizung entnommen. Die Brennstoffzelle hat ihre Anschlüsse am unteren Ende des Speichers, da sie bei geringen Temperaturen mehr Wärme bereitstellen kann. Der Kessel speist wie üblich im oberen Drittel direkt in den Speicher ein. Das Trinkwarmwasser wird am höchsten Punkt aus dem Speicher entnommen, das kalte Frischwasser am untersten Punkt eingespeist. Die Fußbodenheizung hat entsprechend ihres Temperaturniveaus ihre Anschlüsse in der Mitte des Speichers.

Der Speicher wird mit 10 Temperaturschichten simuliert. Bei der Simulation werden insgesamt Wärmeverluste über die Dämmung, Wärmeübertragung zwischen benachbarten Schichten sowie die Auftriebskraft aufgrund der Temperaturunterschiede berücksichtigt. Die Solltemperatur des Speichers in den oberen Schichten beträgt 70 °C. Die Umgebungstemperatur des

Speichers wird mit konstant 18 °C und die Verlustleistung mit 1 W/K angenommen.

### 3.3 Komponenten der Stromversorgung

Energiemanagement im Gebäude umfasst nicht nur die thermische, sondern auch die elektrische Seite. Folgende weitere Komponenten wurden daher für spätere Simulationen vorgesehen:

#### PV-System

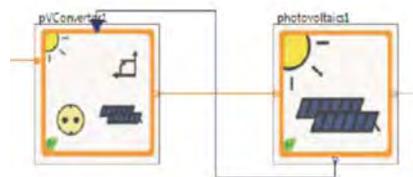


Abbildung 3-12: Symbolische Darstellung des PV-Systems

Für spätere Modellerweiterungen wurde ein PV-System in das Modell integriert. Neben der PV-Kennlinie wurde dabei auch der Wechselrichter mit MPP-Tracker implementiert.

#### Batterie-System



Abbildung 3-13: Symbolische Darstellung des Batterie-Systems

Der Strombedarf eines Haushalts unterliegt starken, teilweise stochastischen Schwankungen. Einerseits können Bedarfsspitzen nicht durch Erzeugung aus BHKW oder PV vollständig gedeckt werden. Andererseits muss zeitweilig im Gebäude erzeugter Strom in das Stromnetz eingespeist werden. Ein Batteriesystem kann hier einen Ausgleich schaffen.

## Ladestation für Elektrofahrzeuge

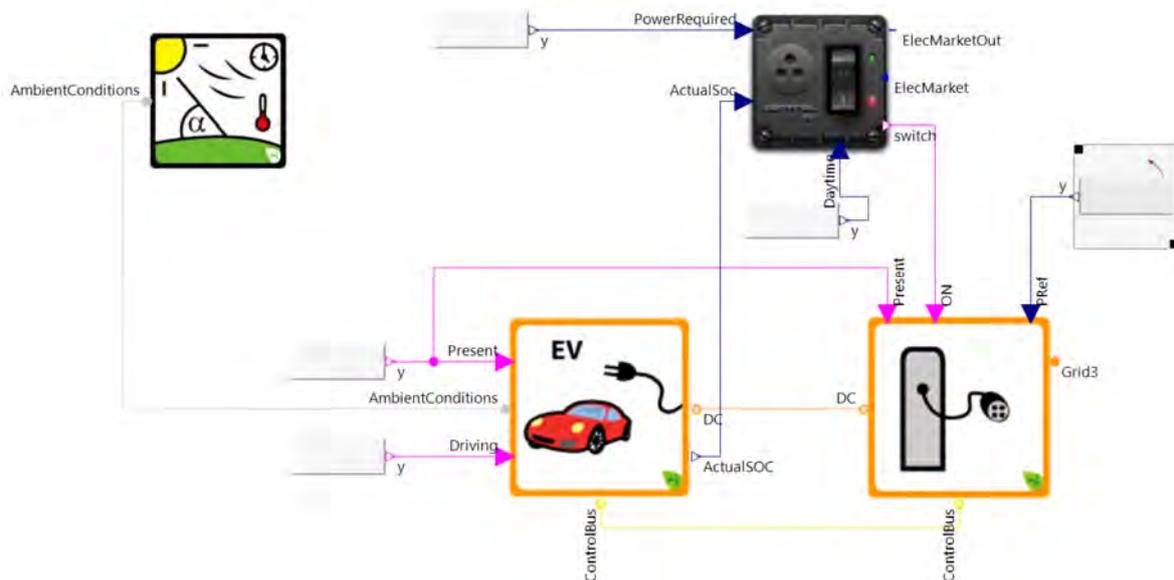


Abbildung 3-14: Symbolische Darstellung der Ladestation für Elektroautos

Mit steigender Verbreitung von Elektrofahrzeugen wird der Ladeenergieverbrauch ein wesentlicher Anteil des Stromverbrauchs eines Haushalts werden. Über Fahrprofilkurven wird die Entladung der Batterie simuliert, dabei wird der Einfluss der Außentemperatur einbezogen. Zu den Zeiten, an denen das Fahrzeug an der Ladesäule angeschlossen ist, kann der Ladecontroller die Fahrzeugbatterie gesteuert aufladen.

## Intelligente Haushaltsgeräte



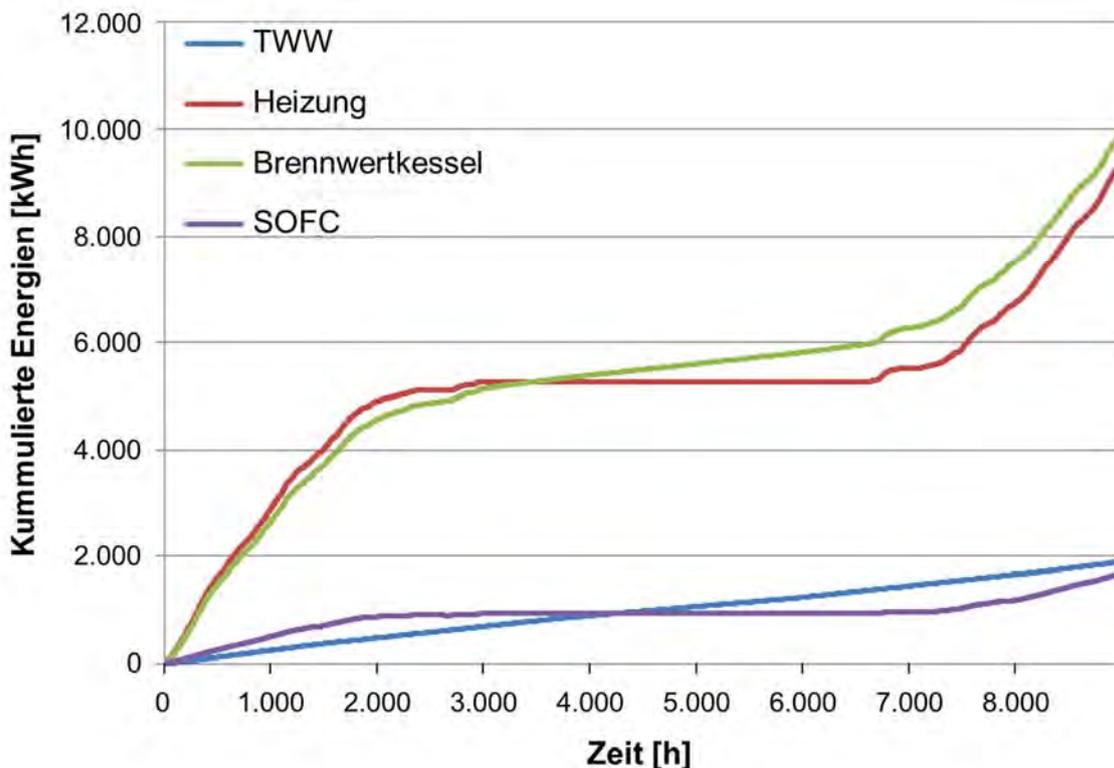
Abbildung 3-15: Symbolische Darstellung intelligenter Haushaltsgeräte

Für die spätere Umsetzung eines Smart Homes wurden für verschiedene Haushaltsgeräte Lastprofile hinterlegt (Waschmaschine, Geschirrspüler, Trockner, Gefrierschrank). Der Nutzer kann Vorgaben über den möglichen Betriebszeitraum machen. Eine intelligente Steuerung setzt die Geräte dann entsprechend einer Optimierung ein.

### 3.4 Exemplarische Ergebnisse

In [Abbildung 3-16](#) wird exemplarisch ein Ergebnis der Simulation für die Wärmeverbraucher, Trinkwarmwasser und Heizung, sowie die Wärmeerzeuger, Brennstoffzelle und Brennwertkessel, als kumulierte Kurven über ein Jahr dargestellt.

Die Brennstoffzelle liefert fast 1.700 kWh Wärme. Dies entspricht fast der benötigten Trinkwarmwasserwärme von 1.900 kWh. Jedoch kann im Sommer kaum Wärme ausgekoppelt werden, da auch die unteren Schichten des Speichers zu warm sind. Damit stellt die Brennstoffzelle nur ca. 15 % der benötigten Wärme zu Verfügung. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche nutzbare Wärmeleistung der Brennstoffzelle von nur rund 200 W. Dies entspricht einem mittleren thermischen Nutzungsgrad von ca. 8 %. Zusammen mit dem vom Hersteller angegebenen elektrischen Wirkungsgrad von 60 % und der Annahme eines unterbrechungsfreien Betriebs bei Nennleistung ergibt sich ein mittlerer Gesamtnutzungsgrad von 68 %.

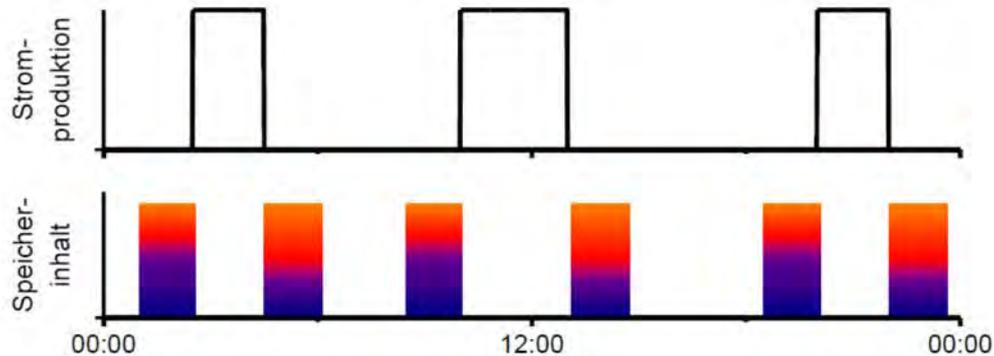


**Abbildung 3-16:** Kumulierter Energieverbrauch von Trinkwarmwasser (TWW) und Heizung sowie kumulierte Wärmeerzeugung von Brennstoffzelle (SOFC) und Brennwertkessel

Weitere Ergebnisse sind in [EIBa13] dokumentiert.

## 4 Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen

Derzeit werden Mikro-KWK-Systeme überwiegend wärmegeführt betrieben, d. h. die Wärmelast wird zeitnah gedeckt und elektrische Energie unabhängig vom Bedarf erzeugt (vgl. [Abbildung 4-1](#)). Frühere Analysen haben jedoch ergeben, dass die Eigennutzung der erzeugten elektrischen Energie die Wirtschaftlichkeit der Anlage positiv beeinflusst. Daher ist es erstrebenswert, Mikro-KWK-Anlagen stromgeführt zu betreiben, d. h. zu Zeiten signifikanten Strombedarfs im Versorgungsobjekt. Die gekoppelt erzeugte Wärme wird in einem thermischen Speicher zwischengelagert. Die Wärmespeicherung beschränkt den flexiblen Betrieb der KWK-Anlage, da es nicht zulässig ist, überschüssige Wärme zu „entsorgen“.



**Abbildung 4-1: Stromproduktion und zugehöriger Speicherinhalt bei einer Klein-KWK-Anlage im Wärmeführungsmodus [Lipp15]**

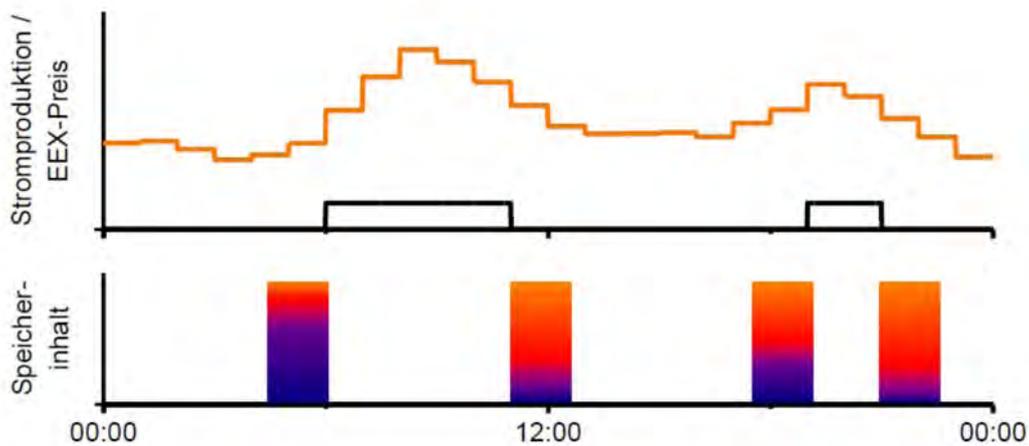
[Tabelle 4-1](#) stellt den Ist- und Soll-Zustand einander gegenüber. Neben einer Wärmebedarfsprognose wird die zentrale Rolle des Wärmespeichers ersichtlich.

**Tabelle 4-1: Verbesserungspotenziale von Mikro-KWK-Anlagen hin zu einer flexiblen Stromproduktion [Lipp15]**

| „Ist“                                    | „Soll“                                     |
|--|--|
| Stromproduktion an Wärmebedarf gekoppelt | Stromproduktion vom Wärmebedarf entkoppelt |
| Wärmeführung                             | Speicherinhaltsführung, BHKW-Fahrplan      |
| Stromproduktion zufällig                 | Stromproduktion geplant                    |
| Speicher voll oder leer (unflexibel)     | Speicher wird graduell betrieben           |
| Speicherkapazität klein und konstant     | Speicherkapazität größer und flexibel      |
| zukünftiger Wärmebedarf unbekannt        | zukünftiger Wärmebedarf prognostiziert     |

Ziel ist die in Abbildung 4-2 dargestellte nachfrageangepasste Betriebsweise des Mikro-KWK-Systems mit dem zugehörigen Wärmespeicher. Als Führungsgröße für den KWK-Betrieb wurde hier der Preis für elektrische Energie an der EPEX-Spot gewählt.

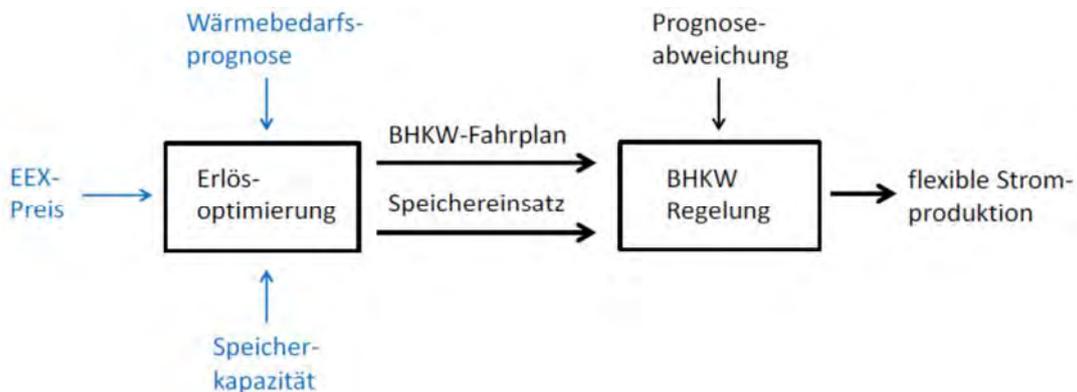
Folgende Abschnitte geben einen Überblick über die Herangehensweise zur Flexibilisierung des Anlagenbetriebs. Eine ausführliche Beschreibung ist in der Dissertation von Josef Lipp enthalten [Lipp15].



**Abbildung 4-2:** Nachfrageangepasste Stromproduktion einer Klein-KWK-Anlage und zugehöriger flexibler Speicherinhalt [Lipp15]

## 4.1 Flexibilisierung des KWK-Betriebs

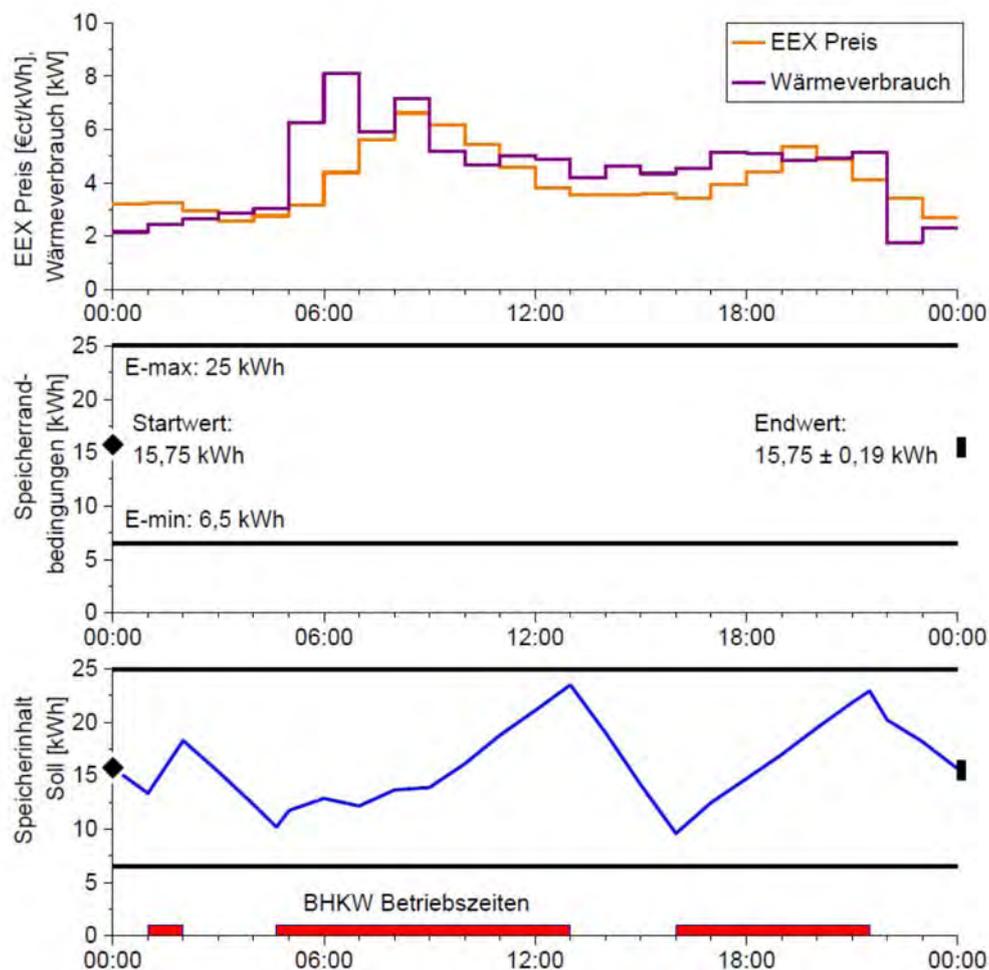
Grundvoraussetzung für die Fahrplannerstellung eines flexiblen KWK-Betriebs ist die Verfügbarkeit der relevanten Daten, die auf den Anlagenbetrieb Einfluss nehmen. Darunter fallen der zukünftige Verlauf der Führungsgröße, hier der Strompreis an der EPEX-Spot, eine Prognose des Wärmebedarfs und Zustandsgrößen des thermischen Speichers.



**Abbildung 4-3:** Ablaufdiagramm des Prozesses hin zur flexiblen Stromproduktion mit [Lipp15]

Anhand dieser Parameter wird ein kostenoptimaler Fahrplan des KWK-Betriebs erstellt und an die Regelung der Anlage übermittelt. Wie aus [Abbildung 4-3](#) ersichtlich, werden Prognoseabweichungen, durch z. B. abweichenden Wärmebedarf oder Speicherzustand, direkt von der flexiblen Regelung der KWK-Anlage aufgefangen. Das System schaltet dann ggf. früher bzw. später ein oder aus.

[Abbildung 4-4](#) zeigt für den 5 °C-Typtag die Verläufe von Wärmebedarf, EPEX-Spot-Preis, Speicherzustand und Betriebszeiten der KWK-Anlage. Ziel ist es hierbei, einen möglichst hohen Anteil der Wärme aus der KWK-Anlage zu bedienen und diese vor allem in Phasen hoher Börsenstrompreise (morgens und abends) zu betreiben.

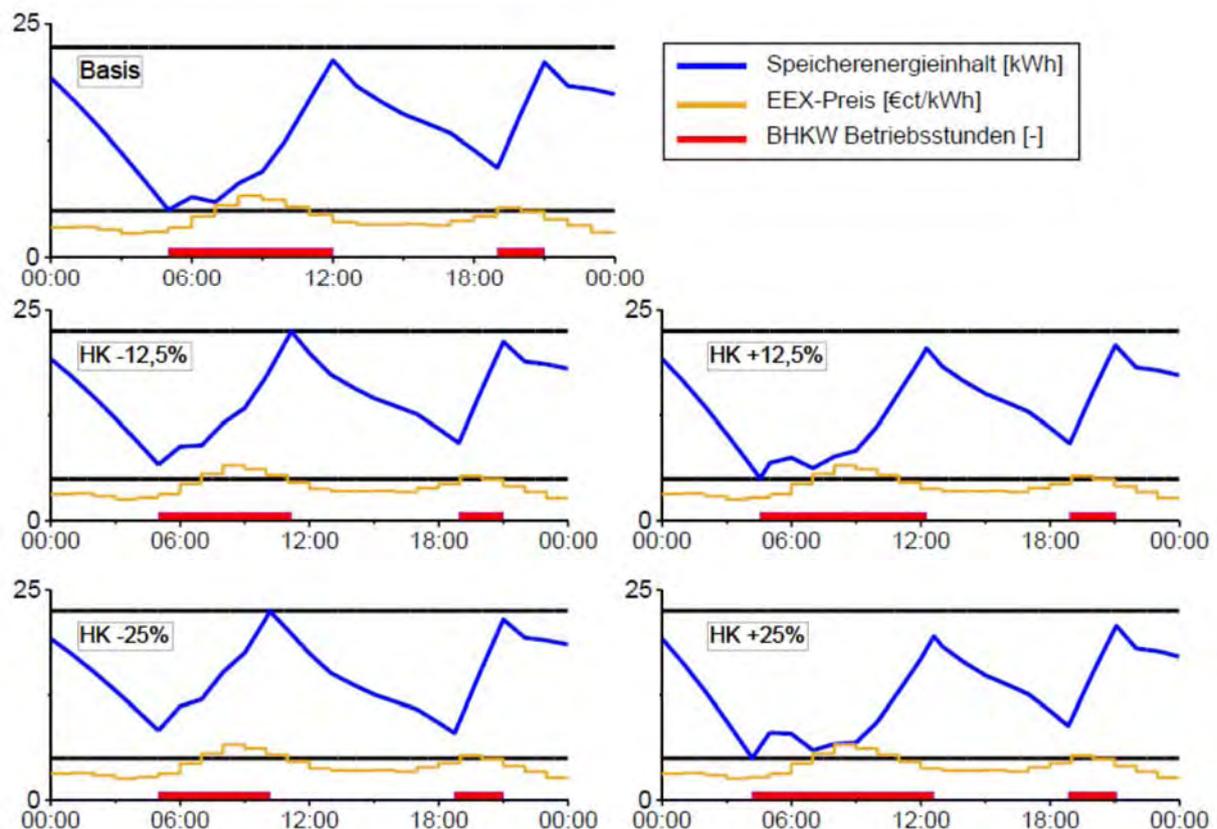


**Abbildung 4-4:** Fahrplanerstellung, Typtag 5 °C [Lipp15]

Um für die Anheizspitze von 5 bis 7 Uhr morgens ausreichend Wärme zur Verfügung stellen zu können, wird die KWK-Anlage zwischen 1 und 2 Uhr in der Nacht betrieben. Zu dieser Zeit ist der Preis an der EPEX-Spot etwas höher als in den nachfolgenden Stunden. Kurz vor 5 Uhr morgens wird die KWK-Anlage gestartet und deckt sowohl den morgendlichen Wärmebedarf

als auch die erste Hochpreisphase für elektrische Energie ab. Um 13 Uhr muss die Anlage abschalten, da der Speicherladezustand die obere Grenze erreicht. Durch den Betrieb von 16 Uhr bis nach 21 Uhr wird auch die abendliche Hochpreisphase für elektrische Energie abgedeckt. Dazwischen kann der Wärmebedarf durch den thermischen Speicher gedeckt werden.

Die Bewältigung von Prognoseabweichungen durch die flexible KWK-Regelung ist in Abbildung 4-5 anhand von fünf Szenarien dargestellt. Ausgehend vom 10 °C-Typtag wird der Heizwärmebedarf um 12,5 und 25 % reduziert bzw. angehoben. Das Absenken des Wärmebedarfs führt bei gleichem Einschaltzeitpunkt zu einem früheren Abschalten der KWK-Anlage, da die Obergrenze der Speicherbeladung früher erreicht wird. Dagegen führt ein gegenüber der Prognose höherer Wärmebedarf zu einem früheren Einschalten der KWK-Anlage, da die Untergrenze der Speicherbeladung ansonsten unterschritten würde.



**Abbildung 4-5:** Auswirkung auf das BHKW-Betriebsverhalten durch Verbrauchsabweichung, Typtag 10 °C [Lipp15]

## 4.2 Ergebnisse

Auf Basis der Simulationen und Messungen am Versuchsstand können für die flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Systemen gegenüber dem Standardbetrieb die in Abbildung 4-6

dargestellten Ergebnisse festgehalten werden:

- Die Anzahl der Startvorgänge der KWK-Anlage können um rund 25 % reduziert werden, gleichzeitig steigt deren Gesamtbetriebsdauer geringfügig an.
- Die Betriebsdauer des Zusatzheizgeräts konnte um 25 % reduziert werden, bei knapp 60 % weniger Starts.
- Durch den durchschnittlich etwas höheren Speicherladestand erhöht sich der Wärmebedarf geringfügig. Dieser Zusatzbedarf wird überwiegend aus der KWK-Anlage gedeckt.
- Durch den Betrieb der KWK-Anlage bei höheren Börsenstrompreisen können die Erlöse um knapp 10 % gesteigert werden.

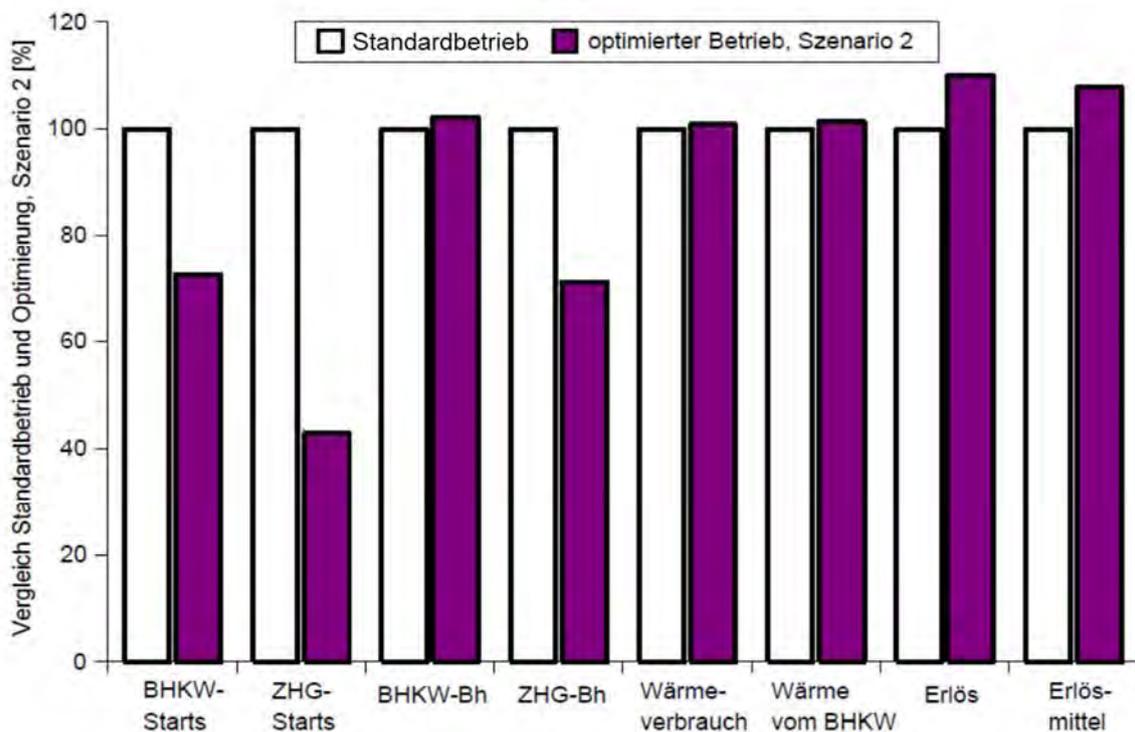


Abbildung 4-6: Jahresvergleich: Standardbetrieb – optimierter Betrieb [Lipp15]



## 5 Auswirkungen der Einspeisung aus KWK-Anlagen auf das Energiesystem

### 5.1 Untersuchungsgegenstand

Mittels der folgenden Untersuchungen soll der Einfluss der KWK auf das elektrische und thermische Energiesystem näher analysiert werden. Dabei werden die Auslegung und der Betrieb der Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung einschließlich elektrischer und thermischer Speicherung sowie Wärmenetze betrachtet.

Dazu wird das Optimierungsmodell IMAKUS eingesetzt, das die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten aus dem Betrieb von Bestandsanlagen sowie den Investitionen und dem Betrieb von neuen Anlagen zur Deckung der Strom- und Wärmenachfrage minimiert [Kuhn12, KKH12, Hei15]. Der Einsatz von Wärmespeichern ermöglicht dabei die Entkopplung der Stromerzeugung vom Wärmebedarf, so dass auch Mikro-KWK-Systeme im Rahmen eines Smart Grids als planbare Erzeuger betrieben werden können.

Ziel der Untersuchungen ist die Bestimmung der Dimensionierung und der Konstellation von Anlagen zur Deckung der Strom- und Wärmenachfrage. Insbesondere werden hierbei Mikro-KWK-Anlagen mit den zugehörigen Spitzenlastkesseln und Speichern betrachtet. Anhand vorgegebener Ausbauszenarien der KWK und eines Szenarios ohne Vorgaben zum KWK-Ausbau werden die Rückwirkungen der KWK auf den sonstigen Kraftwerkspark, auf die Wärmeerzeugungsstruktur und auf die Kosten bis 2025 aufgezeigt.

### 5.2 Methodik

Dieser Abschnitt zeigt die wichtigsten Grundzüge der Methodik des verwendeten Modells. Für weitergehende Informationen sei auf [Kuhn12, KKH12, Hei15] verwiesen.

#### 5.2.1 Eingangs- und Ergebnisgrößen

Dem Optimierungsmodell IMAKUS, dessen Teilmodell MESTAS für die Untersuchungen verwendet wird, liegen als Eingangsgrößen Daten zur Struktur und Bestandsentwicklung sowie technische und ökonomische Parameter von Kraftwerken, elektrischen Speichern, Wärmeerzeugern, Wärmespeichern und Wärmenetzen zugrunde [Hei15]. Zudem gehen Daten zur zukünftigen Entwicklung der elektrischen und thermischen Last sowie der gesetzten elektrischen Einspeisung aus Photovoltaik, Windenergie, Laufwasserkraft und Geothermie ebenso mit ein wie deren zeitliche Charakteristiken. Hinzu kommen Erzeugungsprofile für die gesetzten Wärmeerzeuger (solarthermische Anlagen, elektrische Trinkwarmwassererzeuger, Scheitholzöfen). Außerdem werden energiewirtschaftliche, politische und sonstige Rahmendaten wie beispielsweise Brennstoffpreise, Brennstoffgrenzen und Emissionsgrenzen vorgegeben.

Ergebnisgrößen sind die Entwicklung und der Einsatz von Erzeugungsanlagen und Speichern

für elektrische und thermische Energie, die optimale Konfiguration des Wärmesystems, Gesamtsystemkosten, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Brennstoffbedarf.

### 5.2.2 Struktur des Energiesystemmodells

Abbildung 5-1 zeigt eine vereinfachte Struktur des verwendeten Energiesystemmodells. Der linke Teil bildet das Stromsystem ab, der vereinfacht als „Kupferplatte“ betrachtet werden kann. Kraftwerke (KW), gesetzte Stromerzeuger (EE), elektrische Speicher und KWK-Anlagen decken hierbei zu jedem Zeitpunkt die Last elektrischer Verbraucher und elektrischer Wärmeerzeuger (el. WE). [Hei15]

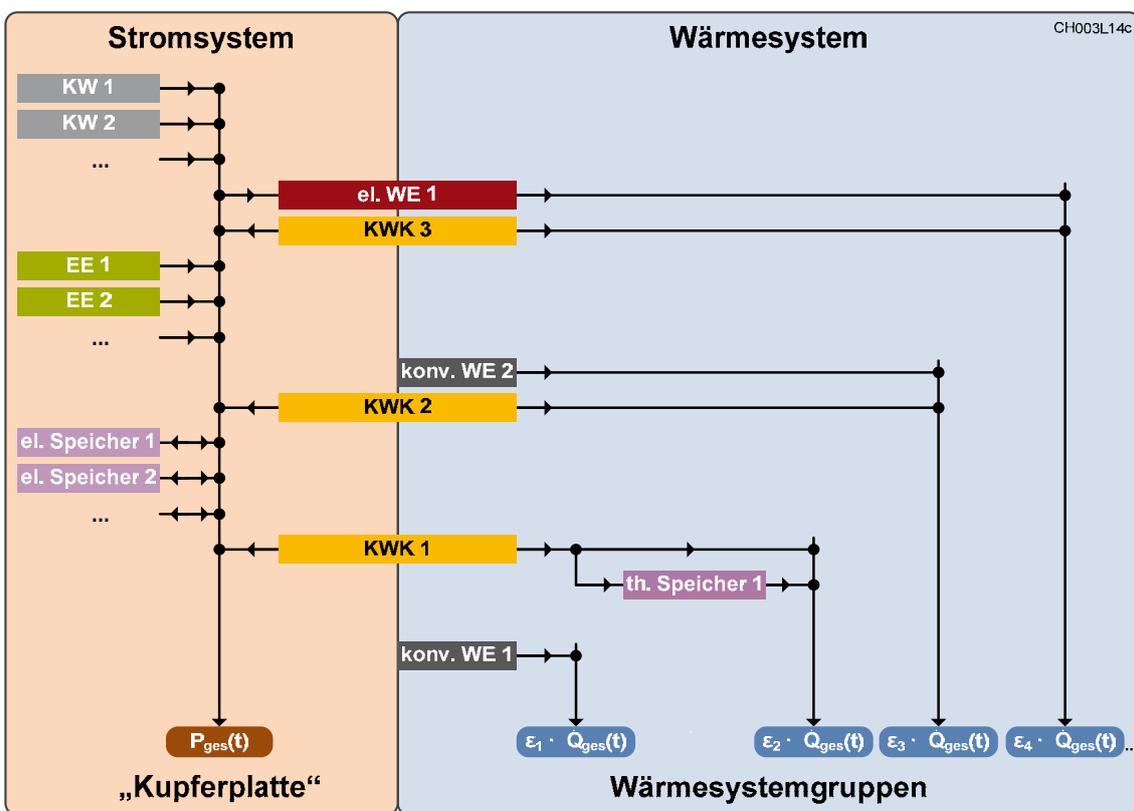


Abbildung 5-1: Vereinfachte schematische Struktur des Energiesystemmodells [Hei15]

Der Wärmesystemteil ist andersartig aufgebaut, da – im Gegensatz zum elektrischen Systemteil – kein Netz vorhanden ist, das alle Erzeuger und Verbraucher verbindet. Stattdessen existiert eine große Zahl an Wärmenetzen und objektgebundenen Wärmeversorgungssystemen. Da die einzelnen Anlagen aufgrund der Modellgröße nicht simuliert werden können, werden sogenannte Wärmesystemgruppen generiert, die typische Wärmestrukturen hinsichtlich der Anlagentypen, der installierten thermischen Leistung und des Brennstoffs abbilden. Es handelt sich sozusagen um typische Erzeugerkombinationen zur Versorgung der zugehörigen Verbraucher. Hierbei muss zu jedem Zeitpunkt die Deckung der thermischen Last durch Wärme-

erzeuger (konventionelle Erzeuger, KWK-Anlagen und elektrische Wärmeerzeuger) und Wärmespeicher in jeder einzelnen Wärmesystemgruppe gewährleistet sein. Der Wärmelastgang setzt sich jeweils aus den Anteilen für Raumwärme und Trinkwarmwasser zusammen.

Bei den Wärmesystemgruppen wird zwischen Objektversorgung (Erzeuger im zu versorgenden Objekt) und Versorgung über Wärmenetze differenziert. Die Wärmesystemgruppen existieren für Bestandsanlagen und müssen für Neuinstallationen durch das Optimierungsmodell ermittelt werden.

Ein Potenzial zur Flexibilisierung des gesamten Systems besteht durch die Kopplung von Strom- und Wärmesystem über KWK-Anlagen und elektrische Wärmeerzeuger. Dies erfolgt modellinhärent dadurch, dass die Anlagen im Sinne der volkswirtschaftlichen Gesamtoptimierung flexibel eingesetzt werden können, solange alle vorgegebenen Restriktionen eingehalten werden. Dazu gehören die Lastdeckung, Emissions- und Brennstoffgrenzen sowie technische Potenzialgrenzen.

Für die näheren Untersuchungen wird das Modell dahingehend erweitert, dass optional auch die Vorgabe von KWK-Anteilen unterschiedlicher KWK-Anlagentypen an der Stromerzeugung möglich ist.

## 5.3 Daten

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Eingangsgrößen für das Modell definiert. Weitere, nicht näher aufgeführte Daten sind in [Hei15] beschrieben.

### 5.3.1 Eingangsdaten Stromsystem

Als Eingangsgrößen für bestehende großtechnische elektrische Energieerzeuger wird ein Datensatz der Datenbanken des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München, des Umweltbundesamtes [UBA12] und der Bundesnetzagentur [BNet12] verwendet.

**Tabelle 5-1: Technische und ökonomische Daten der Neubaukraftwerke für das Jahr 2025 [KKH12, p. 35]**

| Kenngröße   | Kraftwerkstyp |               |                |                |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------|
|   | Erdgas-GT-KW  | Erdgas-GuD-KW | Steinkohle-DKW | Braunkohle-DKW |
| Nettowirkungsgrad in %  | 40            | 62            | 46             | 45             |
| Lebensdauer in a  | 30            | 30            | 40             | 40             |
| Investitionskosten in $\text{€kW}_{\text{el}}$                          | 338           | 729           | 1354           | 1562           |
| jährliche Fixkosten in $\text{€}(\text{kW}_{\text{el}} \cdot \text{a})$ | 12,17         | 20,12         | 36,00          | 40,23          |
| sonstige variable Kosten in $\text{€MWh}_{\text{el}}$                   | 2,17          | 2,08          | 4,17           | 4,17           |

Für den Neubau von reinen Stromerzeugern stehen vier Typen von Kondensationskraftwerken zur Verfügung: Steinkohle-Dampfkraftwerke, Braunkohle-Dampfkraftwerke, Gas- und Dampfturbinenkraftwerke und Gasturbinenkraftwerke. Bei den Wärmeerzeugern sind außerdem durch verschiedene KWK-Anlagen weitere Optionen zur Stromerzeugung vorhanden. In Tabelle 5-1 sind die für die Simulation relevanten Eingangsgrößen für die Kraftwerke, die im Rahmen der Optimierung neu installiert werden können, aufgeführt.

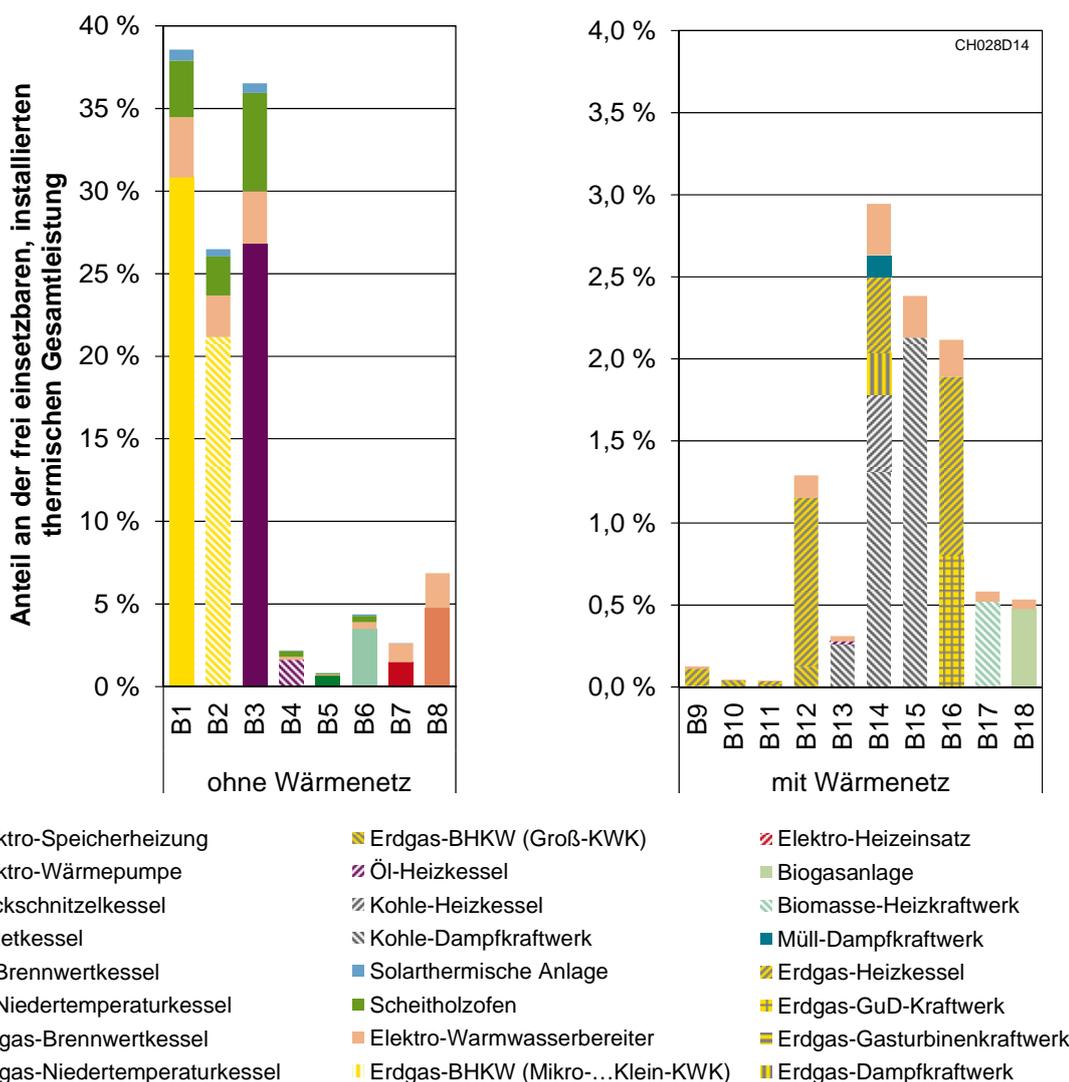
Der Optimierung werden als elektrische Bestandsspeicher im deutschen Energiesystem Pumpspeicherwerke mit einer Speicherkapazität von 77 GWh vorgegeben [KKH12, p. 96]. Zudem können als elektrische Neubauspeicher Pumpspeicherwerke (PSW), adiabate Druckluftspeicherwerke (AA-CAES) und Wasserstoff-Kavernenspeicher mit Rückverstromung über GuD-Anlagen ( $H_2$ -GuD) mit technischen und ökonomischen Daten nach [KKH12, p. 42] installiert werden.

### 5.3.2 Eingangsdaten Wärmesystem

Abbildung 5-2 zeigt die ermittelten Wärmesystemgruppen (vgl. Abbildung 5-1) im Bestand des Jahres 2012 als Anteil an der frei einsetzbaren installierten thermischen Gesamtleistung [Hei15] in Höhe von 613 GW.

Durch die technisch bedingte Lebensdauer gehen die Anlagen im Lauf der Zeit außer Betrieb. Je nach Technologie in den Wärmesystemgruppen ergeben sich für die folgenden Jahre unterschiedliche Bestandsentwicklungen. Die entstehende Lücke wird durch die Optimierung mit neuen Anlagen in neuen Wärmesystemgruppen gedeckt. Die notwendige installierte thermische Leistung geht dabei auf 547 GW im Jahr 2025 zurück.

Zudem werden im Modell thermische Speicher im Bestand nach [Hei15] berücksichtigt und können durch die Optimierung neu installiert werden.



**Abbildung 5-2: Anteile der installierten thermischen Leistungen aller Wärmeerzeuger an der frei einsetzbaren installierten thermischen Gesamtleistung nach Wärmesystemgruppen im Bestand des Jahres 2012 [Hei15]**

Für die Neuinstallationen ist eine sinnvolle Vorauswahl an Kombinationen von Wärmeerzeugertypen in neuen Wärmesystemgruppen zu treffen. Die neuen Wärmesystemgruppen sind dabei unabhängig von bestehenden Wärmesystemgruppen. Die Vorauswahl ist zusammen mit dem zugehörigen Speichertyp in [Abbildung 5-3](#) dargestellt. Bei zusätzlichen Angaben in den Feldern besteht die Option nur im betreffenden Szenario. Die Optimierung bestimmt jeweils die installierten thermischen Leistungen der Wärmeerzeuger und die Speicherkapazitäten und Speicherlade- und -entladeleistungen in den Wärmesystemgruppen.

In der Objektversorgung stehen für neue Anlagen neben den in [Abbildung 5-2](#), links aufgeführten Anlagentypen zusätzlich Elektro-Heizeinsätze und Erdgas-BHKWs (Mikro-, Mini-, Klein-KWK) als Optionen zur Verfügung.

| Wärmeerzeugertyp                 | Neue Wärmesystemgruppen |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
|----------------------------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|------------------|---------------|-----|------------------|
|                                  | ohne Wärmenetz          |    |    |    |    |    |    |    |                  | mit Wärmenetz |     |                  |
|                                  | N1                      | N2 | N3 | N4 | N5 | N6 | N7 | N8 | N9               | N10           | N11 | N12              |
| Erdgas-Niedertemperaturkessel    |                         |    |    |    |    |    |    |    | A, C             |               |     |                  |
| Erdgas-Brennwertkessel           |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Öl-Niedertemperaturkessel        |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Öl-Brennwertkessel               |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Pelletkessel                     |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Hackschnitzelkessel              |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Elektro-Wärmepumpe               |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Elektro-Speicherheizung          |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Erdgas-BHKW (Mikro-...Klein-KWK) |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Elektro-Warmwasserbereiter       |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Scheitholzofen                   |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Solarthermische Anlage           |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Kohle-Dampfkraftwerk             |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Erdgas-BHKW (Groß-KWK)           |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Erdgas-Gasturbinenkraftwerk      |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Erdgas-GuD-Kraftwerk             |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Erdgas-Heizkessel                |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     | A, C             |
| Müll-Dampfkraftwerk              |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Biomasse-Heizkraftwerk           |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Biogasanlage                     |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Elektro-Heizeinsatz              |                         |    |    |    |    |    |    |    |                  |               |     |                  |
| Speichertyp                      | S                       | S  | S  | S  | S  | S  | S  | K  | N (A)<br>S (B,C) | L             | M   | N (A)<br>M (B,C) |

|  |                               |   |                           |
|--|-------------------------------|---|---------------------------|
|   | konventioneller Wärmeerzeuger | S | Heißwasserspeicher klein  |
|   | KWK-Anlage                    | M | Heißwasserspeicher mittel |
|  | elektrischer Wärmeerzeuger    | L | Heißwasserspeicher groß   |
|  |                               | K | keramischer Speicher      |
|  |                               | N | kein Speicher             |

Abbildung 5-3: Konfigurationsmöglichkeiten für neue Wärmesystemgruppen mit Zuordnung von Wärmeversorgungstyp und Speichertyp nach [Hei15]

Die technischen und ökonomischen Daten neuer Wärmeerzeuger sind an mehrere wissenschaftliche Untersuchungen angelehnt. Die wichtigsten Größen sind in Tabelle 5-3 aufgeführt. Die Kenngrößen der in den Simulationen verwendeten neuen Wärmespeicher zeigt Tabelle 5-2. Die Annahmen zu Brennstoffkosten sind [Hei15] zu entnehmen.

Tabelle 5-2: Übersicht über installierbare thermische Speichertypen und deren Kennwerte; eigene Annahmen und Berechnungen nach [Wün11a; Fisch05; Stad05; Jahn09; Hau13; Frei11; Kras13; Lang11; Beer11; Raab05; Benn98; AEG12]

| Kenngröße  | Speichertyp                |                              |                           |                      |
|--|----------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------|
|  | S                          | M                            | L                         | K                    |
| Beschreibung   | kleiner Heißwasserspeicher | mittlerer Heißwasserspeicher | großer Heißwasserspeicher | keramischer Speicher |
| Zyklusnutzungsgrad                                   | 95,000 %                   | 96,000 %                     | 97,000 %                  | 100,000 %            |
| stündlicher Ruhenutzungsgrad                         | 98,900 %                   | 99,900 %                     | 99,989 %                  | 99,353 %             |
| Inv.-Kosten Entladeleistung in €/MW <sub>th</sub>    | 1 500                      | 1 500                        | 1 500                     | 0                    |
| Inv.-Kosten Ladeleistung in €/MW <sub>th</sub>       | 1 500                      | 1 500                        | 1 500                     | 0                    |
| Inv.-Kosten Speicherkapazität in €/MWh <sub>th</sub> | 200 000                    | 20 000                       | 2 000                     | 28 500               |
| Kosten Abriss/Rückbau in €/MWh <sub>th</sub>         | 4 000                      | 400                          | 40                        | 1 362                |
| jährliche Fixkosten in €/(MWh <sub>th</sub> ·a)      | 2 500                      | 250                          | 25                        | 713                  |

**Tabelle 5-3: Technische und ökonomische Daten installierbarer Wärmeerzeuger im Jahr 2025; eigene Annahmen und Werte in Anlehnung an [Hei15; Wün11, p. 62; Dief02, p. 14; Nast09, p. 162; Nit10, pp. 31-38; Horn07, p. 158; CARM13; FNR10, p. 22 f.; ZfK13]**

|  | Wärmeerzeugertyp                 | thermischer Nutzungsgrad | Stromkennzahl | Investitionskosten in €/kW <sub>th,out</sub> |
|--|----------------------------------|--------------------------|---------------|--|
| frei disponible Wärmeerzeuger in der Objektversorgung    | Erdgas-Niedertemperaturkessel    | 91 %                     |               | 491  |
|  | Erdgas-Brennwertkessel           | 95 %                     |               | 661  |
|  | Öl-Niedertemperaturkessel        | 87 %                     |               | 540  |
|  | Öl-Brennwertkessel               | 90 %                     |               | 708  |
|  | Pelletkessel                     | 83 %                     |               | 1133   |
|  | Hackschnitzelkessel              | 81 %                     |               | 1416   |
|  | Elektro-Wärmepumpe               | 346 %                    |               | 1330   |
|  | Elektro-Speicherheizung          | 98 %                     |               | 160  |
|  | Erdgas-BHKW (Mikro-...Klein-KWK) | 65 %                     | 0,385         | 1338   |
|  | Elektro-Heizeinsatz              | 98 %                     |               | 66   |
| gesetzte Wärmeerzeuger                                   | Elektro-Warmwasserbereiter       | 98 %                     |               | 66   |
|  | Scheitholzofen                   | 73 %                     |               | 400  |
|  | Solarthermische Anlage           | 100 %                    |               | 723  |
| frei disponible Wärmeerzeuger in der Wärmenetzversorgung | Kohle-Dampfkraftwerk             | 48 %                     | 0,708         | 1152   |
|  | Kohle-Heizkessel                 | 91 %                     |               | 24   |
|  | Öl-Heizkessel                    | 87 %                     |               | 39   |
|  | Erdgas-BHKW (Groß-KWK)           | 52 %                     | 0,708         | 566  |
|  | Erdgas-Dampfkraftwerk            | 70 %                     | 0,258         | 491  |
|  | Erdgas-Gasturbinenkraftwerk      | 55 %                     | 0,508         | 589  |
|  | Erdgas-GuD-Kraftwerk             | 49 %                     | 0,808         | 658  |
|  | Erdgas-Heizkessel                | 96 %                     |               | 39   |
|  | Müll-Dampfkraftwerk              | 43 %                     | 0,351         | 1065   |
|  | Biomasse-Heizkraftwerk           | 60 %                     | 0,424         | 1195   |
|  | Biogasanlage                     | 33 %                     | 1,158         | 3775   |
|  | Elektro-Heizeinsatz              | 98 %                     |               | 66   |

### 5.3.3 Weitere Eingangsdaten

Die elektrischen und thermischen Lastgänge sowie die allgemeinen Rahmendaten zu zeitlichen Verläufen von Temperaturen, Brennstoffkosten, Brennstoffgrenzen und Emissionsgrenzen sind [Hei15] zu entnehmen. Die wichtigsten Größen daraus sind in Tabelle 5-4 aufgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchung gelten die angegebenen Emissionsgrenzen für die Summe der Emissionen aus der Stromerzeugung und der Wärmeerzeugung für Raumwärme und Trinkwarmwasser.

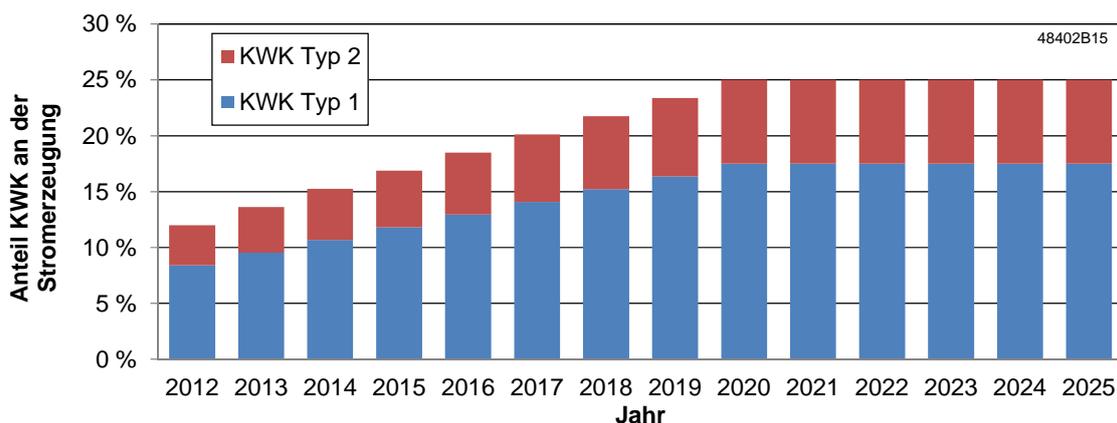
**Tabelle 5-4: Weitere Eingangsgrößen [Hei15; Mus14, p. 9; Nit12, p. 115]**

| Größe   | Jahr                   |      | Δ     |
|---|------------------------|------|-------|
|   | 2012                   | 2025 |       |
| elektr. Energieverbrauch (ohne E-Wärme) in TWh        | 504                    | 478  | -5 %  |
| elektr. Energieerzeugung aus EE in TWh                | 99                     | 229  | 131 % |
| Wärme für RW und WW in TWh                            | 802                    | 715  | -11 % |
| CO <sub>2</sub> -Emissionen für Strom und Wärme in Mt | 421                    | 299  | -29 % |
| Wärmepumpenanteil                                     | max. 55 % an neuen WSG |      |       |
| Wärmenetzanteil                                       | max. 60 %              |      |       |
| elektr. Wärmeerzeuger / elektr. Heizeinsätze          | ja / ja                |      |       |

## 5.4 Szenarien

Im Folgenden werden vier Szenarien mit unterschiedlichen Eingangsparametern untersucht. Die Variationen betreffen dabei einerseits die Kombinationsmöglichkeiten für die Wärmesystemgruppen N9 und N12 (siehe Abbildung 5-3), was durch die Szenariobuchstaben A, B und C angegeben wird. Andererseits wird unterschieden, ob der Optimierung der Anteil der KWK-Stromerzeugung, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, vorgegeben wird. Ist dies der Fall, so erhält der Szenarioname den Zusatz „fix“. Ist auch der KWK-Anteil an der Stromerzeugung eine Optimierungsgröße, so wird der Zusatz „opt“ an den Szenariobuchstaben angehängt.

Im Fall eines fixen KWK-Stromanteils entfallen 70 % davon auf Groß-KWK-Anlagen und 30 % auf kleine KWK-Anlagen (Mikro-, Mini- und Klein-KWK-Anlagen als Erdgas-BHKWs und Biogasanlagen).



**Abbildung 5-4: Entwicklung des Anteils der KWK an der Stromerzeugung mit: KWK Typ 1: Kohle-DKW, Erdgas-BHKW (Groß-KWK), Erdgas-GT, Erdgas-GuD, Müll-DKW, Biomasse-HKW; KWK Typ 2: Erdgas-BHKW (Mikro-, Mini-, Klein-KWK), Biogasanlage**

Im Szenario „A-fix“ werden in Wärmesystemgruppe N9 kleine KWK-Anlagen mit Erdgaskessel als Spitzenlastkessel und Elektro-Heizeinsätzen kombiniert. Ein Wärmespeicher ist dabei nicht vorgesehen. Szenario „B-fix“ lässt in N9 die Kombination von kleinen KWK-Anlagen mit Wärmespeichern und Elektro-Heizeinsätzen zu. In den Szenarien „C-fix“ und „C-opt“ können in N9 kleine KWK-Anlagen mit Erdgaskesseln, Elektro-Heizeinsätzen und Wärmespeichern kombiniert werden. Analog gelten die Variationen auch für Wärmesystemgruppe N12 mit Biogasanlagen als Hauptwärmeerzeuger. Die Parametervariationen sind in Tabelle 5-5 in einer Übersicht zusammengefasst.

**Tabelle 5-5: Übersicht über Szenarien**

| Szenario | Kombination von Mini-, Mikro-, Klein-KWK und Biogasanlagen mit |               | Ausbau KWK               |
|----------|--|---------------|--------------------------|
|          | Erdgaskessel   | Wärmespeicher |                          |
| A-fix    | ja   | nein          | nach Vorgabe (s. Diagr.) |
| B-fix    | nein   | ja            | nach Vorgabe (s. Diagr.) |
| C-fix    | ja   | ja            | nach Vorgabe (s. Diagr.) |
| C-opt    | ja   | ja            | optimiert                |

## 5.5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Optimierung aufgezeigt. Die Schwerpunkte liegen dabei auf der Darstellung der Zusammensetzung der Wärme- und Stromerzeugungsstruktur. Zudem werden Kostendifferenzen zwischen den Szenarien abgebildet.

### 5.5.1 Wärmeerzeugungsstruktur

Abbildung 5-5 zeigt die installierten thermischen Leistungen bestehender und neuer Wärmeerzeuger kumuliert über alle Wärmesystemgruppen für alle Szenarien im Jahr 2025. Analog wird in Abbildung 5-6 die erzeugte thermische Energie dargestellt. Die neu installierten Leistungen für die Szenarien „C-fix“ und „C-opt“ werden in Abbildung 5-7 detailliert für die einzelnen neuen Wärmesystemgruppen für das Jahr 2025 aufgezeigt.

Neue Wärmeerzeuger sind hauptsächlich Elektro-Heizeinsätze, Elektro-Wärmepumpen und Erdgas-BHKWs in der Wärmenetzversorgung. Elektro-Heizeinsätze können zum einen die notwendigen thermischen Überkapazitäten kostengünstig abdecken und zum anderen Überschüsse aus der gesetzten elektrischen Erzeugung in das Wärmesystem integrieren. Elektro-Wärmepumpen werden insbesondere aufgrund ihrer Effizienz eingesetzt. Die KWK-Stromer-

zeugung erfolgt in allen Szenarien überwiegend durch Steinkohle-KWK-Anlagen und wärmenetzgebundene Erdgas-BHKWs. In den Szenarien „A-fix“, „B-fix“ und „C-fix“ ist aufgrund der Vorgaben die Summe der Erzeugung aus kleinen KWK-Anlagen in der Objektversorgung und Biogasanlagen gesetzt. Bei Biogasanlagen wird dabei die Potenzialgrenze erreicht. In der Wärmeerzeugungsstruktur des Szenarios „C-opt“, bei dem es keine Vorgaben zum KWK-Stromanteil gibt, befinden sich nur wärmenetzgebundene KWK-Anlagen. Objektgebundene, kleine KWK-Anlagen werden ohne explizite Vorgaben im volkswirtschaftlich günstigsten Fall nicht installiert.

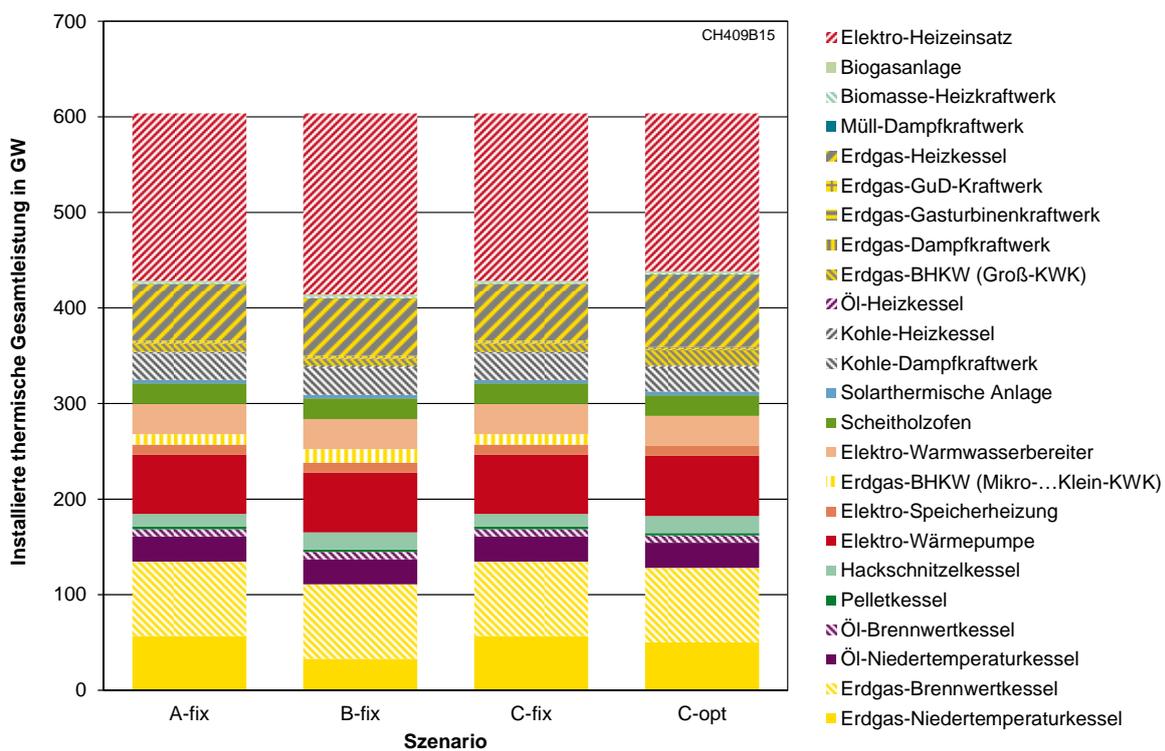
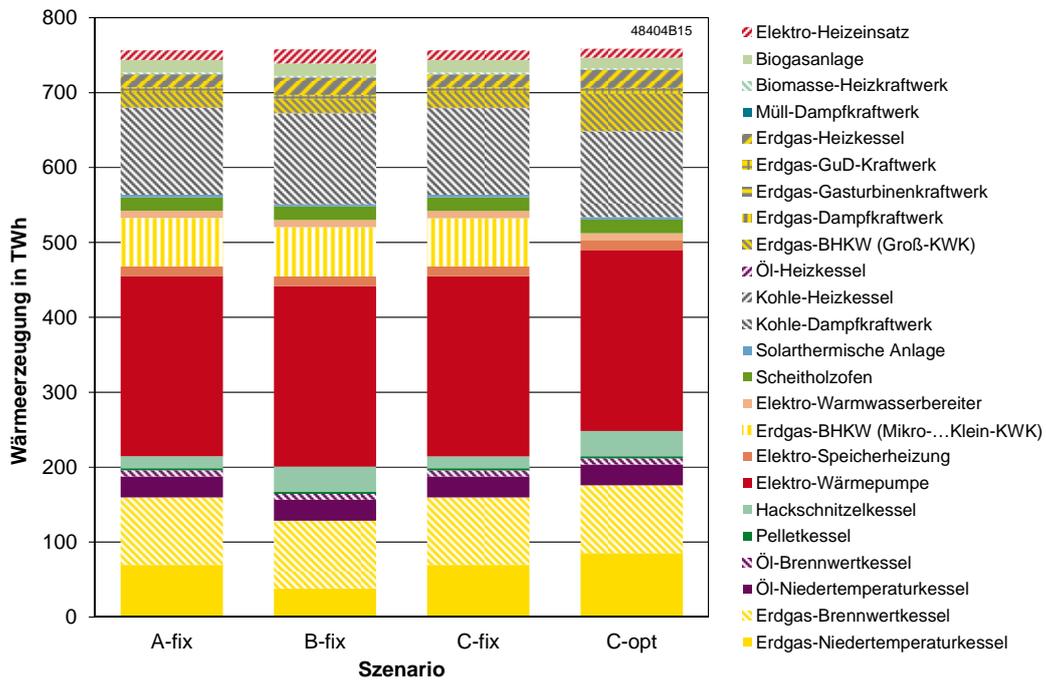


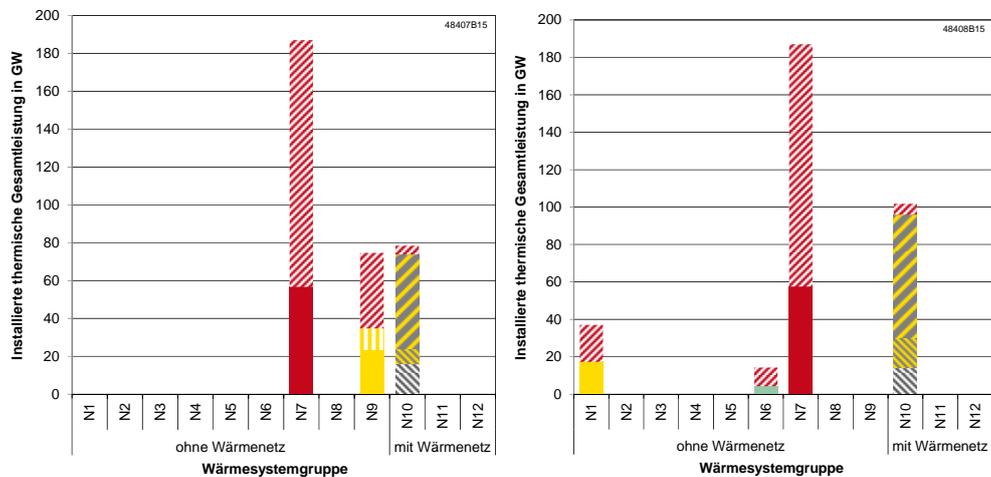
Abbildung 5-5: Installierte thermische Leistungen nach Wärmeerzeugertyp und Szenario im Jahr 2025

Das Szenario „B-fix“ weist höhere Erzeugungsleistungen von Elektro-Heizeinsätzen auf als die übrigen Szenarien. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Szenario zwar Wärmespeicher, aber keine Erdgas-Spitzenlastkessel in Kombination mit kleinen KWK-Anlagen zugelassen sind. Die Substitution dieser Spitzenlastabdeckung erfolgt daher über Wärmespeicher, die unter anderem über Elektro-Heizeinsätze geladen werden.

## Auswirkungen der Einspeisung aus KWK-Anlagen auf das Energiesystem



**Abbildung 5-6: Wärmeerzeugung nach Wärmeerzeugertyp und Szenario im Jahr 2025**



**Abbildung 5-7: Zusammensetzung der installierten Leistungen in den neuen Wärmesystemgruppen der Szenarien „C-fix“ (links) und „C-opt“ (rechts) im Jahr 2025**

Abbildung 5-8 zeigt die Leistungsanteile der Versorgungstypen an der Wärmeversorgung. Ohne Vorgabe des KWK-Stromanteils und dessen Aufteilung auf große und kleine KWK-Anlagen ergibt sich ein um ca. 4 %-Punkte höherer Anteil der Versorgung über Wärmenetze gegenüber der Objektversorgung.

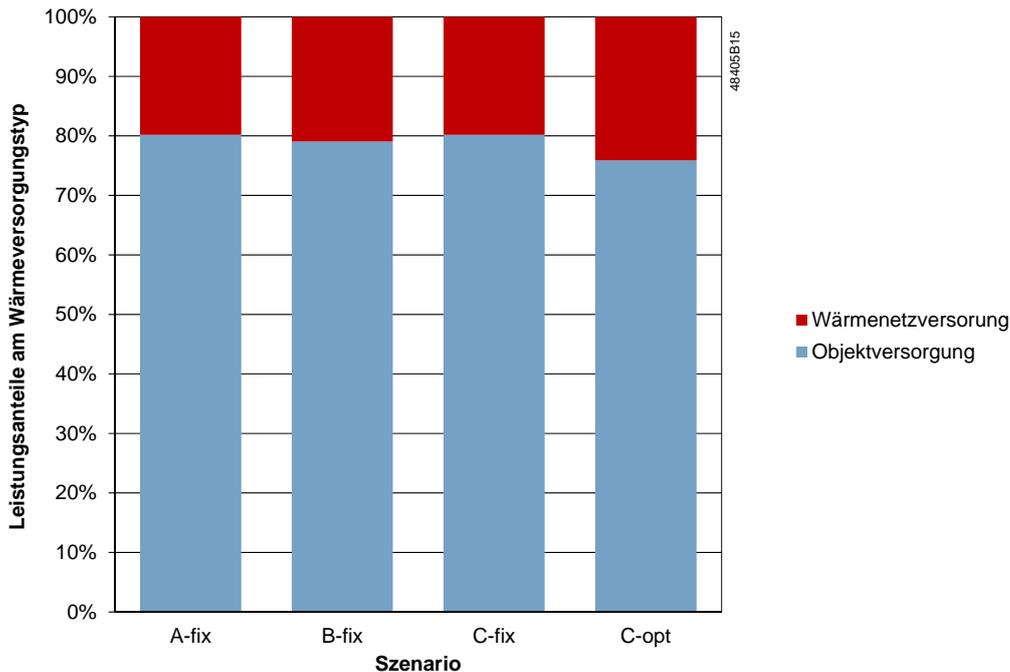
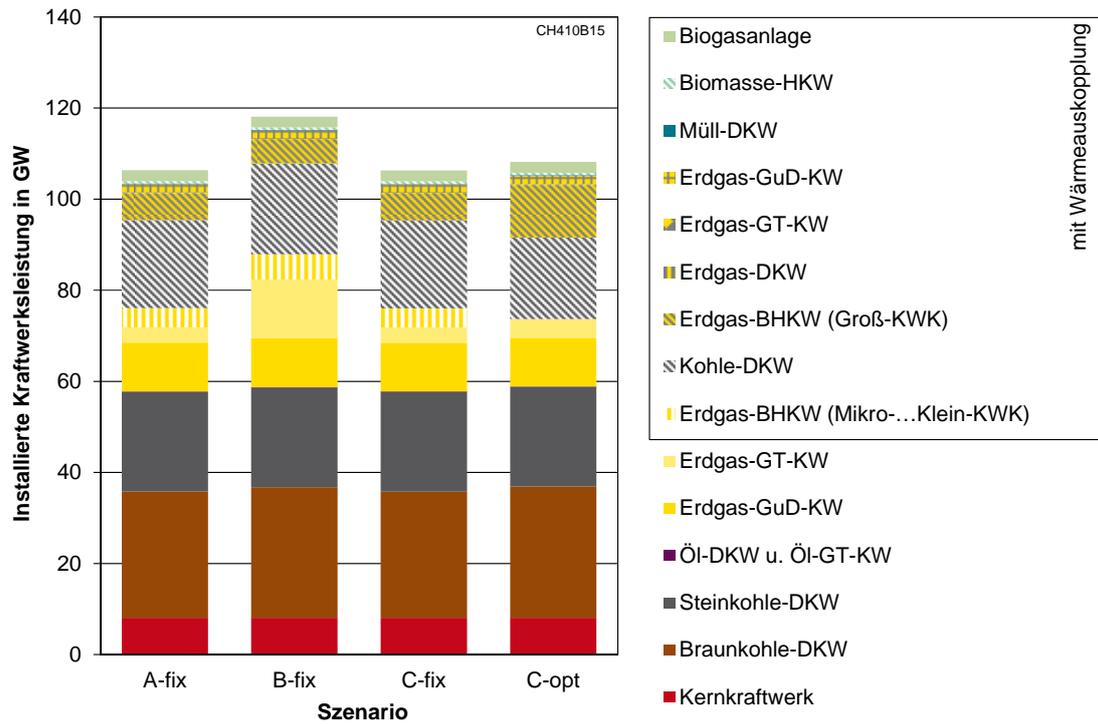


Abbildung 5-8: Anteile der Versorgungstypen im Jahr 2025

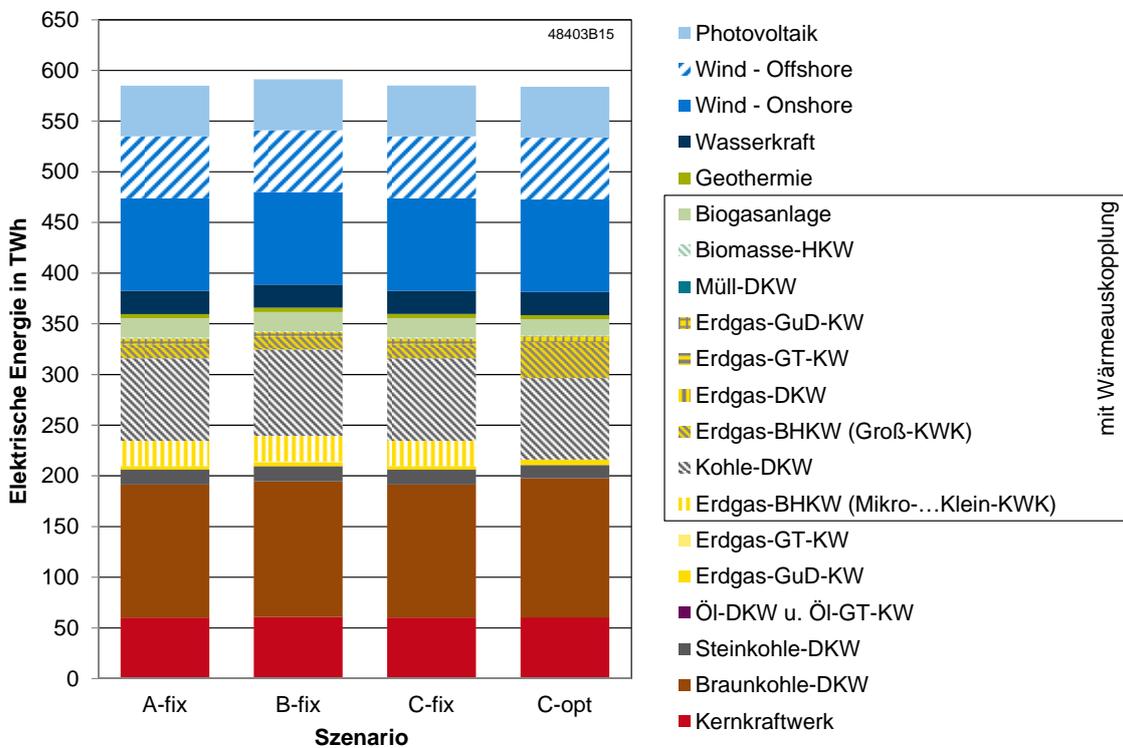
### 5.5.2 Kraftwerksstruktur

Aufgrund des Modellkonzepts gibt es Rückwirkungen der Wärmesystemstruktur auf die Kraftwerksstruktur. Abbildung 5-9 zeigt für die vier Szenarien die installierten Kraftwerksleistungen. Aufgrund der höheren Anteile von Elektro-Heizeinsätzen in Szenario „B-fix“ muss die installierte Kraftwerksleistung höher ausfallen. Der tatsächliche Einsatz dieser Anlagen fällt jedoch sehr gering aus, wie an den erzeugten Energiemengen in Abbildung 5-10 zu erkennen ist. Im Szenario „C-opt“ werden keine Erdgas-BHKWs in der Objektversorgung installiert, stattdessen fallen sowohl die installierte elektrische Leistung als auch die erzeugte Energiemenge aus großen Erdgas-BHKWs in diesem Szenario höher aus, was auf die niedrigeren Kosten zurückzuführen ist. Neben den vorgegebenen elektrischen Energiemengen aus Photovoltaik-, Windkraft-, Wasserkraft- und geothermischen Stromerzeugungsanlagen erfolgt die Stromerzeugung in allen Szenarien überwiegend aus Braun- und Steinkohle-Dampfkraftwerken mit und ohne Wärmeauskopplung.

## Auswirkungen der Einspeisung aus KWK-Anlagen auf das Energiesystem

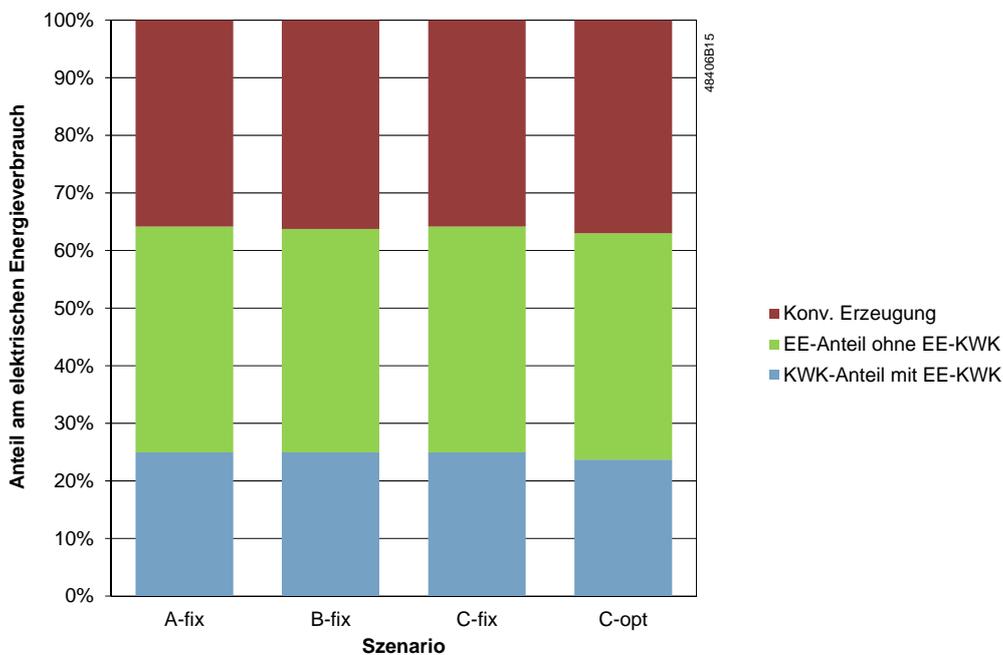


**Abbildung 5-9: Installierte elektrische Netto-Kraftwerksleistungen im Jahr 2025**



**Abbildung 5-10: Erzeugte elektrische Energie nach Kraftwerkstyp im Jahr 2025**

Die Auswirkungen auf den gesamten Anteil der KWK-Stromerzeugung fallen bei freier Optimierung relativ gering aus. Der Anteil der KWK-Stromerzeugung liegt dabei im Jahr 2025 bei 24 % im Vergleich zu den fest vorgegebenen 25 % bei den übrigen Szenarien (Abbildung 5-11).

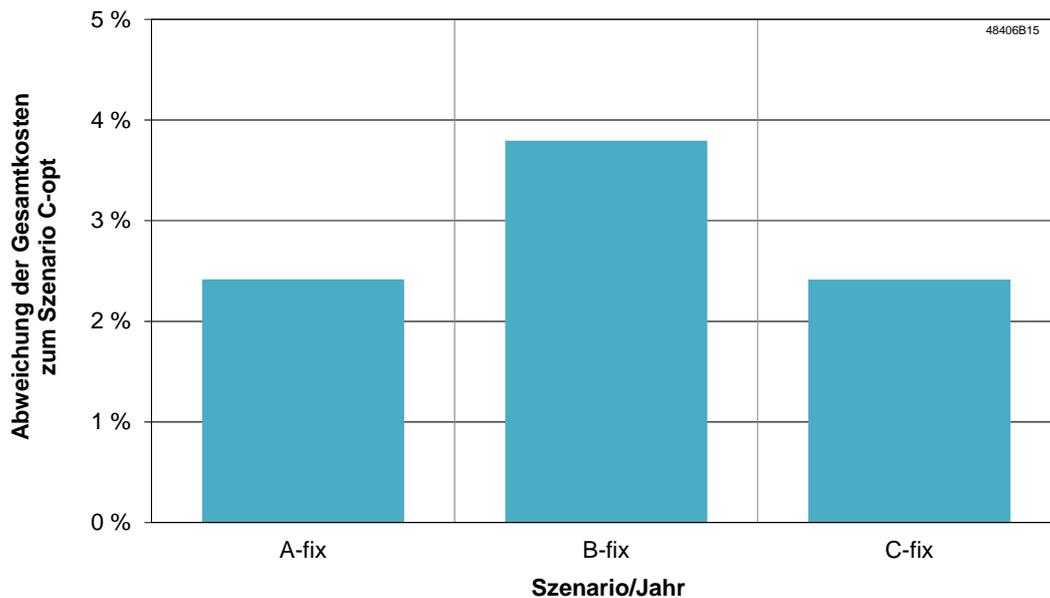


**Abbildung 5-11: Erzeugungsanteile am elektrischen Energieverbrauch 2025**

### 5.5.3 Kostenvergleich

Da die Szenarien mit vorgegebenen KWK-Anteilen zusätzliche Restriktionen gegenüber dem Szenario „C-opt“ aufweisen, muss das Szenario „C-opt“ zwangsläufig geringere oder maximal genauso hohe volkswirtschaftliche Gesamtkosten wie das günstigste der übrigen Szenarien aufweisen. Daher wurden in Abbildung 5-12 die Abweichungen der Szenarien „A-fix“, „B-fix“ und „C-fix“ gegenüber „C-opt“ dargestellt.

Es zeigen sich Abweichungen in Höhe von 2,4 % bis 3,8 % für die Gesamtkosten, d. h. die Summe aus variablen Kosten aller Anlagen und Fixkosten neuer Anlagen. Dies ist zum einen auf die höheren spezifischen Investitionskosten kleinerer KWK-Anlagen, die in „A-fix“, „B-fix“ und „C-fix“ installiert werden, zurückzuführen. Zum anderen fallen die Wärmeverluste der an KWK-Anlagen gekoppelten Wärmespeicher bei kleineren Anlagen aufgrund des schlechteren A/V-Verhältnisses höher aus, was zusätzliche Kosten verursacht. Des Weiteren werden im Szenario „C-opt“ anders als in den anderen Szenarien nur geringe zusätzliche Kapazitäten an elektrischen Speichern benötigt, was die Kosten weiter reduziert. Die niedrigeren elektrischen Speicherkapazitäten resultieren aus der höheren Flexibilität durch mehr großtechnische KWK-Anlagen kombiniert mit großtechnischen Wärmespeichern und Elektro-Heizeinsätzen.



**Abbildung 5-12: Gesamtkostendifferenzen gegenüber Szenario „C-opt“**

Wie bei jedem Modell sind auch hier Einschränkungen vorhanden. Da es sich um ein lineares Modell handelt, fehlt die Abbildung von Teillastwirkungsgraden, Anfahrvorgängen und variablen Stromkennzahlen. Es wird angenommen, dass alle Erzeugungsanlagen optimiert eingesetzt werden, was im Zusammenhang mit der perfekten Vorausschau der elektrischen und thermischen Lasten und der gesetzten Erzeugung zu Abweichungen führen kann.

Es handelt sich um ein Modell mit einem volkswirtschaftlichen Ansatz, der beinhaltet, dass alle Verbraucher einen gleichberechtigten Zugang zu den verschiedenen Energieträgern haben. Dies hat beispielsweise zur Folge, dass elektrische Wärmeerzeuger elektrische Energie zu den Grenzkosten der Stromerzeugung zum jeweiligen Zeitpunkt nutzen können. Des Weiteren steht allen gasbefeuerten Wärme- und Stromerzeugern Erdgas zu denselben Brennstoffkosten zur Verfügung.

#### 5.5.4 Fazit

Zur Ermittlung der oben dargestellten Ergebnisse wurde ein Energiesystemmodell auf Basis linearer Optimierung verwendet. Dem Modell werden als Rahmenparameter bestehende Strukturen der Beheizung und Stromerzeugung übergeben, sowie Zeitreihen für die Entwicklung von Preisen für Energieträger bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Das Modell wählt aus einem Katalog verfügbarer Technologien diejenigen aus, die für Installation und Betrieb die geringsten volkswirtschaftlichen Kosten verursachen. Das Modell ist in der Dissertation von Christian Heilek [Hei15] detailliert beschrieben.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Optimierungsmodell, aufgrund der gewählten Eingangsda-

ten, großtechnische KWK-Anlagen mit Wärmenetz gegenüber der Objektversorgung mit kleinen KWK-Anlagen präferiert. Dies ist darauf zurück zu führen, dass über Skaleneffekte größere Systeme spezifisch günstiger sind.

Als vorteilhaft wurde auch die Kombination von Heizsystemen mit Wärmespeichern und Elektro-Heizeinsätzen identifiziert. Einerseits kann günstiger „Überschussstrom“ in Zeiten hoher Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien genutzt werden. Andererseits kann durch Wärmespeicher eine zeitliche Entkopplung von Stromerzeugung und Wärmebedarfsdeckung erreicht werden.

Die Vorgabe, 30 % der KWK-Stromerzeugung (7,5 % der Gesamterzeugung) aus kleinen KWK-Anlagen zu decken, führt nur zu moderat höheren Gesamtkosten der Strom- und Wärmeerzeugung im Bereich von 2 bis 4 %.

Kosten eines unter Umständen erforderlichen Ausbaus der Stromnetze werden im Modell nicht berücksichtigt. Im Bereich des Übertragungsnetzes wäre dieser Ausbau weitgehend von den gewählten Szenarien unabhängig, in den regionalen Verteilnetzen kann durch dezentrale Klein-KWK Netzausbau tendenziell vermieden werden. Die möglichen positiven Auswirkungen des dezentralen Einsatzes kleiner KWK-Anlagen auf das regionale Stromnetz konnten mithilfe dieses Modells jedoch nicht bewertet werden.

## 6 Aktivitäten im Rahmen des EBC Annex 54

Im Rahmen des 2008 abgeschlossenen Annex 42 "The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems" des IEA-ECBCS-Programms wurden verschiedene Technologien kleiner Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme (Mini-KWK-Systeme) analysiert, beschrieben, als Simulationsmodell in verschiedenen Simulationsumgebungen implementiert und validiert. Schwerpunkt waren dabei Brennstoffzellensysteme. Ein weiterer Fokus lag auf der vergleichenden Bewertung dieser Systeme untereinander und gegenüber konventioneller Heiztechnik in Gebäuden.

Die erfolgreiche Arbeit wurde in Annex 54 "Integration of Microgeneration and Related Technologies in Buildings" fortgeführt. Neben der Weiterentwicklung der in Annex 42 erstellten Modelle einzelner Mini-KWK-Module lag der Fokus stärker auf dem Gesamtsystem – einschließlich Wärmespeicher, Spitzenlastwärmeerzeuger und der Systemregelung – und dessen Optimierung hinsichtlich Auslegung und Betrieb. Annex 54 lief von 2010 bis 2014 mit der Beteiligung von 29 Forschungsinstituten und Firmen aus zehn Ländern.

Die Bearbeitung von Annex 54 war in Subtasks gegliedert. Der Lehrstuhl war an allen drei Subtasks beteiligt.

- **Subtask A Technical Development:** Modellierung und Simulation von einzelnen Komponenten bis hin zu Gesamtsystemen, Definition von Lastprofilen auf Basis gemessener und simulierter Daten, Entwicklung von Regelungsverfahren
- **Subtask B Performance Assessment:** Methodenentwicklung und Bewertung von Mikro-KWK-Systemen, Analyse länderspezifischer Einflussparameter
- **Subtask C Robust Mechanism for Diffusion:** Analyse von nationalen Förderinstrumenten und ihrer Wirkung, Außenwirkung des Annex durch Veröffentlichungen, Workshops etc.

In Abbildung 6-1 ist die Vorgehensweise von Annex 54 und die überlagerte Struktur der Subtasks dargestellt. Die in Subtask A gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des Verhaltens und der Effizienz der Systeme werden verwendet, um in Subtask B eine wirtschaftliche und ökologische Bewertung vorzunehmen. Beeinflusst wird dies durch die in Subtask C erfassten politischen Ziele und Regularien. Die Systemoptimierung wiederum beeinflusst den Betrieb der Systeme, und so schließt sich der Kreis.

Folgende Berichte stehen nun auf der Webseite des EBC zur Verfügung (<http://www.iea-ebc.org/projects/completed-projects/ebc-annex-54>):

- Integration of Microgeneration and Related Technologies in Buildings – Final Report of Annex 54
- An International Survey of Electrical and DHW Load Profiles for Use in Simulating the Performance of Residential Micro-cogeneration Systems (Subtask A)

- Current Updates on the Development and Implementation of Micro-Cogeneration System Models for Building Simulation Programs (Subtask A)
- Impact of Microgeneration Systems on the Low-Voltage Electricity Grid (Subtask B)
- Methodologies for the Performance Assessment of Micro Hybrid Polygeneration Systems (Subtask B)
- Synthesis Report on the Viability of Micro-Generation Systems in Different Operational Contexts (Subtask B)
- A Comparative Review of Microgeneration Policy Instruments in OECD Countries (Subtask C)
- Impact of Support Mechanisms on Microgeneration Performance in OECD Countries (Subtask C)

Nachfolgend werden die Subtasks und die Beteiligung des Lehrstuhls detaillierter vorgestellt.

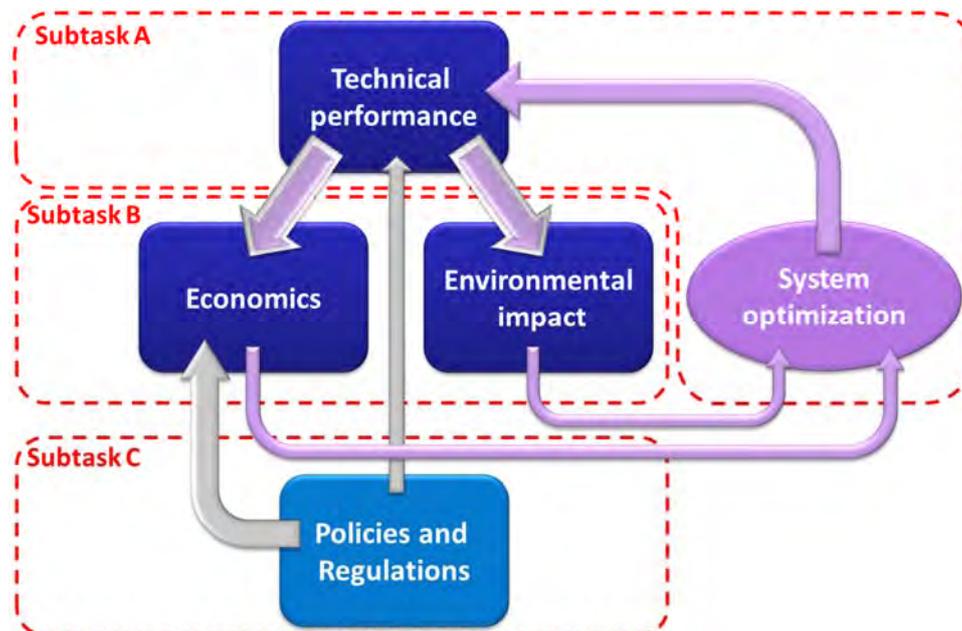


Abbildung 6-1: Struktur des Annex 54

## 6.1 Subtask A – Technical Development

In Subtask A wurden alle hardwarenahen Aktivitäten und die numerische Modellierung gebündelt (siehe [Abbildung 6-2](#)). Dies umfasst:

- Erheben und Bereitstellen von Messdaten aus Feldversuchen und Laborexperimenten.
- Datenanalyse und Aufbereitung zur Synthese von Bedarfszeitreihen für Strom, Heizwärme und Warmwasser.

- Entwicklung von numerischen Modellen für Mikro-KWK-Module, aber auch anderer Erzeuger, wie Brennwertgeräte, PV-Anlagen oder Wärmepumpen, und Systemkomponenten, wie Wärmespeicher, Wärmetauscher oder Pumpen.
- Implementieren der Modelle in Simulationswerkzeuge, wie TRNSYS, ESPr, Matlab/Simulink oder SimulationX/Modelica.
- Parametrieren und Validieren der Modelle anhand gemessener Daten (s. o.).
- Rechnen von Szenarien zur Systembewertung mit variierenden Parametern.

Der Lehrstuhl war in diese Aktivitäten mit der Bereitstellung von Messdaten aus Feldversuchen und Messungen am Versuchsstand beteiligt und hat ein Simulationsmodell in SimulationX aufgebaut.

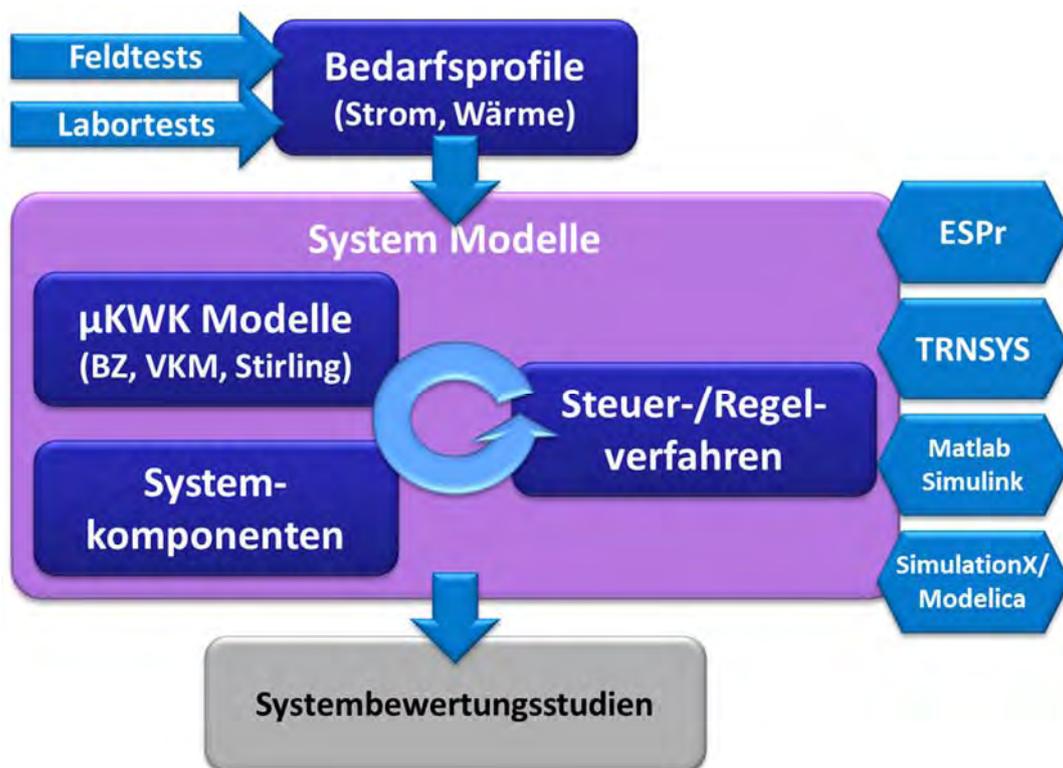


Abbildung 6-2: Strukturschema von Subtask A

## 6.2 Subtask B – Performance Assessment

Im Rahmen von Subtask B wurden Methoden zur länderübergreifenden Systembewertung von Mikro-KWK-Systemen entwickelt.

Zusammen mit länderspezifischen Rahmendaten und den in Subtask A erarbeiteten Ergebnissen wurden für ausgewählte Länder Systemanalysen durchgeführt. Dabei wurden verschie-

dene Erzeugungstechnologien auch in Kombination untersucht. Punktuell wurden auch Demand Side Management (DSM), das Laden von Elektrofahrzeugen (BEV/PHV) und Belange des Smart Grid einbezogen (Abbildung 6-3).

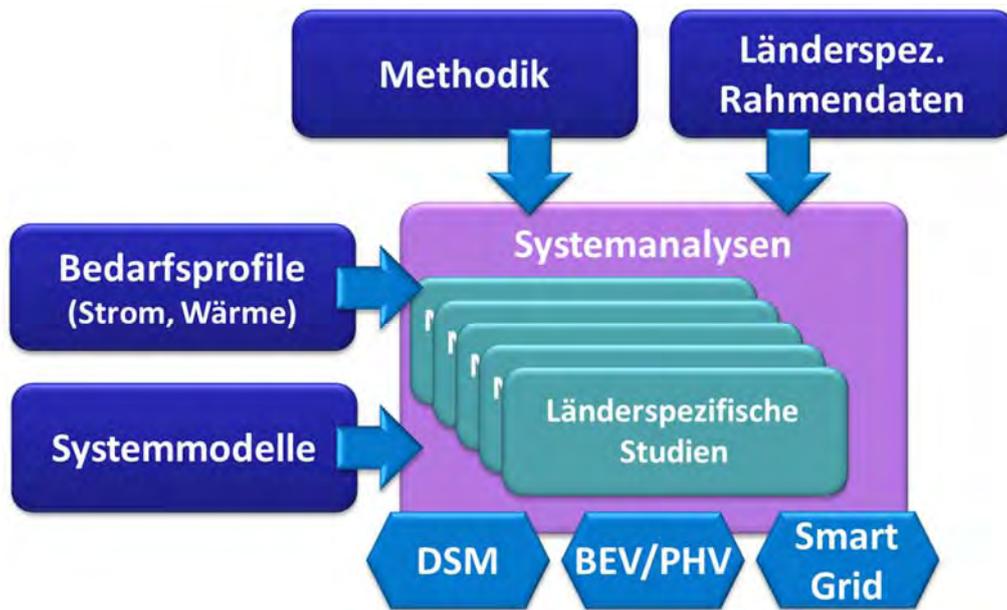


Abbildung 6-3: Strukturschema von Subtask B

Methodisch wurde nach der 3E-Analyse (Energy, Economy and Environment) vorgegangen, die in [Abbildung 6-4](#) dargestellt ist

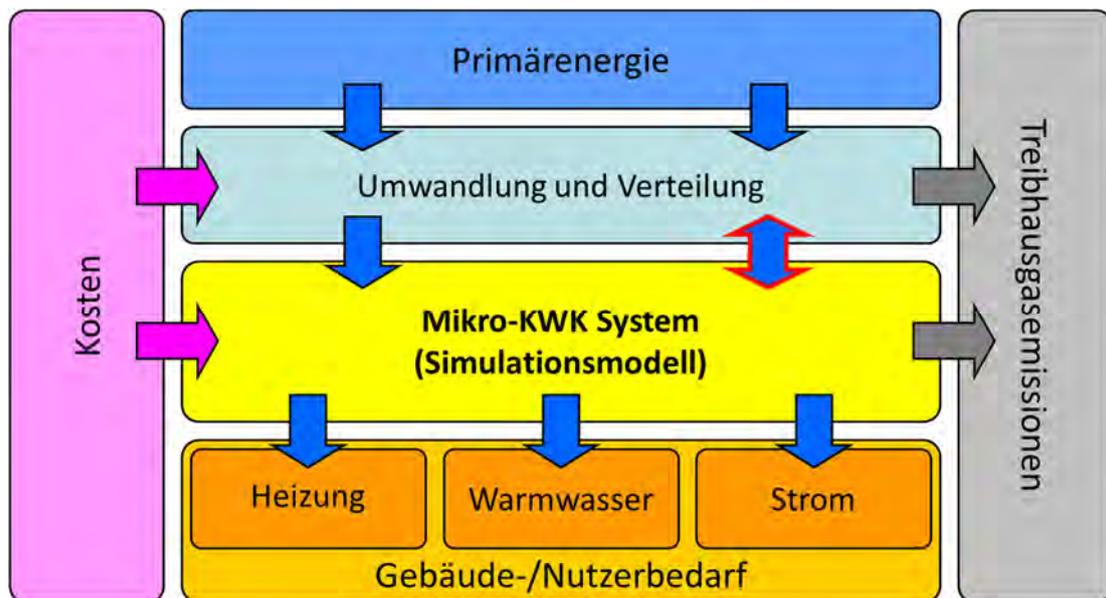


Abbildung 6-4: Schema 3E-Analyse (Energy, Economy and Environment)

Zentrales Element ist das **Mikro-KWK-System**, das als Simulationsmodell oder anhand von Messergebnissen abgebildet ist. Ziel ist die Deckung des Energiebedarfs des Gebäudes und seiner Nutzer an Heizwärme, Warmwasser und elektrischer Energie. Die dafür eingesetzten Endenergieträger werden aus **Primärenergieträgern** gewonnen. Über entsprechende, Länder- Energieträger-abhängige Aufwandszahlen bzw. Bereitstellungsnutzungsgrade wird der energetische Aufwand für Exploration, Umwandlung und Verteilung der Energieträger ermittelt. Parallel dazu werden die mit der Installation und dem Betrieb der Anlage verbundenen **Kosten** erfasst. Über eine annuitätische Bewertung können unterschiedliche Lebensdauern verschiedener Komponenten berücksichtigt werden. Die **Treibhausgasemissionen** werden anhand von Emissionsfaktoren der eingesetzten Energieträger ermittelt. Dabei werden auch die in der Vorkette entstehenden indirekten Emissionen berücksichtigt.

An Subtask B war der Lehrstuhl mit der Bereitstellung der für Deutschland spezifischen Rahmendaten und Sensitivitätsanalysen beteiligt. Es wurde ein Excel-Tool entwickelt, mit der die 3E-Analyse anhand von aggregierten Daten durchgeführt werden kann. Das Tool ist online verfügbar ([https://gitlab.lrz.de/gi23quy/Annex\\_54/blob/master/Micro-CHP\\_3E\\_Assessment\\_Tool\\_v4.xlsx](https://gitlab.lrz.de/gi23quy/Annex_54/blob/master/Micro-CHP_3E_Assessment_Tool_v4.xlsx)).

### 6.3 Subtask C – Robust Mechanisms for Diffusion

Aufgabe von Subtask C war Analyse von nationalen Förderinstrumenten und ihrer Wirkung zu untersuchen.

Die politischen Ziele im Zusammenhang mit dezentraler Erzeugung, die eingesetzten Förderinstrumente für KWK, aber auch für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wurden anhand eines Fragebogens für ausgewählte Länder erhoben. Daraus wurde eine Übersicht zusammengestellt.

Der Lehrstuhl hat die entsprechenden Daten für Deutschland bereitgestellt und an der Übersicht mitgearbeitet.

Bestandteil von Subtask C war es auch, die Außenwirkung des Annex 54 durch Veröffentlichungen, Workshops etc. zu organisieren.

Im Zusammenhang mit Annex 54 wurden zwei Workshops und drei internationale Konferenzen organisiert:

- Workshop on "Building Integration of Micro-Generation Technologies" – NIST; [www.nist.gov/el/microgenseminar.cfm](http://www.nist.gov/el/microgenseminar.cfm); 27th October 2010; Gaithersburg, USA.
- 2<sup>nd</sup> International Conference on "Microgeneration Technologies and their Integration in Buildings" Glasgow, UK; April 4-6, 2011.
- Workshop on "Microgeneration Technologies in Buildings"; October 11th 2012; Tokyo, Japan

- 3<sup>rd</sup> International Conference on "Microgeneration Technologies and their Integration in Buildings"; April 15th to 17th 2013; Naples, Italy
- 4<sup>th</sup> International Conference on "Microgeneration and Related Technologies"; 28-30 October 2015; Tokyo, Japan

Der Lehrstuhl war bei diesen Aktivitäten jeweils in der Vorbereitung aktiv und mit Vorträgen und Konferenzbeiträgen vertreten.

### 6.4 Schlussfolgerungen

Nachfolgend werden die wesentlichen Schlussfolgerungen des Annex 54 aufgeteilt nach Aspekten der Technologie, Systembewertung und Wirtschaftlichkeit dargestellt.

#### Technologische Aspekte

Der Bedarf an Heizung oder Kühlung eines Gebäudes korreliert stark mit den Wetterbedingungen, insbesondere der Außentemperatur. Dagegen ist der Brauchwarmwasserbedarf durch die individuellen Nutzergewohnheiten charakterisiert. Modelle für die Prognose der thermischen Lasten haben im Projekt zufriedenstellende Übereinstimmung gezeigt. Dagegen zeigt der Strombedarf von Haushalten einen sehr stark stochastischen Verlauf. Die Prognosegüte der Modelle für den elektrischen Lastverlauf ist demzufolge eher gering.

Seit Beginn des Annex 54 im Jahr 2009 bis heute sind deutliche Fortschritte bei Micro-Erzeugungstechnologien erkennbar. Viele Hersteller haben neue Produkte auf den Markt gebracht. Demgegenüber sind auch einige Systeme vom Markt verschwunden, oft aufgrund von finanziellen Schwierigkeiten der Hersteller. Während des vorhergehenden Annex 42 (2004 bis 2008) waren viele kleine, technologiegetriebene Firmen aktiv. Nun sind verstärkt etablierte Anbieter von Heizungssystemen und Gebäudetechnik unter den Anbietern:

- Mikro-KWK-Anlagen auf Basis von Ottomotoren werden von einer Vielzahl an Herstellern in einem weiten Leistungsbereich angeboten.
- In Europa erfolgte in den letzten Jahren der Markteintritt für Stirling-Mikro-KWK-Anlagen. Die meisten basieren auf dem System der Microgen Engine Corporation und wurden in Gasbrennwertgeräte des jeweiligen Herstellers integriert.
- Brennstoffzellen werden seit 2010 in größeren Stückzahlen verkauft und wurden nach Stückzahlen 2012 marktführend. Ursache hierfür sind die hohen Stückzahlen, die in Japan aufgrund der dortigen Förderung (Enefarm) abgesetzt werden konnten. In Europa wurden Stückzahlen von einigen hundert Systemen bisher nur im Rahmen von Feldversuchen (Enefield, Callux) realisiert.
- Im Bereich kleiner Mikro-KWK-Anlagen für Ein- und Zweifamilienhäuser ist ein Trend hin zu vollintegrierten Systemen mit Strom- und Wärmerzeugern und Systemkomponenten (Pumpen, Wärmetauscher, Steuerung) erkennbar. Teilweise wird auch der Wärmespeicher integriert.

Die Entwicklung von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssystemen (KWKK, tri-generation) eröffnet neue Möglichkeiten, diese auch in Gebieten anzuwenden, die durch einen untergeordneten Heizbedarf, jedoch signifikanten Klimatisierungsbedarf gekennzeichnet sind.

### Systembewertung

Im Rahmen von Feldtests wurden von Teilnehmern des Annex 54 Messdaten im Wohngebäudebereich und von kleineren Gewerbebauten erfasst und ausgewertet. Die Messungen wurden in der Regel über einen längeren Zeitraum, typischerweise ein bis drei Jahre, durchgeführt und die relevanten energetischen Flüsse im Gebäude abgebildet. Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Der elektrische Umwandlungsnutzungsgrad auf Basis des unteren Heizwerts von Erdgas liegt im Bereich von 8 bis 15 % bei Stirlingsystemen und 20 bis 25 % bei Anlagen mit Ottomotoren. Dies schließt den elektrischen Eigenbedarf der Anlagen ein. Der Gesamtnutzungsgrad für elektrische und thermische Energie liegt im Bereich von 75 bis 95 %.
- In einigen Fällen konnte eine suboptimale Auslegung festgestellt werden. Davon betroffen sind sowohl die Dimensionierung der KWK-Anlage als auch deren Einbindung in das Heizsystem des Gebäudes. In vielen Fällen sind die Betriebsparameter nicht optimal an das Versorgungsobjekt und die Nutzerbedürfnisse angepasst. Die führt zu einer geringeren Systemeffizienz und zu wirtschaftlichen Einbußen.

Mehrere länderspezifische Studien wurden im Rahmen von Annex 54 durchgeführt. Dabei wurden immer die nationalen Rahmenbedingungen für die bezogenen Energieträger berücksichtigt, wie auch das typische Referenzsystem. Folgende Ergebnisse können daraus abgeleitet werden:

- Durch fossile Energieträger (hauptsächlich Erdgas) betriebene Mikro-KWK-Systeme können Primärenergie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen von 5 bis 20 % erreicht werden. Werden zusätzlich erneuerbare Energien genutzt (PV, Solarthermie, Wärmepumpe), so können die Einsparungen auf bis zu 40 % ansteigen. Maximal wurden 60 % Einsparung erreicht durch die Kombination von mehreren erneuerbaren Energieressourcen (z. B. Erdwärme und PV).
- Können Überschüsse an elektrischer Energie in das Versorgungsnetz eingespeist werden, wird die beste energetische, ökologische und ökonomische Bewertung im wärmegeführten Betrieb erreicht, im Vergleich mit einer stromgeführten Betriebsweise.

Energiespeicher wurden als wichtige Komponenten eines Mikro-KWK-Systems identifiziert, sowohl auf der thermischen, aber auch auf der elektrischen Seite:

- Wärmespeicher verhindern häufige An- und Abfahrvorgänge der Mikro-KWK-Anlage, verbessern damit die Systemeffizienz und erhöhen die Lebensdauer.
- Wird ein Wärmespeicher in Zeiten geringerer thermischer Last geladen, wird der Betrieb eines Spitzenlastkessels zur Deckung einer späteren Lastspitze vermieden bzw. eingeschränkt. Dadurch erhöht sich die Laufzeit der KWK-Anlage und somit deren Wirtschaftlichkeit.

- Elektrische Energie soll nach Möglichkeit vom Mikro-KWK-System erzeugt werden, wenn sie im Gebäude genutzt oder netzdienlich exportiert werden kann. Durch aktives Management des Wärmespeichers kann die Stromerzeugung von der Wärmebedarfsdeckung zeitlich entkoppelt werden.
- Elektrische Speicher können insbesondere bei Systemen mit PV-Anlagen die Eigenbedarfsdeckung erhöhen. Jedoch ist ihr Einsatz in den meisten Fällen noch nicht wirtschaftlich. In Verbindung mit KWK-Systemen sind derzeit Wärmespeicher die kostengünstigere Alternative.

### **Wirtschaftlichkeit**

Durch Mikro-KWK-Systeme können bei den Betriebskosten Einsparungen von 20 bis 30 % erreicht werden. Dem stehen jedoch beträchtliche Investitionskosten gegenüber. Insbesondere für kleine Systeme sind die spezifischen Kosten hoch und steigen mit der Komplexität des Systems, wenn z. B. noch eine PV-Anlage oder Batteriespeicher in das Gebäudeenergiesystem integriert werden. Dadurch ergeben sich oft lange Amortisationsdauern, auch wenn die nationalen Förderinstrumente berücksichtigt werden. Dies zeigt klar, dass weitere Kostenreduktionen in der Anlagentechnik erforderlich sind, die durch technischen Fortschritt und Skaleneffekte bei größerer Marktbreite erreicht werden können. Aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse kann Folgendes geschlossen werden:

- Die Profitabilität steigt mit steigender Ausnutzungsdauer der Anlage. Dieser Parameter hat den signifikantesten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Daher sollten Mikro-KWK-Systeme nicht überdimensioniert werden.
- Ebenfalls wirkt es sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Anlagen aus, wenn der erzeugte Strom überwiegend zur Deckung des Bedarfs im Gebäude verwendet wird und nur geringe Anteile eingespeist werden müssen.
- Mit zunehmender Verbreitung von Mikro-Erzeugungstechnologien können geringere Investitionskosten und bessere Wirtschaftlichkeit der Systeme erwartet werden. Bestes Beispiel hierfür sind die deutlich gesunkenen Installationskosten bei der Photovoltaik.
- Zukünftig kann von steigenden Kosten der Energiebereitstellung aus fossilen Ressourcen ausgegangen werden. Dies wird die ökonomische Situation hocheffizienter Technologien wie Mikro-KWK verbessern.

## 7 Zusammenfassung und Fazit

Gegenstand des Forschungsvorhabens „Optimierung von Mikro-KWK Systemen“ war die Untersuchung von Mikro-KWK-Systemen durch Versuche im Labor, Feldmessungen und numerische Simulation. Das Ziel dabei war die Optimierung des Betriebsverhaltens der Anlagen zur Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems im Gebäude aber auch dahingehend, die Erzeugungsanlagen flexibler einzusetzen, um die Wirtschaftlichkeit durch bedarfsgerechte Bereitstellung von Strom und Wärme zu verbessern.

Für die nachfolgende Abbildung 7-1 wurden einige der Parameter um einen definierten Punkt herum (siehe Legende) variiert. Je steiler die jeweilige Linie verläuft, umso stärker ist der Einfluss des Parameters auf die Wirtschaftlichkeit:

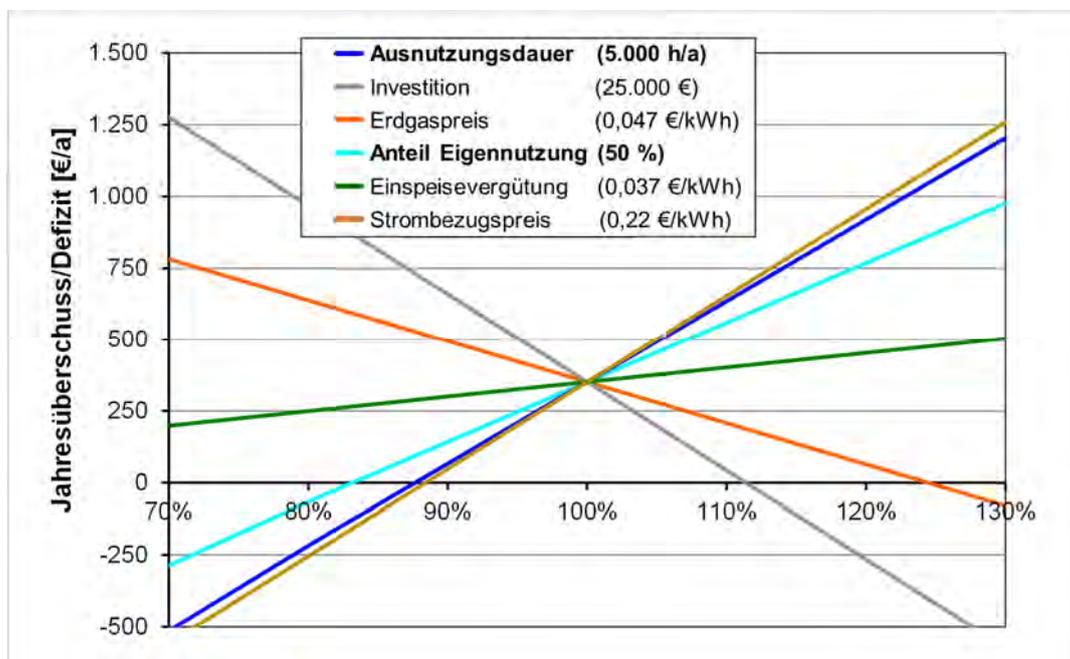


Abbildung 7-1: Sensitivitätsanalyse Mikro-KWK am Beispiel einer 5 kW<sub>el</sub>-Anlage

- Die **Ausnutzungsdauer** hat den stärksten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Schon eine geringfügig niedrigere Ausnutzungsdauer gegenüber der Auslegungsplanung führt zu deutlichen finanziellen Einbußen. Ursache kann eine Überdimensionierung der Anlage in der Planung sein, aber auch eine spätere Verringerung des Wärmebedarfs aufgrund von geänderten Nutzeranforderungen oder von Energiesparmaßnahmen.
- Der **Anteil der Eigennutzung**, mit der vom Mikro-KWK-System erzeugte elektrische Energie zur Bedarfsdeckung im Gebäude genutzt wird, hat ebenfalls einen sehr hohen finanziellen Einfluss. Dies wird durch die große Differenz zwischen Einspeisevergütung (hier 3,7 ct/kWh) und vermiedenen Strombezugskosten (hier 22 ct/kWh) hervorgerufen. Ziel ist es hier, den Betrieb der KWK-Anlage mit dem Strombedarf im Gebäude zu synchronisieren.

- Mit steigenden **Strombezugspreisen** steigt auch die Profitabilität der KWK-Anlage. Da zukünftig nicht von sinkenden, sondern eher steigenden Strompreisen ausgegangen werden kann, sind negative finanzielle Einflüsse nicht zu erwarten.
- Ebenfalls deutlich ist der Einfluss der **Investitionskosten** auf die Wirtschaftlichkeit. Können diese zukünftig verringert werden, hätte dies positive finanzielle Auswirkungen.
- Eher gering sind dagegen die Auswirkungen der **Gasbezugskosten** und der **Einspeisevergütung**.

Aus obiger Darstellung geht der signifikante Einfluss der Ausnutzungsdauer und der Eigennutzung hervor. Ein Schwerpunkt des Projekts war daher, durch aktives Management von thermischen Speichern diese Parameter zu optimieren. Als Vorarbeiten dazu wurden Messdaten aus Feldtests ausgewertet und ein Versuchstand aufgebaut, an dem ein realitätsnaher Betrieb einer Mikro-KWK-Anlage mit thermischem Speicher möglich ist. Zur Optimierung wurde ein numerisches Modell erstellt und genutzt. Die Validierung der Ergebnisse erfolgte dann im Laborversuch an einem realen System.

Der flexible Betrieb von Mikro-KWK-Systemen gegenüber dem Standardbetrieb bietet folgende Vorteile:

- Die Anzahl der Laufzyklen der KWK-Anlage kann um rund 25 % verringert werden, mit positiven Auswirkungen auf die Lebensdauer des Systems.
- Die Betriebsdauer des Zusatzheizgeräts konnte um 25 % reduziert werden, daraus resultiert eine bessere Ausnutzung des KWK-Systems.
- Durch den durchschnittlich etwas höheren Speicherladestand erhöht sich der Wärmebedarf geringfügig. Dieser Zusatzbedarf wird überwiegend aus der KWK-Anlage gedeckt.
- Werden darüber hinaus Variationen der Strombezugskosten, z. B. Kopplung an Spotmarktpreise betrachtet, und wird der Anlagenbetrieb darauf optimiert, können die Erlöse um knapp 10 % gesteigert werden.

Zur Analyse der Auswirkungen von einer Vielzahl von Mikro-KW-Systemen im Stromsystem wurde ein Energiesystemmodell eingesetzt, das sowohl den Strom- als auch den Wärmebedarf in Deutschland abbildet. Aufgrund der geringeren spezifischen Kosten präferiert das Modell größere KWK-Systeme mit Wärmenetzen gegenüber der Objektversorgung mit kleinen KWK-Anlagen. Jedoch entstehen durch die Ausweitung von Klein-KWK-Systemen (7,5 % der Gesamtstromerzeugung) nur um 2 bis 4 % höhere Gesamtkosten. Die Ergebnisse des Energiesystemmodells zeigen auch, dass Wärmespeicher notwendig sind, um den Anlagenbetrieb flexibel gestalten zu können, und dass Elektro-Heizeinsätze vorteilhaft sind, um zeitweilig günstigen „Überschussstrom“ in Form von Wärme zu speichern (Power to Heat). Die mögli-

chen positiven Auswirkungen des dezentralen Einsatzes kleiner KWK-Anlagen auf das regionale Stromnetz konnten mithilfe dieses Modells jedoch nicht bewertet werden.

Mit dem Ziel, die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Systemen zu verbessern, wurden Untersuchungen, Simulationen und Laborversuche durchgeführt. Dabei lag die Idee zugrunde, dass Preissignale des Spotmarktes an den Haushaltskunden durchgereicht werden und durch den optimierten Betrieb der Anlage entweder der Bezug in Hochpreisphasen verringert wird oder anfallende Überschüsse möglichst in diesen Phasen in das Netz eingespeist werden.

Durch den optimierten Betrieb konnten die Startvorgänge des Systems und die Betriebsdauer des Zusatzheizgeräts um jeweils rund 25 % reduziert werden. Durch den Betrieb der KWK-Anlage bei höheren Börsenstrompreisen können die Erlöse um knapp 10 % gesteigert werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass ein flexibler Betrieb von Mikro-KWK-Systemen wirtschaftlich vorteilhaft ist. Durch den stochastischen Verlauf des Strombedarfs von einzelnen Haushalten ist dessen Prognose mit großen Fehlern und somit die Eigenstromoptimierung nur mit Einschränkungen möglich. Mit weiter steigenden Anteilen fluktuierender erneuerbarer Erzeugung, insbesondere in den Ortsnetzen in Süddeutschland, werden auch kleine KWK-Systeme durch angepasstes Verhalten zukünftig zur Netzstabilität beitragen müssen. Im Rahmen dieses Projekts wurde gezeigt, dass dies durch Betriebsoptimierung auf ein äußeres Preissignal möglich ist. Zentral ist dabei die Bewirtschaftung des ausreichend dimensionierten Wärmespeichers.

Die Untersuchungen haben jedoch auch aufgezeigt, dass im Bereich der Steuerung und Regelung des Systems noch Forschungsbedarf vorhanden ist. Im Feldversuch waren die Anlagen oft suboptimal parametrisiert, was auch der Komplexität der Systeme geschuldet ist. Hier können selbstlernende modelprädiktive Algorithmen Abhilfe schaffen.



## A Anhang

## **A.1 Hydraulik und Messstellenschema des Mikro-KWK–Versuchsstands [Wild12]**





## A.2 Projektrelevante Publikationen und Präsentationen

### Publikationen

- F. Sanger, P. Tzscheutschler:  
Development of a Demand Side Management System: Evaluation of a Multi Zone Building Model with Realistic Heating System. The 4th International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 28–30 October 2015; Tokyo, Japan
- M. Windeknecht, P. Tzscheutschler:  
Increasing Electricity Selfconsumption of Micro CHP-Systems with Electrically driven Heater. The 4th International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 28–30 October 2015; Tokyo, Japan
- W. El-Baz, F. Sanger, P. Tzscheutschler:  
Hardware in the Loop for Micro CHP Systems. The 4th International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 28–30 October 2015; Tokyo, Japan
- M. Windeknecht, P. Tzscheutschler:  
Optimization of the Heat Output of High Temperature Fuel Cell Micro-CHP in Single Family homes. The 6<sup>th</sup> International Building Physics Conference IBPC 2015; June, 15–17 2015; Turin, Italy
- Ch. Heilek:  
Modellgestützte Optimierung des Neubaus und Einsatzes von Erzeugungsanlagen und Speichern für elektrische und thermische Energie im deutschen Energiesystem. Dissertation an der Technischen Universität München; 2015; <http://media-tum.ub.tum.de/?id=1230817>, München 2015
- J. Lipp:  
Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen – Experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten einer flexiblen Stromerzeugung von Mikro-KWK-Anlagen mit Hilfe einer Wärmebedarfsprognose und einem intelligenten Speichermanagementsystem. Dissertation an der Technischen Universität München; <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1192271>, München 2015
- K. Darcovich, E. Entchev, I. Beausoleil-Morrison, N. Kelly, P. Tzscheutschler, et al.: An International Survey of Electrical and DHW Load Profiles for Use in Simulating the Performance of Residential Micro-Cogeneration Systems. [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/docs/Annex/EBC\\_Annex\\_54\\_DHW\\_Electrical\\_Load\\_Profile\\_Survey.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/docs/Annex/EBC_Annex_54_DHW_Electrical_Load_Profile_Survey.pdf), IEA-EBC, 2014
- K. Darcovich, P. Tzscheutschler, E. Entchev, I. Beausoleil-Morrison, N. Kelly, et al.: Current Updates on the Development and Implementation of Micro-Cogeneration System Models for Building Simulation Programs. [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/docs/Annex/EBC\\_Annex\\_54\\_Micro-Generation\\_System\\_Models.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/docs/Annex/EBC_Annex_54_Micro-Generation_System_Models.pdf), IEA-EBC, 2014

- E. Entchev, P. Tzscheutschler, K. Darcovich, M. Sasso, A. Hawkes, et al.: Integration of Microgeneration and Related Technologies in Buildings – Final Report of Annex 54. [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/docs/Annex/EBC\\_Annex\\_54\\_Micro-Generation\\_Integration\\_Final\\_Report.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/docs/Annex/EBC_Annex_54_Micro-Generation_Integration_Final_Report.pdf), IEA-EBC, 2014
- A. Hawkes, C. Brandoni, P. Tzscheutschler, et al.: Impact of Support Mechanisms on Microgeneration Performance in OECD Countries. [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/docs/Annex/EBC\\_Annex\\_54\\_Micro-Generation\\_Support\\_Mechanisms.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/docs/Annex/EBC_Annex_54_Micro-Generation_Support_Mechanisms.pdf), IEA-EBC, 2014
- A. Hawkes, C. Brandoni, P. Tzscheutschler, et al.: A Comparative Review of Microgeneration Policy Instruments in OECD Countries. [http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user\\_upload/docs/Annex/EBC\\_Annex\\_54\\_Micro-Generation\\_Policy\\_Instruments.pdf](http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/docs/Annex/EBC_Annex_54_Micro-Generation_Policy_Instruments.pdf), IEA-EBC, 2014
- P. Tzscheutschler, W. El-Baz: Smart Home Model Based on Interactive DSM Devices within a Micro Electricity Market. BauSIM 2014; <http://bausim2014.ibpsa-germany.org>; Aachen; 22.–24. September 2014
- M. Windeknecht, P. Tzscheutschler: Simulation der Abwärmenutzung eines Hochtemperatur Brennstoffzellen-Systems in einem Einfamilienhaus. BauSIM 2014; <http://bausim2014.ibpsa-germany.org>; Aachen; 22.–24. September 2014
- W. El-Baz, Peter Tzscheutschler: Co-simulation of a smart home model based on a micro electricity market. BauSIM 2014; <http://bausim2014.ibpsa-germany.org>; Aachen; 22.–24. September 2014
- G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso, P. Tzscheutschler: Experimental Assessment of Energy Performance and Emissions of a Residential Microco-generator. in: Studies in Engineering and Technology, Vol. 1, No. 2; ISSN 2330-2038; Published by Redfame Publishing URL: <http://set.redfame.com>; August 2014
- W. El-Baz, P. Tzscheutschler: Short-term smart learning electrical load prediction algorithm for home energy management systems. Applied Energy, Vol. 147, 1 June 2015, Pages 10–19; doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.122
- P. Tzscheutschler: Experiences from Field Testing of Stirling Micro-CHP Systems. CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress & 8th International Conference IAQVEC, 17–19 June, Prague, Czech Republic
- P. Tzscheutschler, E. Entchev: Micro-Generations in Buildings. In EBC Newsletter June 2013; ISSN 1754-0585, [www.iea-ebc.org](http://www.iea-ebc.org)

- W. El-Baz, P. Tzscheutschler:  
Increasing Data Resolution through Harmonics Additions and its Effect on Micro-CHP Economics. 3<sup>rd</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 15–17 April 2013, Naples, Italy
- P. Tzscheutschler:  
Potential of Micro-CHP in small Business Sector in Germany. 3<sup>rd</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 15–17 April 2013, Naples, Italy
- P. Tzscheutschler, E. Entchev:  
Micro-Generation and Related Technologies in Buildings; in ECBCS News December 2011 – Issue 54; ISSN 1023-5795

### Vorträge

- F. Sanger:  
Development of a Demand Side Management System: Evaluation of a Multi Zone Building Model with Realistic Heating System. The 4<sup>th</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 28–30 October 2015; Tokyo, Japan
- W. El-Baz:  
Hardware in the Loop for Micro CHP Systems. The 4<sup>th</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 28–30 October 2015; Tokyo, Japan
- M. Windeknecht:  
Increasing Electricity Selfconsumption of Micro CHP-Systems with Electrically driven Heater. The 4<sup>th</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 28–30 October 2015; Tokyo, Japan
- M. Windeknecht:  
Optimization of the Heat Output of High Temperature Fuel Cell Micro-CHP in Single Family homes. The 6<sup>th</sup> International Building Physics Conference IBPC 2015; June, 15–17 2015; Turin, Italy
- P. Tzscheutschler:  
Integration of Microgeneration and related Technologies in Buildings. EBC Technical Day, 17.06.2015, Lisbon, Portugal
- P. Tzscheutschler:  
Optimierung von Mikro-KWK-Systemen. Verbundtreffen EnEff: Wärme – Thermische/elektrische KWK-Vernetzung; Jülich 24.04.2015
- P. Tzscheutschler:  
Optimierung des Betriebs von Mikro-KWK-Systemen. 8. Projektleiter Meeting Eneff.Stadt; Wüstenrot 25.–26.11.2014

- P. Tzscheutschler:  
Optimierung des Betriebs von kleinen KWK-Systemen durch Wärmespeicher. 8. Fachtagung Mini- und Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung; Augsburg 10.10.2014
- W. El-Baz:  
Co-simulation of a smart home model based on a micro electricity market. BauSIM 2014; <http://bausim2014.ibpsa-germany.org>; Aachen, 22.–24. September 2014
- P. Tzscheutschler:  
Optimierung des Betriebs von kleinen KWK-Systemen durch Wärmespeicher. Mini-KWK Kongress 2014, Hannover; 24.06.2014
- P. Tzscheutschler:  
Integration of Micro-Generation in Buildings – Annex 54. EBC Technical Day, Warnemünde; 10. Juni 2014
- P. Tzscheutschler:  
Optimierung von Mikro-KWK Systemen. Eneff-Wärme Status Seminar, Köln, 7./8. Mai 2014
- P. Tzscheutschler:  
Field Test Experiences with Micro-CHP Systems. Workshop: Energy Efficiency with Cogeneration (CHP) on Building Level. CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress & 8th International Conference IAQVEC, 17–19 June, Prague, Czech Republic
- P. Tzscheutschler:  
Experiences from Field Testing of Stirling Micro-CHP Systems. CLIMA 2013: 11th REHVA World Congress & 8th International Conference IAQVEC, 17–19 June, Prague, Czech Republic
- W. El-Baz:  
Increasing Data Resolution through Harmonics Additions and its Effect on Micro-CHP Economics. 3<sup>rd</sup> International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 15–17 April 2013, Naples, Italy
- Peter Tzscheutschler:  
Potential of Micro-CHP in small Business Sector in Germany. 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 15–17 April 2013, Naples, Italy
- Peter Tzscheutschler:  
Integration of Micro-Generation and related Technologies in Buildings – Activities of IEA/ECBCS Annex 54. 3rd International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 15–17 April 2013, Naples, Italy
- Peter Tzscheutschler:  
Integration of Micro-Generation and Related Technologies in Buildings. 3rd status report of ECBCS Annex 54; ECBCS Executive Committee Meeting 17th November 2011, Beijing, China

### A.3 Quellen

- [AEG12] AEG Haustechnik:  
EHT Haustechnik GmbH / Markenvertrieb AEG. [www.aeg-haustech-nik.de/aeg\\_shared/pdf/data/A\\_6843\\_0\\_de\\_German.pdf](http://www.aeg-haustech-nik.de/aeg_shared/pdf/data/A_6843_0_de_German.pdf). [Zugriff am 25.09.2013]
- [Annex42 ] I. Beausoleil-Morrison, V. Dorer, N. Kelly, I. Knight, P. Tzscheuschler, et al.:  
An experimental and Simulation-Based Investigation of the Performance of Small-Scale Fuel cell and Combustion-Based Cogeneration Devices Serving Residential Buildings. Final Report of Annex 42 of the International Energy Agency's Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme. ISBN No. 978-0-662-47923-9; Canada 2008
- [Beer11] M. Beer:  
Wärmespeicher – Mehr Freiheitsgrade für KWK. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., München, 2011
- [Benn98] M. Benner, B. Mahler, D. Mangold, T. Schmidt, M. Schulz und H. Seiwald:  
Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher – Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik an der Universität Stuttgart, Stuttgart, 1998
- [Blue15] N.N.:  
BlueGen – Technische Daten. <http://www.bluegen.de/de/produkte/bluegen/bluegen-technologie/technische-daten>. [Zugriff am 13.04.2015]
- [BNet12] Bundesnetzagentur:  
Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur und Veröffentlichung Zu- und Rückbau (Stand: 09.11.2012). [www.bundesnetzagentur.de/clin\\_1932/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/Sonderthemen/Kraftwerksliste/VeroeffKraftwerksliste\\_node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/clin_1932/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetGas/Sonderthemen/Kraftwerksliste/VeroeffKraftwerksliste_node.html). [Zugriff am 22.11.2012]
- [CARM13] C.A.R.M.E.N. e. V.:  
Kostenvergleich verschiedener Heizsysteme (Stand 20.06.2012). [www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/haeusliche-feuerstaetten/kostenvergleich/380-kostenvergleich-verschiedener-heizsysteme](http://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/haeusliche-feuerstaetten/kostenvergleich/380-kostenvergleich-verschiedener-heizsysteme). [Zugriff am 17.10.2013]
- [Dief02] N. Diefenbach, T. Loga, R. Born, M. Großklos und C. Herbert:  
Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand. Darmstadt, 2002
- [DVGW04] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V.:  
DVGW-Arbeitsblatt W 551 "Trinkwassererwärmungs- und Trinkwasserleitungsanlagen; Technische Maßnahmen zur Verminderung des Legionellenwachstums; Planung, Errichtung, Betrieb und Sanierung von Trinkwasser-Installationen". April 2004
- [EIBa13] W. El-Baz:  
Modeling and Simulation of a Smart Home with a Micro Co-generation System.

- Master's Thesis, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, 2013
- [EIBa14] W. El-Baz W., P. Tzscheutschler:  
Co-Simulation of a Smart Home Model Based on a Micro Electricity Market; BauSIM 2014 – Gebäude für Menschen; 22.–24. September 2014; [http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1109\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1109_final.pdf); Aachen 2014
- [EIBa15] W. El-Baz, F. Sängler, P. Tzscheutschler:  
Hardware in the Loop for Micro CHP Systems. The 4th International Conference on Microgeneration and Related Technologies; 28–30 October 2015; Tokyo, Japan
- [Fisch05] N. Fisch, M. Bodmann, L. Kühl, C. Saße und H. Schnürer:  
Wärmespeicher. 4. erweiterte und völlig überarbeitete Auflage Hrsg., BINE Informationsdienst, 2005
- [FNR10] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR):  
Marktübersicht Hackschnitzel-Heizungen. Gülzow, 2010
- [Frei11] A. Frei, H. Kaumeier, H. Kiefer, W. Nowak, G. Radlinger, K. Wegner, U. Wenge, J. Arthkamp, B. Oschatz, B. Mailach und B. Winiewska:  
Ratgeber Wärmeversorgung – mit Kostenvergleich Heizung 2011 Neubau/Grundsanierung. ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V., Berlin, 2011
- [Hau13] A. Hauer, S. Hiebler und M. Reuß:  
Wärmespeicher. 5. vollständig überarbeitete Auflage Hrsg., Bd. BINE Fachbuch, F. K. BINE Informationsdienst, 2013
- [Hei15] C. Heilek:  
Modellgestützte Optimierung des Neubaus und Einsatzes von Erzeugungsanlagen und Speichern für elektrische und thermische Energie im deutschen Energiesystem. Dissertation an der Technischen Universität München; 2015; <http://media-tum.ub.tum.de/?id=1230817>, München, 2015
- [Horn07] M. Horn, H.-J. Ziesing, F. C. Matthes, R. Harthan und G. Menzler:  
Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten (Verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung). Umweltbundesamt, Dessau, 2007
- [Jahn09] K. Jahn, W. Schulz, G. Frey, S. Klinski und H.-P. Schettler-Köhler:  
Gutachten zur Außerbetriebnahme von elektrischen Nachtspeicherheizungen (Endbericht); BBSR-Online-Publikation 20/2009 um:nbn:de:0093-ON2009R2299, Berlin, Bremen, Saarbrücken, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR); 2009
- [KKH12] P. Kuhn, M. Kühne und C. Heilek:

Integration und Bewertung erzeuger- und verbraucherseitiger Energiespeicher. Verbundprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative Kraftwerke des 21. Jahrhunderts (KW21) Phase II, Teilprojekt BY 1E. <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1115629/1115629.pdf>. [Zugriff am 21.09.2012]

- [Kras13] J. Krassowski:  
Wärmesenken und Einsatzmöglichkeiten von Biomethan-BHKWs – Fachgespräch "Biomethan in KWK". Berlin, 19.06.2013. [www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/KWK/Vortrag\\_UMSICHT\\_W%C3%A4rmesenken.pdf](http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/KWK/Vortrag_UMSICHT_W%C3%A4rmesenken.pdf). [Zugriff am 02.12.2013]
- [Kuhn12] P. Kuhn:  
Iteratives Modell zur Optimierung von Speicherausbau und -betrieb in einem Stromsystem mit zunehmend fluktuierender Erzeugung. Dissertation an der Technischen Universität München, München, 2012
- [Lang11] O. Langniß, T. Kohberg, H.-F. Wülbeck, M. Nast, M. Pehnt, S. Frick, H. Drück und E. Streicher:  
Evaluierung des Marktanzreizprogramms für erneuerbare Energien: Ergebnisse der Förderung für das Jahr 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart, Berlin, Dezember 2011
- [Lipp13] J. Lipp, F. Sänger:  
Potential of Power Shifting Using Micro-CHP Units and Heat Storages. 3rd international Conference on Microgeneration; Naples, Italy; April 2013
- [Lipp15] J. Lipp:  
Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen – Experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten einer flexiblen Stromerzeugung von Mikro-KWK-Anlagen mit Hilfe einer Wärmebedarfsprognose und einem intelligenten Speichermanagementsystem. Dissertation an der Technischen Universität München; <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1192271>, München, 2015
- [Müh07] Mühlbacher, Helmut:  
Verbrauchsverhalten von Wärmeerzeugern bei dynamischen variierten Lasten und Übertragungskomponenten. Dissertation an der Technischen Universität München; <https://mediatum.ub.tum.de/doc/622179/622179.pdf>; München, 2007
- [Mus14] F. Musiol, P. Bickel, T. Nieder, T. Rüter, U. Zimmer, M. Memmler, K. Merkel, S. Rother und S. Schneider:  
Internet-Update ausgewählter Daten zur Broschüre Erneuerbare Energien in Zahlen auf der Grundlage der Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (A-GEE-Stat). 21.01.2014. [www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/Daten\\_EE/Dokumente\\_PDFs/ee\\_in\\_zahlen\\_update\\_bf.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/Daten_EE/Dokumente_PDFs/ee_in_zahlen_update_bf.pdf). [Zugriff am 25.02.2014]
- [Nast09] M. Nast, U. Lehr, S. Klinski, V. Bürger, U. Leprich, U. Klann, J. Horst, M. Ragwitz und W. Schulz:

Ergänzende Untersuchungen und vertiefende Analysen zu möglichen Ausgestaltungsvarianten eines Wärmegesetzes – Endbericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., FH für Wirtschaft Berlin, Öko-Institut e. V., Institut für ZukunftsEnergieSysteme, Fraunhofer ISI, Bremer Energie Institut, Stuttgart, Berlin, Freiburg, Saarbrücken, Karlsruhe, Bremen, Juli 2009

- [Nit10] J. Nitsch, T. Pregger, Y. Scholz, T. Naegler, M. Sterner, N. Gerhardt, A. von Oehsen, C. Pape, Y.-M. Saint-Drenan und B. Wenzel:  
Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global "Leitstudie 2010" – Datenanhang II. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES); In-genieurbüro für neue Energien (IFNE), Stuttgart, Kassel, Teltow, 17.12.2010
- [Nit12] J. Nitsch, T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. L. de Tena, F. Trieb, Y. Scholz, K. Nienhaus, N. Gerhardt, M. Sterner, T. Trost, A. von Oehsen, R. Schwinn, C. Pape und B. Wenzel:  
Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Stuttgart, Kassel, Teltow, 29.03.2012
- [Raab05] S. Raab, T. Schmidt, M. Benner, W. Heidemann und H. Müller-Steinhagen:  
Saisonale Wärmespeicher – aktuelle Speichertechnologien und Entwicklungen bei Heißwasser-Wärmespeichern. Oberflächennahe Geothermie, 14.–15. April 2005, Regenstauf; Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) an der Universität Stuttgart; Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT); Institut für Technische Thermodynamik (ITT) am DLR Stuttgart, Regenstauf, 2005
- [Säng13] F. Sängler, J. Lipp:  
Computational Selection of dynamic Type Days for test bed experiments based on field measurements. MICRoGEN III. 3rd International Conference in Microgeneration and Related Technologies in Buildings. Naples, Italy 2013
- [Somm14] K. Sommer, E. Mesenhöller:  
SOFC-Brennstoffzelle für gebäudebezogene Kraft-Wärme-Kopplung. BTGA Almanach 2014; <http://www.btga.de/almanach/2014/026-031.pdf>; 2014
- [Stad05] I. Stadler:  
Demand Response – Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Habilitation eingereicht beim Fachbereich Elektrotechnik der Universität Kassel, Kassel: dissertation.de – Verlag im Internet GmbH, 2005
- [Tzsch14] P. Tzschentschler, W. El-Baz:  
Smart Home Model Based on Interactive DSM Devices within a Micro Electricity.

BauSIM 2014 – Gebäude für Menschen; 22.–24. September 2014;  
[http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1113\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1113_final.pdf); Aachen  
2014

- [UBA12] Umweltbundesamt:  
Kraftwerke in Deutschland (ab 100 Megawatt elektrischer Leistung). [www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kid.php](http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/kid.php). [Zugriff am 24.08.2012]
- [VDI4655] VDI-Richtlinie 4655:  
Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen. Verein Deutscher Ingenieure, 2008
- [Vis15] N.N.:  
VITOTWIN 300-W Datenblatt. Viessmann Werke GmbH & Co KG; Allendorf 2011
- [Wild12] T. Wild:  
Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandes für Mikro-KWK-Anlagen. Diplomarbeit am TUM Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik; München, 2012
- [Wind14] M. Windeknecht, P. Tzscheutschler:  
Simulation der Wärmenutzung eines Brennstoffzellen-Systems in einem EFH;  
BauSIM 2014 – Gebäude für Menschen; 22.–24. September 2014;  
[www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1204\\_final.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1204_final.pdf); Aachen 2014
- [Wün11] M. Wünsch, F. Seefeldt, S. Mellahn, V. Rits, A. Piégusa, A. Wetzel, L. Dittmann:  
Zwischenüberprüfung zum Gesetz zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung. Prognos AG, Berliner Energieagentur GmbH; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin, Basel, 2011
- [Wün11a] M. Wünsch, N. Thamling, F. Peter und F. Seefeldt:  
Beitrag von Wärmespeichern zur Integration erneuerbarer Energien. Prognos AG, Berlin, 19.12.2011
- [ZfK13] AL: Windstrom zu Fernwärme. ZfK – Zeitung für kommunale Wirtschaft; März 2013, p. 18, 2013