



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

## **Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen**

**Experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten einer flexiblen Stromerzeugung  
von Mikro-KWK-Anlagen mit Hilfe einer Wärmebedarfsprognose und einem  
intelligenten Speichersystem**

Josef Peter Lipp

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

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende(r): Univ.-Prof. Dr.-Ing. J.S. Kindersberger

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Th. Hamacher
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr. h. c. G. Hausladen (i. R.)

Die Dissertation wurde am 21.02.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 02.01.2015  
angenommen.



## **Kurzzusammenfassung**

Die Arbeit realisiert eine flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen. Hierfür wird eine intelligente Speichereinsatzplanung unter Zuhilfenahme einer Wärmebedarfsprognose umgesetzt. Letztere fließt gemeinsam mit den auf experimentellen und analytischen Ergebnissen beruhenden neu definierten Speichergrenzen und den EEX-Börsenstrompreisen in einen Optimierungsalgorithmus ein, dessen Zielgröße die Maximierung der generierbaren Erlöse ist. Somit kann sichergestellt werden, dass Strom genau zu den Zeiten erzeugt wird, wenn die Nachfrage am höchsten ist.

Für die Umsetzung am eigens aufgebauten Mikro-KWK-Prüfstand wird ein BHKW-Fahrplan für den jeweiligen Folgetag inklusive Speichereinsatzplan erstellt. Zu dessen Einhaltung wird eine intelligente Regelung programmiert, so dass im Zusammenwirken mit dem nun flexibilisierten Speicher der Wärmeverbrauch auch bei Prognoseabweichungen jederzeit gedeckt und gleichzeitig bedarfsorientiert, sprich zu Zeiten hoher EEX-Preise, Strom erzeugt werden kann.

**Schlagwörter: Mikro-KWK, flexible Stromerzeugung, thermische Speicher, Wärmebedarfsprognose**

## **Abstract**

A flexible power generation through micro-CHP systems was realized in this thesis. To this end, a smart heat storage schedule including a heat demand forecast was implemented. A newly defined heat storage capacity, based on experimental and analytical results, was combined with a heat forecast and the electricity spot market (EEX) price in an optimization algorithm to maximize economic profits. Consequently, it can be guaranteed that power is generated at times of peak demand.

A micro-CHP test bed was built to test the optimization results, containing a scheduled CHP operation and the aforementioned heat-storage schedule. In order to keep the schedule, a smart CHP control was programmed. In conjunction with the flexible heat storage, the heat consumption can be met at any time, even when forecast deviations occur. At the same time, electricity is generated as needed, namely during times of high spot market prices.

**Keywords: Micro-CHP, flexible power generation, thermal heat storage, heat demand forecast**

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München, einer Zeit in der ich viele Erfahrungen sammeln durfte und die ich keinesfalls missen möchte. Daher ist es mir ein besonderes Anliegen, mich an dieser Stelle bei allen zu bedanken, die mich die letzten Jahre während meiner Promotion begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. rer. nat. Thomas Hamacher für die wertvollen Anregungen, die stete Unterstützung, die konstruktive Kritik und die gewährte Forschungsfreiheit im Hinblick auf die Umsetzung meiner Ideen. Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen danke ich für seine Bereitschaft das Zweitgutachten zu erstellen und Herrn Professor Dr.-Ing. Josef Kindersberger gilt mein Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Vielfacher Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen, die in zahlreichen Diskussionen und Gesprächen zum Gelingen der Arbeit wesentlich beigetragen haben und mir bereichernde Einblicke in viele benachbarte Themenbereiche ermöglichten. Besonders dankbar bin ich für die wertvollen Beiträge von Herrn Andreas Werthmüller und Herrn Guido Hilgers bei der Realisierung des experimentellen Teils dieser Arbeit und grundlegend im Rahmen meiner Lehrstuhl­tätigkeit. Hervorheben möchte ich Peter Tzscheutschler, Urs Wehmhörner, Isabell Nemeth, Milica Grahovac, Johannes Jungwirth und Florian Sänger, die mir jederzeit bei Fragen zur Verfügung standen und mich in vielerlei Hinsicht unterstützt haben.

Ganz besonderer Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden. Meinen Eltern Josef und Petra Lipp danke ich insbesondere für die Möglichkeiten, welche sie mir von klein auf eröffnet haben, und das in mich gesetzte Vertrauen. Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Freundin Michaela für ihre Geduld, dafür, dass sie mich nimmt wie ich bin, und für ihre Mithilfe an dieser Arbeit.

München, im Februar 2014

Josef Lipp

## Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung.....	I
Danksagung .....	II
Inhaltsverzeichnis .....	III
Formelzeichen .....	VII
Indizes.....	VIII
Abkürzungen .....	IX
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Einordnung der Arbeit in den energiewirtschaftlichen Kontext.....	1
1.2 Problemstellung und Ziel der Arbeit.....	4
1.3 Stand der Forschung .....	7
1.3.1 Verknüpfung von Wärme-Strom: Power to Heat.....	7
1.3.2 Flexible KWK-Anlagen und Einbindung in virtuelle Kraftwerke .....	8
1.3.3 Variable Vergütung und Strompreise.....	10
1.4 Herangehensweise und Aufbau der Arbeit.....	11
<b>2. Klein- und Kleinst-KWK-Anlagen zur Gebäudeenergieversorgung: Grundlagen.....</b>	<b>15</b>
2.1 Klassifizierung, Verbreitung und Potenzial .....	16
2.2 Mikro-KWK-Technologien .....	19
2.2.1 Verbrennungsmotor .....	19
2.2.2 Stirlingmotor.....	20
2.2.3 Brennstoffzelle .....	23
2.2.4 Zwischenbilanz zu den Mikro-KWK-Technologien .....	24
2.3 Ökologie und Ökonomie .....	24
2.3.1 Effizienz .....	24
2.3.2 Schadstoffemissionen .....	28
2.3.3 Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Anlagen.....	30
2.4 Wärmespeicherung.....	32
2.4.1 Warmwasserspeicher .....	33
2.4.2 Pufferspeicher mit Warmwasserspeicher .....	33
2.4.3 Pufferspeicher mit Frischwasserstation .....	34
2.4.4 Kombispeicher .....	35

2.5	Regelungsstrategien.....	36
2.5.1	Wärmegeführter Betrieb.....	36
2.5.2	Stromgeführter Betrieb.....	37
2.5.3	Mischbetrieb.....	38
2.6	Dimensionierung von Kleinst-KWK-Anlagen, Spitzenlastkesseln und Speichern.....	38
<b>3.</b>	<b>Untersuchungsobjekte und BHKW-Standardbetrieb.....</b>	<b>41</b>
3.1	Mikro-KWK-Feldtest Miesbach .....	42
3.1.1	Viessmann Vitotwin Mikro-BHKW.....	42
3.1.2	Wärmeverbrauch, Wärmeerzeugung und Stromerzeugung im Jahresüberblick.....	44
3.1.3	Typtaganalysen zu Heizkreisverbrauch, BHKW-Betrieb und Warmwasserverbrauch .....	47
3.1.4	Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch und Außentemperatur.....	51
3.1.5	Zusammenfassung Miesbach Feldtest .....	53
3.2	Mikro-KWK-Prüfstand .....	54
3.2.1	Prüfstands Aufbau .....	55
3.2.2	Whispergen Mikro-BHKW.....	57
3.2.3	Speicher .....	59
3.2.4	Messtechnik.....	60
3.2.5	Genauigkeitsabschätzung.....	61
3.2.6	Datengrundlage: Gebäude und Wärmeverbräuche.....	63
3.2.7	Steuerung des Prüfstands.....	67
3.3	Betriebsverhalten des Whispergen BHKW.....	68
3.3.1	Dynamisches Verhalten des Whispergen BHKW.....	69
3.3.2	Whispergen BHKW-Regelung .....	77
3.4	Typtaganalyse.....	80
3.5	Kriterien für ein verbessertes Betriebsverhalten von Mikro-KWK-Systemen .....	88
<b>4.</b>	<b>Speicher in Mikro-KWK-Systemen .....</b>	<b>91</b>
4.1	Temperaturverlauf im Speicher .....	91
4.1.1	Speicherbeladung .....	93
4.1.2	Speicherentladung.....	95
4.1.3	Zeitgleiches Laden und Entladen.....	100

---

4.2	Speicherinhalt und Speicherkapazität .....	103
4.3	Speicherinhalt während verschiedener Betriebszustände .....	105
4.4	Speicheranalyse im Feldtest .....	109
4.5	Speicheranalyse an den Typtagen .....	111
<b>5.</b>	<b>Eingangsparameter für die flexible Stromerzeugung .....</b>	<b>115</b>
5.1	Börsenstrompreis.....	115
5.1.1	Strombörse .....	116
5.1.2	Struktur des EEX-Preises.....	116
5.1.3	Repräsentativer EEX-Börsenpreis.....	118
5.1.4	Charakteristik der Stromerzeugung aus Mikro-KWK-Anlagen .....	119
5.1.5	Zwischenbilanz: Mikro-BHKW Stromerzeugung und Börsenstrompreise.....	125
5.2	Wärmebedarfsprognose .....	125
5.3	Speicherkapazität.....	133
<b>6.</b>	<b>BHKW-Einsatzplanung und Regelung .....</b>	<b>135</b>
6.1	BHKW- und Speicher-Einsatzplanung .....	135
6.1.1	Szenario 1: $E_{Sp,Start} = E_{Sp,Ende}$ .....	137
6.1.2	Szenario 2: $E_{Sp,Start}$ variabel.....	141
6.1.3	Szenario 3: Fahrplan unter Berücksichtigung des Folgetags.....	146
6.2	Intelligente BHKW-Regelung.....	148
6.2.1	Aufgaben der BHKW-Regelung.....	148
6.2.2	Einhaltung des Sollfahrplans bei Abweichungen .....	149
6.2.3	Verletzung der Speichergrenzen .....	150
6.3	BHKW-Stromproduktion bei Prognoseabweichungen.....	151
6.3.1	Veränderte BHKW-Stromproduktion bei Amplituden-Prognoseabweichungen .....	151
6.3.2	Veränderte BHKW Stromproduktion bei Zeitprognosefehlern.....	155
<b>7.</b>	<b>Messergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>159</b>
7.1	Messergebnisse der Szenarien 1 und 2.....	159
7.2	Messergebnisse bei Prognoseabweichungen .....	166
7.2.1	Amplitudenfehler .....	166
7.2.2	Zeitfehler .....	173
7.2.3	Zusammenfassung der Messergebnisse.....	175

7.3 Ergebnis und Diskussion.....	177
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>181</b>
<b>A. Anhang.....</b>	<b>A-1</b>
A.1 Ergänzende Abbildungen .....	A-1
A.2 Ergänzende Tabellen .....	A-7
A.3 Abbildungsverzeichnis.....	A-11
A.4 Tabellenverzeichnis.....	A-16
<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>A-18</b>

## Formelzeichen

$c$	[kWh/(kg K)]	Wärmekapazität
$\dot{E}$	[kWh/h]	(Speicher-)Leistung
$E$	[kWh]	(Speicher-)Energie
$g$	[%]	Nutzungsgrad
$H$	[m]	Höhe
$H_{i,n}$	[kWh/m <sup>3</sup> ]	Heizwert
$K$	[€ oder €ct]	Kosten
$\lambda$	[-]	Verbrennungsluftverhältnis
$m$	[-]	Geradensteigung
$\eta$	[%]	Wirkungsgrad
$p$	[mbar]	Druck
$P$	[kW]	Leistung
$\dot{Q}$	[kW]	thermische Leistung
$Q$	[kWh]	Wärmeenergie
$r$	[-]	Korrelationskoeffizient
$S$	[J/K]	Entropie
$\sigma$	[-]	Stromkennzahl
$t$	[-]	Achsenabschnitt
$\Delta t$	[h]	Schrittweite
$T$	[°C]	Temperatur
$\tau$	[h]	Zeitkonstante
$V$	[l]	Volumen
$\dot{V}$	[l/s]	Durchfluss
$W$	[kWh]	Arbeit, Energie

**Indizes**

A	Außentemperatur
d	Tag
el	Elektrisch
EV	Eigenverbrauch
ges	gesamt
h	stündlich
i	Laufvariable
in	in (engl. zugeführt)
Kap	Kapazität
l	Luft
max	Maximalwert
min	Minimalwert
n	Normbedingung
nM	nach Mischer
RL	Rücklauf
S	Straf-
Sp	Speicher
th	thermisch
theo	theoretisch
U	Umgebung
V	Verlust(e)
VL	Vorlauf
vM	vor Mischer
W	Wärme
WLU	Wirkleistungsumformer
WW	Warmwasser
ZK	Zirkulation
Zst	Zapfstelle

---

## Abkürzungen

AK	Arbeitskolben
Bh	Betriebsstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSZ	Brennstoffzelle
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DSM	Demand Side Management
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
ESRE	Energiesteuerrückerstattung
FWS	Frischwasserstationen
GuD	Gas- und Dampf
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GT	Gasturbine
H <sub>2</sub> O	Wasser
HT	Hochtemperatur
HKW	Heizkraftwerk
IfE	Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
JDL	Jahresdauerlinie
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MID	magnetisch-induktives Durchflussmessgerät
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
NT	Niedertemperatur
PEE	Primärenergieeinsparung
PEFC	<u>P</u> olymer <u>E</u> lectrolyte <u>F</u> uel <u>C</u> ell, Polymerelektrolytbrennstoffzelle
PV	Photovoltaik
SLK	Spitzenlastkessel
SOFC	<u>S</u> olid <u>O</u> xide <u>F</u> uel <u>C</u> ell, Festoxidbrennstoffzelle

vK	virtuelles Kraftwerk
VK	Verdrängerkolben
vNNE	vermiedenes Netznutzungsentgelt
WW	Warmwasser
ZHG	Zusatzheizgerät
ZK	Zirkulation

## 1. Einleitung

Der Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien-Anlagen und die daraus resultierenden Entwicklungen auf dem Strommarkt lassen eine Flexibilisierung des Stromsystems erforderlich erscheinen. Ziel muss es sein, dass nicht mehr nur das Stromangebot der Nachfrage folgt, sondern das Erzeuger, Speicher und Verbraucher so zusammenwirken, dass die sogenannte Residuallast, die sich aus der Differenz von Stromnachfrage und dem Angebot aus EE-Anlagen ergibt, geglättet und kostenoptimal gedeckt werden kann.

Wie schon beim Ausgleich von Stromnachfrageschwankungen geraten hierfür drei Möglichkeiten in den Blick: der Ausbau von Speichern, ein gezieltes Nachfragemanagement sowie die Flexibilisierung der Stromerzeugung selbst. Die vorliegende Arbeit fokussiert auf die zuletzt genannte Möglichkeit. Diese verbürgt große Potenziale, allerdings weniger im Hinblick auf die prinzipiell in Frage kommenden konventionellen flexiblen Stromerzeuger oder Groß-KWK-Anlagen, da diese nicht als Brückentechnologien infrage kommen und weitere Nachteile mit sich bringen (vgl. Kap. 1.1); stattdessen werden in dieser Arbeit kleine, oder genauer: Mikro-KWK-Anlagen als aussichtsreiche Kandidaten für eine Flexibilisierung der Stromerzeugung vorgestellt.

Wie nach der anschließenden Erläuterung (Kap. 1.1) der bislang nur angedeuteten Zusammenhänge zwischen Stromerzeugung, -nachfrage und Strommarkt näher auszuführen sein wird, müssen jedoch zunächst bestehende Probleme gelöst werden, damit Mikro-KWK-Anlagen die formulierten Erwartungen auch tatsächlich einlösen können: Als problematisch stellen sich aktuell insbesondere die eingesetzten BHKW-Regelungen dar, da diese unflexibel und weder (strom-)bedarfs- noch richtig wärmenachfrageorientiert arbeiten (Kap. 1.2). Behoben werden kann dieses Problem über eine gesteuerte Entkopplung von Stromproduktion und Wärmenachfrage. Ziel dieser Arbeit ist dann die Entwicklung eines alternativen Speichermanagementsystems, welches etwa Wärmeprognosen und den aktuellen Wärmeverbrauch berücksichtigt. Auf die ausführliche Darstellung des Ziels dieser Arbeit folgt eine Verortung des Projektes im aktuellen Stand der Forschung (Kap. 1.3) sowie die Skizzierung des Aufbaus der nachfolgenden Argumentation (Kap. 1.4).

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, eine flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen zu ermöglichen. Notwendig hierfür erscheinen eine intelligente Speichereinsatzplanung sowie die Erstellung einer in eine optimierte Steuerung einzubeziehenden Wärmebedarfsprognose. Ausgehend von Feldtest- und Prüfstandsmessungen konnte ein Optimierungsalgorithmus bestimmt werden, dessen intelligente Umsetzung mittels eines eigens entwickelten Regelungsprogramms in der Prüfstandsanordnung bereits erfolgreich gewährleistet werden konnte.

### 1.1 Einordnung der Arbeit in den energiewirtschaftlichen Kontext

Am Sonntag den 16. Juni 2013 machte die Stromproduktion aus Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen erstmals mehr als 60 % der gesamten Stromerzeugung in Deutschland aus [ZFK 13-a]. Aufgrund des in den vergangenen Jahren zu beobachtenden und auch in Zukunft zu erwartenden rasanten Ausbaus der

Stromerzeuger aus erneuerbaren Energien (EE) werden Rekorde dieser Art nicht nur häufiger auftreten, sondern auch die 60 %-Marke wird deutlich überschritten werden.

Das steigende und zugleich stark fluktuierende Stromangebot aus EE-Anlagen, welches Grenzkosten von 0 € aufweist, hinterlässt auch an der Strombörse immer häufiger und ausgeprägter seine Spuren: Die Peak-Preise nähern sich den Base-Preisen, einzelne Stundenwerte können negativ werden. Neben der Zunahme solcher „Turbulenzen“ an der Börse lässt sich grundlegender ein Preisverfall, insbesondere der Wegfall der vormaligen Peak-Preise, beobachten.

Diese Entwicklungen haben tiefgreifende Konsequenzen für die konventionellen Stromerzeuger: Beispielsweise werden Gasspitzenlastkraftwerke durch die sogenannte Merit-Order aus dem Markt gedrängt und stehen still. Zudem verringert sich der Spread zwischen Hoch- und Tiefpreis so stark, dass auch die Erlöse der Pumpspeicherkraftwerke merklich zurückgehen. Nicht zuletzt sind trotz des Kernenergieausstiegs die Strompreise so stark gesunken, dass u.a. hocheffiziente Gas- und Dampf- (GuD) Kraftwerke nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden können. Eine Folge ist der Neubaustopp an konventioneller Erzeugungsleistung.

Etwas weniger dramatisch stellt sich die Situation dar, berücksichtigt man, dass es natürlich weiterhin viele bewölkte Tage mit wenig Wind gibt, an denen die Strompreisentwicklung an der Börse ihr vormaliges „normales Verhalten“ aufweist, da kaum zusätzliches Angebot aus der erneuerbaren Stromerzeugung vorhanden ist: Während nachts die Preise moderat sind, kommt es morgens und abends, wenn die Stromnachfrage am höchsten ist, zu Preisspitzen. Geantwortet wird auf diese vergleichsweise planbaren Stromnachfrageschwankungen mittels Speicherung, Nachfragemanagement und flexibler Stromproduktion: Erstens wurden Pumpspeicherkraftwerke gebaut, zweitens Nachtspeicherheizungen gefördert und Hoch-/Niedertarife eingeführt, um die nächtliche Stromnachfrage anzuheben; drittens wurde die flexible Stromproduktion über Grund-, Mittel- und Spitzenlastkraftwerke gewährleistet.

Mit dem Ausbau nicht-disponierbarer Stromerzeugung aus EE-Anlagen gehen inzwischen nicht nur Nachfrage- sondern auch Angebotsschwankungen einher. Entscheidende Größe zur Bestimmung des Strompreises ist in der Folge nicht mehr einzig die Nachfrage, sondern die sogenannte Residuallast, sprich die Differenz aus Stromnachfrage und dem Angebot aus EE-Anlagen. Die Herausforderung besteht damit nicht mehr nur in der schwankenden Nachfrage, sondern in der sehr viel stärker schwankenden Residuallast. Daraus folgt, dass die Flexibilität des Stromsystems immer bedeutsamer wird. Eine solche Flexibilisierung lässt sich wiederum über die drei bekannten Optionen erreichen: Entsprechend diskutiert und erforscht wird erstens die großtechnische Stromspeicherung, welche sich aber bislang als zu teuer und somit als nicht rentabel für mögliche Investoren darstellt. Ein Demand-Side-Management (DSM), sprich die Nachfrageorientierung am Angebot, ist ein zweiter vielversprechender Ansatzpunkt: Potenziale werden in der Industrie, im Sektor „Gewerbe, Handel und Dienstleistung“ (GHD) sowie im Haushaltssektor erkannt und in ersten Versuchen erschlossen. Drittens gibt es Fortschritte bei der Flexibilisierung der konventionellen Stromerzeugung zu verzeichnen, da die Lastgradienten in den letzten Jahren gesteigert werden konnten. Da der Neubau entsprechend flexibler, konventioneller Anlagen aber sehr teuer und der zu erzielende Strompreis niedrig ist, ist die Betrachtung von Alternativen lohnend, welche schon heute wirtschaftlich betrieben werden können. Hier stößt man quasi zwangsläufig auf Kraft-Wärme-Kopplung (KWK).

KWK-Systeme basieren auf dem Prinzip der gekoppelten und damit gleichzeitig stattfindenden Erzeugung von Strom und Wärme. Diese bieten, im Gegensatz zu den konventionellen flexiblen Stromerzeugern sowie den DSM-Maßnahmen, nicht nur die Möglichkeit, Strom (und Wärme) selbst zu produzieren oder stillzustehen; darüber hinaus können KWK-Anlagen überschüssigen Strom im Netz nachfragen, um diesen in Wärme (Power-to-Heat) umwandeln. Das heißt, KWK-Anlagen können sowohl einspringen und Strom erzeugen, wenn die Stromerzeugung aus EE-Anlagen gering ist, als auch bei Stromüberschuss nicht betrieben werden und sogar als Stromsenke dienen. Da heute eben nicht mehr nur Nachfrage-, sondern zugleich Angebotsschwankungen (und somit Residuallast-Extrema) begegnet werden muss, sind Anlagen, die sowohl Strom nachfragen als auch nach Bedarf (nicht) produzieren können, naheliegende und vielversprechende Optionen zur Flexibilisierung des Stromsystems.

Grundsätzlich gilt für alle KWK-Anlagen, dass diese aufgrund ihres höheren Gesamtwirkungsgrads CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen können (vgl. Kap. 2.3.1). Die meisten KWK-Anlagen können aufgrund des zusätzlichen Wärmeabsatzes und staatlicher Subventionen zudem schon heute wirtschaftlich betrieben werden. Da die Ausbaumöglichkeiten der Groß-KWK-Anlagen, sprich Heizkraftwerke mit großen Fernwärmenetzen, wegen des reduzierten Gebäudewärmebedarfs jedoch beschränkt sind, rücken kleinere-KWK-Anlagen in Industrie, Gewerbe und Privathaushalten in den Fokus zukünftiger Ausbaupläne.

In kleineren, dezentralen Anlagen erfolgt die Stromerzeugung nicht über Dampfprozesse, sondern in der Regel über verbrennungsmotorische Blockheizkraftwerke (BHKW), welche entscheidende Vorteile mit sich bringen: So können BHKW aufgrund ihrer Technologie innerhalb weniger Minuten auf Nennleistung gebracht werden. Auch das Herunterfahren dieser Anlagen erfolgt im Vergleich zu den thermischen Kraftwerken sehr schnell. Zudem sind die Teillastwirkungsgrade relativ hoch, was insbesondere für eine flexible Stromproduktion sehr wichtig ist. Aufgrund der Dezentralität der Anlagen entfallen darüber hinaus die Verluste im Wärme- und Stromnetz. Bei intelligenter Betriebsführung kann zusätzlich der durch den Anstieg der installierten Photovoltaik-Leistung notwendige Ausbau der Verteilnetze reduziert werden.

Nicht zu unterschätzen sind kleinere KWK-Anlagen als Brückentechnologie, da diese anders als konventionelle Kraftwerke aber auch Groß-KWK-Anlagen nicht auf lange Laufzeiten (>40 Jahre) ausgelegt sind und zudem aufgrund einer geringen Planungszeit bei Bedarf schnell ausgebaut werden können. Dies erscheint im Hinblick auf die seit einigen Jahren (und auf nicht-absehbare Zeit auch weiterhin) stets im Wandel begriffene energiewirtschaftliche Situation, welche durch den Stand der Forschung und politische Rahmenbedingungen mitbestimmt wird, äußerst sinnvoll. Werden in den nächsten Jahren andere Flexibilisierungsmaßnahmen (elektrische Speicher, DSM, Power-to-Gas etc.) konkurrenzfähig, wird sicherlich neu zu entscheiden sein. Aus aktueller Sicht erscheinen Kleinst-KWK-Anlagen jedenfalls als bedenkenswerte Variante, zumindest dann, wenn die meist wärmegeführten KWK-Anlagen wirklich flexibel, also nach Bedarf, betrieben werden können.

## 1.2 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Kleine KWK-Anlagen werden meist wärmegeführt betrieben (vgl. Kap. 2.5). Das heißt, dass die Stromerzeugung mit der Wärmenachfrage korreliert und demzufolge kaum flexibel steuerbar ist: Die Stromerzeugung von kleinen KWK-Anlagen findet aufgrund der erhöhten Wärmenachfrage und der in der Heizungstechnik üblichen Nachtabsenkung in aller Regel morgens und tagsüber statt, in jedem Fall zufällig und nicht geplant. Abhilfe schaffen hier bislang nur manuelle Eingriffe, welche versuchen die Stromproduktion hin zu einem höheren elektrischen Deckungsgrad zu verschieben. Dies mag aus Sicht der Betreiber zwar ökonomisch erstrebenswert sein, nicht jedoch aus volkswirtschaftlicher Sicht, die eine Minimierung der Gesamtkosten des Stromsystems anstreben muss.

Das Potenzial einer steuerbaren flexiblen Stromerzeugung lässt sich erst dann realisieren, wenn Wärmeverbrauch und Stromproduktion entkoppelt werden. Der Grund für eine bislang fehlende flexible Stromerzeugung von KWK-Anlagen liegt insbesondere in der aktuell ausschließlich „konservativen“ Nutzung der thermischen Speicher: Einzig verfolgte Aufgabe der in jedem KWK-System installierten Speicher ist, (Wärme-)Nachfrageschwankungen auszugleichen und den KWK-Anlagen lange, unterbrechungsfreie Laufzeiten zu garantieren. Eine darüber hinausgehende planvolle Wärmespeicherung findet demgegenüber genauso wenig statt wie die gezielte „Entleerung“ des Speichers. Eine entsprechend gesteuerte Ausnutzung der gesamten Speicherkapazität (nach oben wie unten) ist für eine flexible, sprich planbare Stromerzeugung jedoch unabdingbar. Das wesentliche Kriterium, nach dem sich diese Steuerung zu richten hätte, wäre die Wärmenachfrage, sofern für diese sinnvolle Prognosen vorliegen.

Die bislang wenig „kreative“ Nutzung des Speichers hängt damit zusammen, dass bislang Möglichkeiten einer graduellen Speicherregelung fehlen: Eine zu geringe Anzahl an eingesetzten Speicherfühlern entscheidet aktuell darüber, ob der Speicher „voll“ oder „leer“ ist. Eine „Speicherflexibilität“ ist nahezu nicht vorhanden. Über eingestellte Sollwerte wird das BHKW gestartet oder gestoppt, unabhängig von der vorangehenden, aktuellen und zukünftigen Wärmenachfrage. Die genutzte Speicherkapazität ist damit sehr gering und weitgehend konstant<sup>1</sup>. Hinzu kommt, dass bei Wärmespitzen oft der Spitzenlastkessel in Anspruch genommen wird, was dem BHKW wertvolle Laufzeit für die Stromerzeugung kostet – und das eben deshalb, weil sich die Speicherbeladung bisher nicht nach der Wärmenachfrage richten kann.

Abbildung 1-1 illustriert den Zusammenhang zwischen Stromproduktion und Speicherinhalt unter der bislang gängigen Bedingung eines konstanten Ein-/Ausschaltkriteriums.

---

<sup>1</sup> Das heißt, dass die Speicherkapazität und die Speichergrenzen keine konstante Größe sein müssen, sondern sich im Verlaufe eines Jahres beispielsweise als Funktion der mittleren Außentemperatur oder der gewählten Komfortbedingungen verändern können.

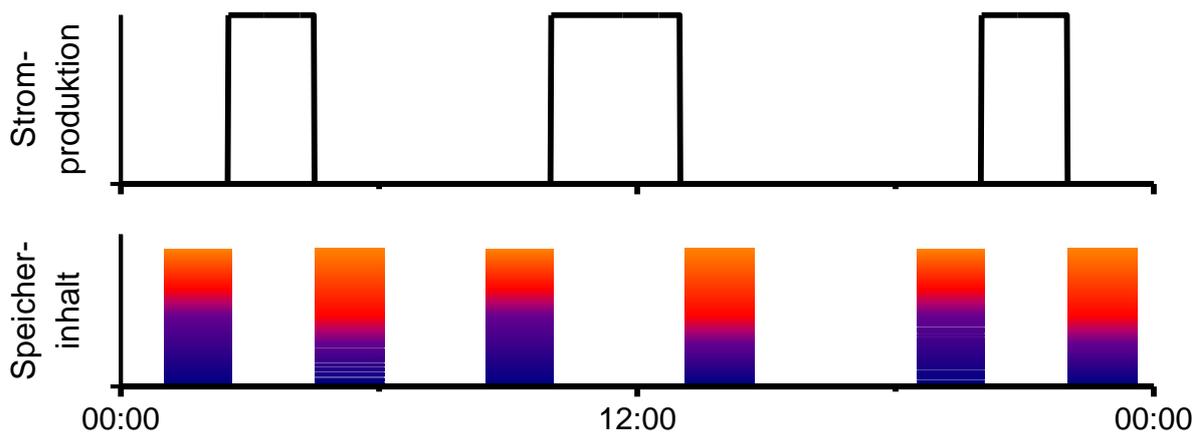


Abbildung 1-1: Stromproduktion und zugehöriger Speicherinhalt bei einer Klein-KWK-Anlage im Wärmeführungsmodus

Um eine flexible Stromerzeugung zu ermöglichen, erscheint es notwendig von Wärmeführung, dem bisherigen Standard, auf Energieführung umzusteigen, was beinhaltet, um die verfügbaren Speicherkapazitäten effektiv zu nutzen und somit zu einer flexiblen Fahrweise (strom- und speicheroptimal) zu gelangen. Ziel dieser Arbeit ist es entsprechend, eine flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen zu realisieren, indem eine intelligente Speichereinsatzplanung unter Zuhilfenahme einer Wärmebedarfsprognose vorgenommen wird. Die Wärmebedarfsprognose dient als Eingangsgröße einer Optimierungsfunktion, die innerhalb der zu bestimmenden Speichergrenzen einen BHKW-Fahrplan für den jeweils folgenden Tag ausgibt. Darüber hinaus wird eine neue BHKW-Regelung entwickelt, die den Fahrplan auch bei Fehlprognosen möglichst genau umsetzt.

Die untenstehende Tabelle 1-1 fasst die Probleme zusammen, mit deren Lösung sich diese Arbeit beschäftigt.

Tabelle 1-1: Verbesserungspotenziale von Mikro-KWK-Anlagen hin zu einer flexiblen Stromproduktion

„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

Ein Ziel ist demnach, den Speicher zu flexibilisieren. Das ist notwendig, damit die Stromerzeugung vom Wärmeverbrauch zeitweise entkoppelt werden kann. Zu beachten ist dabei, dass es nicht ausreicht lediglich die Speichergröße zu betrachten, um die nutzbare Speicherkapazität zu bestimmen. Erforderlich ist vielmehr, das gesamte KWK-System in den Blick zu nehmen, sprich das Zusammenwirken

von BHKW (-Typ), hydraulischer Verschaltung, Speicher und Verbraucher näher zu bestimmen. Nur wenn das Zusammenspiel dieser Komponenten bekannt ist, können sinnvolle (flexible) Speichergrenzen definiert und anhand derer die jeweilige Kapazität bestimmt werden. Innerhalb der Speichergrenzen kann sich der Speicherfüllstand „frei“ bewegen. Start- und Stoppvorgänge können unter Beachtung der Wärmeversorgung jederzeit durchgeführt werden.<sup>2</sup>

Ein weiteres Ziel besteht in der Erstellung einer Wärmebedarfsprognose, bei der über Speicherinhaltsmessungen auf Regelmäßigkeiten des Wärmeverbrauchs geschlossen wird, welche – in Relation gesetzt zur Außentemperatur – die Berechnung des zeitlichen Verlaufs und der absoluten Menge des Wärmebedarfs für den nächsten Tag ermöglicht.

Die Prognose erlaubt gemeinsam mit flexibilisierten Speichergrenzen eine Optimierung, die sich nach einer vorgegebenen Zielgröße richtet. Vor dem Hintergrund der oben geschilderten Zusammenhänge von EE-Stromerzeugung und Stromnachfrage wurde in dieser Arbeit die Maximierung der generierbaren Erlöse anhand der EEX-Preise als Zielgröße definiert. Die Anwendbarkeit der entwickelten Umsetzung einer flexiblen Stromerzeugung für andere Zielgrößen ist damit keineswegs ausgeschlossen.

Die Optimierung erfolgt also anhand der definierten Speichergrenzen, der Wärmeprognose und unter Berücksichtigung der EEX-Preise. Erstellt werden konnte darauf aufbauend ein BHKW-Fahrplan für den jeweiligen Folgetag inklusive Speichereinsatzplan, so dass im Zusammenwirken mit dem flexiblen Speicher der Wärmeverbrauch jederzeit gedeckt und gleichzeitig bedarfsorientiert, sprich zu Zeiten hoher EEX-Preise, Strom erzeugt werden kann. Die Umsetzung der BHKW-Fahrpläne wird über eine eigens programmierte und am Prüfstand getestete, intelligente Regelung gewährleistet, welche es erlaubt dem Fahrplan zu folgen und selbst im Fall von Prognoseabweichungen sicherstellt, dass der Fahrplan möglichst exakt eingehalten und der Wärmebedarf gedeckt wird sowie gleichzeitig die Speichergrenzen nicht verletzt werden.

Abbildung 1-2 illustriert die Stromproduktion einer Mikro-KWK-Anlage, welche sich an einer Nachfrage (hier: EEX-Preis) orientiert. Das BHKW startet und stoppt dieses Mal flexibel, also bei unterschiedlichen Speicherinhalten.

---

<sup>2</sup> Die Speichergrenzen können im Vergleich zum Wärmeführungsmodus viel weiter gefasst werden; stellen aber trotzdem die Wärmeversorgung jederzeit sicher. Die Speichergrenzen gelten dabei, wie der Name schon sagt, als absolutes An- bzw. Ausschaltkriterium. Durch eine Optimierungsfunktion soll sich der Speicherinhalt immer zwischen den Grenzen bewegen. Die jeweiligen BHKW-Zyklen können aber auch bei allen anderen Zuständen starten und stoppen.

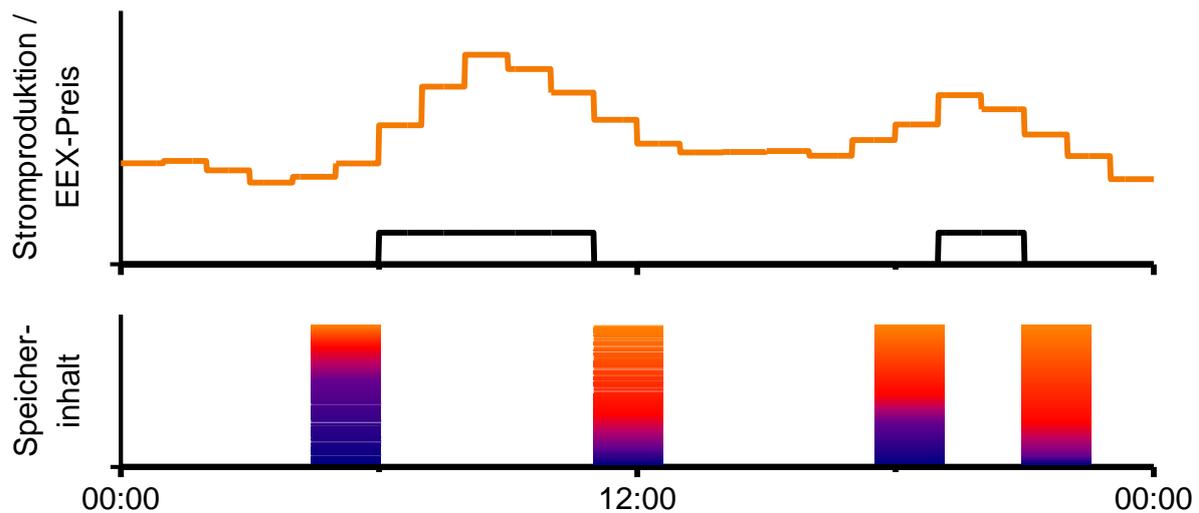


Abbildung 1-2: Nachfrageangepasste Stromproduktion einer Klein-KWK-Anlage und zugehöriger, flexibler Speicherinhalt

### 1.3 Stand der Forschung

Dieses Kapitel gewährt einen Einblick in Ergebnisse aktueller Forschung, der es vor allem ermöglichen soll, die in dieser Arbeit vorgeschlagene flexibilisierte Stromerzeugung durch Mikro-KWK-Anlagen als Antwort auf die in Kapitel 1.1 beschriebenen Herausforderungen in einem breiteren Kontext zu verorten: Neben einer Betrachtung von alternativen, nicht auf KWK basierenden Verfahren, die ihrerseits auf ein Stromüberangebot mit Wärmeerzeugung reagieren (Kap. 1.3.1), werden jene bereits diskutierten Flexibilisierungsmöglichkeiten von KWK-Anlagen vorgestellt, die als Teil eines sogenannten virtuellen Kraftwerks betrieben, jedenfalls aber zentral gesteuert werden (Kap. 1.3.2). Darüber hinaus wird auf Beiträge hinzuweisen sein, welche mögliche flexible Endverbraucher-Strompreise mit den Erzeugerpreisen in Zusammenhang bringen. Entsprechende Modelle machen grundlegend auf die Relevanz aufmerksam, Mikro-KWK-Anlagen für potenzielle Betreiber attraktiv zu machen. Solche Überlegungen stellen eine wichtige, zukünftig näher zu bestimmende Ergänzung zu den Ergebnissen dieser Arbeit dar (Kap. 1.3.3).

Es werden nachfolgend exemplarisch Forschungsarbeiten herausgegriffen, welche bestehende Trends und Überlegungen zu illustrieren helfen. Die Vorarbeiten, die zum Thema Kleinst-KWK-Anlagen vom Autor und genereller am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik geleistet wurden und an welche unmittelbar angeschlossen wird, werden an passender Stelle näher ausgeführt (u.a. Kap. 3.1). Zudem werden die Forschungsarbeiten von Huhn und Wehmhörner zu thermischen Speichern, welche diese Arbeit aufgreift und wesentlich weiterentwickelt, in Kapitel 4.1 vorgestellt, das sich detailliert mit dem Temperaturverlauf in thermischen Speichern auseinandersetzt.

#### 1.3.1 Verknüpfung von Wärme-Strom: Power to Heat

Seit kurzer Zeit wird verstärkt in Betracht gezogen, Stromerzeugung und Wärmenachfrage gemeinsam in den Blick zu nehmen. Die wesentliche Grundidee ist dann, dass überschüssiger, sprich nicht nachgefragter Strom für die Wärmeerzeugung (Power to Heat) genutzt werden kann. Da elektrische

Energie weder effizient noch wirtschaftlich speicherbar ist, ist die Verknüpfung von Stromerzeugung und Wärmemarkt eine naheliegende Option, die in jüngster Zeit auch Thema verschiedener Forschungsarbeiten ist. Als Stromabnehmer diskutiert werden dabei Wärmepumpen, Nachtspeicherheizungen und elektrische Boiler sowie elektrische Heizvorrichtungen in Fernwärmenetzen.

Ecofys [ECO 11] beispielsweise untersuchte die Potenziale von Wärmepumpen hinsichtlich Lastmanagement und Netzintegration erneuerbarer Energien. Durch eine stromgeführte Betriebsweise und insbesondere durch die Einbindung von Heizungspufferspeichern wird die Strom-Nachfrageseite flexibilisiert und die notwendige Größe des Kraftwerkparks reduziert.

Die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FFE) hat in ihrem Projekt „Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland“ [FFE 13] unter anderem die verfügbaren Lastmanagementpotenziale im Bereich elektrische Speicherheizungen und Wärmepumpen erforscht. Dabei werden Speicherheizungen und Wärmepumpen als Stromsenken betrachtet. Für eine Abschaltdauer von einer Stunde berechnet die FFE für Süddeutschland (Bayern und Baden-Württemberg) an Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur von 0 °C eine maximale Leistung von ca. 3 GW für Speicherheizungen und 400 MW für Wärmepumpen.<sup>3</sup> Jedoch ist die maximale Lastabschaltung „nur für eine bestimmte Stunde möglich“ und im „schlechtesten Fall kann kein Beitrag zur Reduzierung der Spitzenlast geleistet werden“ ([FFE 13], S. 76).

Lingauer untersucht in seiner Diplomarbeit [LIN 12] die Einbindung einer elektrischen Heizvorrichtung in ein Fernwärmesystem. Insbesondere in der Vermarktung von Sekundärregelleistung und in der negativen Minutenreserve kann diese in Verbindung mit einem Speicher bzw. einem Fernwärmenetz ökonomisch sinnvoll betrieben werden.

Bereits am Beispiel der ausgewählten Forschungsarbeiten zeigt sich, dass eine Verknüpfung des Stromsektors mit dem Wärmemarkt durchaus interessante Optionen bietet. Überschüssige elektrische Energie kann unter Rückgriff auf unterschiedliche Verfahren in Wärme umgewandelt und somit genutzt werden. Anzumerken bleibt, dass in Zukunft nahezu alle Flexibilitätsoptionen (Power to Gas, DSM, elektrische Speicher) um günstigen bzw. überschüssigen EE-Strom konkurrieren werden. Zudem muss kritisch hinterfragt werden, ob, anstatt immer wieder neue Wege zur Nutzung des Stromüberschusses zu finden, nicht eine Vermeidung des Überangebots sinnvoller ist, bspw. über KWK-Anlagen und flexible EE-Stromerzeuger, die aufgrund fehlender bzw. falscher Anreize bislang zwar vorrangig, nicht aber bedarfsorientiert Strom ins Netz einspeisen.

### **1.3.2 Flexible KWK-Anlagen und Einbindung in virtuelle Kraftwerke**

Power to Heat ist auch mit den in KWK-Anlagen integrierten thermischen Speichern möglich. Anders als die im vorangehenden Abschnitt betrachteten Verfahren bieten diese darüber hinaus auch die Möglichkeit, Strom bei Bedarf zu erzeugen. KWK-Anlagen sind in vielen Forschungsarbeiten Teil eines virtuellen Kraftwerks (vK). Ein vK ist eine Vernetzung von dezentralen, selbstständigen Stromerzeugern

---

<sup>3</sup> Die genannten Werte gelten für die in der Studie definierte „Variante 1: Verschiebung des Lastprofils“.

kleiner Leistung. Durch die Bündelung vieler Anlagen und einer zentralen Steuerung ergibt sich mit einem vK die Möglichkeit, Aufgaben hinsichtlich Regelbarkeit, Planbarkeit und Zuverlässigkeit wahrzunehmen, die bisher hauptsächlich von Großkraftwerke erbracht werden. KWK-Anlagen werden in virtuellen Kraftwerken meist so eingesetzt, dass sie die Stromproduktion aufrechterhalten, wenn die Erzeugung aus EE-Anlagen gering ist.

Beispielsweise der Energieversorger Vattenfall betreibt ein virtuelles Kraftwerk [VAT 13] mit Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken. Ist viel „Wind im Netz“, steuert die Wärmeleitwarte über eine Funkverbindung die teilnehmenden Wärmepumpen an. Diese „verbrauchen den überschüssigen Windstrom und erzeugen daraus Wärme“ ([VAT 12], S. 6f). Durch integrierte Wärmespeicher kann die Wärmeerzeugung vom Verbrauch getrennt werden. Bei geringem EE-Angebot werden über die gleiche Technik BHKW angesteuert, welche ebenfalls über Wärmespeicher verfügen und deshalb auch ohne Wärmeverbrauch Strom erzeugen können. Nach Selbstauskunft des Herstellers orientiert sich das vK „am Anteil der Windenergie im Netz. Der große Vorteil liegt in der Kombination von Blockheizkraftwerken und Wärmepumpen zu einem flexibel regelbaren Anlagensystem. Es ist das erste Kraftwerk, das während der Wärmeproduktion sowohl in der Lage ist, mit den Blockheizkraftwerken Strom zu produzieren als auch über die Wärmepumpen gezielt regenerativen Strom zu verbrauchen“ ([VAT 12], S. 14).

Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft hat den Verbund dezentraler Erzeugungsanlagen untersucht [FFE 12]. Durch die Vernetzung mehrerer Anlagen kann ein vK sowohl am Stromhandel teilnehmen als auch Systemdienstleistungen (Minutenreserve, Sekundärregelleistung) anbieten. Die in diesem Projekt zu beantwortenden Fragestellungen behandeln insbesondere die strategischen Überlegungen eines KWK-Anlagenbetreibers, den Stromhandel (bspw.: welche Stromprodukte soll das vK erzeugen?) sowie den Betrieb der Anlagen. Das Fazit der Arbeit lautet, dass sowohl in der Direktvermarktung als auch in der Regelleistungsvermarktung hohe Erlöszuwächse im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb erzielt werden können. Bei der Direktvermarktung können die erzielbaren Erlöse durch eine größere Speicherkapazität nochmals erhöht werden. Es wird aber auch darauf hingewiesen, dass die Anzahl der Startvorgänge wegen der veränderten Stromerzeugung und der dafür eingesetzten thermischen Prognose bzw. deren Abweichung ansteigt. Der Verbund kann gegenüber einer Einzelanlage zwar hinsichtlich Vermarktungsmenge und Erlös keinen Vorteil erzielen; er bietet jedoch die Möglichkeit, überhaupt am Strommarkt zu partizipieren und ist robuster bei Prognoseabweichungen.

Neben der Einbindung in vK können KWK-Anlagen auch intelligent in einem kleinen Verbund (Microgrid) betrieben und innerhalb dessen zentral gesteuert werden. Huber [HUB 13] simuliert das Zusammenspiel von Mikro-KWK-Anlagen, PV-Anlagen, Elektroheizern und Batterien in einem Microgrid bestehend aus 20 Gebäuden. Durch die Nivellierung der elektrischen Last ergibt sich durch das zusammenhängende Stromnetz ein deutlich höherer Autonomiegrad. Wird zusätzlich ein Managementsystem integriert, welches die in den jeweiligen Gebäuden installierten BHKW steuert, kann der Autarkiegrad auf 80 % erhöht werden. Darüber hinaus zeigen Hubers Analysen, dass einerseits der Einsatz von elektrischen Speichern den Autonomiegrad eines PV-Systems erhöhen und andererseits bei KWK/PV-Systemen mit intelligenter KWK-Betriebsführung auf elektrische Speicher verzichtet werden kann.

Ein weiteres Beispiel flexibler KWK-Stromerzeugung bietet das „Zuhausekraftwerk“ von Lichtblick

[LIC 14]. Der Stromanbieter Lichtblick hat mit der Ankündigung, 100.000 Mini-BHKW mit einer elektrischen Leistung von jeweils 20 kW („Schwarmstrom“) zu installieren und zu vernetzen, im Jahr 2009 großes Aufsehen erregt.<sup>4</sup> Das Besondere am Lichtblick-Konzept ist, dass es im Wärmecontracting angeboten wird und demzufolge der Betreiber Lichtblick die Möglichkeit hat, das BHKW zu steuern. Die Anlage bleibt Eigentum von Lichtblick, der Anlagenbetreiber bekommt einen an den Erdgaspreis gekoppelten Wärmepreis und eine festgelegte Vergütung pro erzeugter Kilowattstunde Strom. Der von Lichtblick eingesetzte zentrale Energiemanager orientiert sich am Strompreis [LIC 10]. „Lichtblick vermarktet den Schwarmstrom im Spot- und Intraday-Handel und plant demnächst den Einstieg in den Markt für Regelernergie“ [ZFK 13-b]. Das Lichtblick-Konzept beinhaltet sowohl im Hinblick auf die BHKW-Dimensionierung als auch auf ihre Vermarktungsstrategie interessante Neuerungen, deren zukünftige gemeinsame Betrachtung mit den Ergebnissen dieser Arbeit aufschlussreiche Einsichten verspricht.

### 1.3.3 Variable Vergütung und Strompreise

Die bisher umgesetzten vK haben keine Anlagen kleiner Leistung im Portfolio. Eine mögliche Erklärung hierfür könnten die hohen Kosten, welche die Anbindung an ein virtuelles Kraftwerk mit sich bringt, sein. Zudem sind insbesondere bei kleinen Anlagen noch keine ausreichenden Erlösmöglichkeiten vorhanden, welche die zusätzlichen Kosten decken könnten. Ein weiterer Aspekt, der die Attraktivität aus Sicht der Betreiber gegebenenfalls schmälert, ist die Tatsache, dass dieser die Möglichkeiten der Steuerung seiner Anlage aus der Hand gibt.

Um eine Flexibilisierung kleiner Stromerzeuger zu erreichen, sollten indes Anreize geschaffen werden, die den Betreiber dazu motivieren, seine Stromproduktion zu verändern. In diesem Zusammenhang könnte zum einen eine variable Vergütung dafür sorgen, dass die Stromerzeugung flexibilisiert wird. Sowohl die aktuelle EEG- als auch die KWK-Förderung sehen bislang eine fixe Vergütung unabhängig von der Netzlast oder dem Strombedarf vor. Zum anderen können variable Endkunden-Strompreise dafür sorgen, dass sich neben der Stromerzeugung auch die Stromnachfrage verschieben lässt.

Wie ein Strommarkt mit variablem Strompreis und variabler KWK-Vergütung aussehen kann, wird u.a. im E-DeMa („Entwicklung und Demonstration dezentral vernetzter Energiesysteme zum E-Energy Marktplatz der Zukunft“) Projekt gezeigt. Ziel ist es „Geschäftsmodelle zu entwickeln, die den Anforderungen des Wandels zu liberalisierten Märkten und zu dezentralen Erzeugungsstrukturen Rechnung tragen ([EEN 13], S. 60). Einer der wichtigsten Aspekte in diesem Projekt war es, das Flexibilitätspotenzial in Haushalten zu bestimmen. Dabei wurden sowohl Nachfragelastverschiebungen (weiße Ware etc.) als auch planbare Stromerzeuger (Mikro-BHKW) betrachtet. Um die Kunden zur Flexibilisierung zu motivieren, wurden zeitlich variable Tarifsysteme definiert. Diese bestehen aus bis zu acht Zeitzonen und fünf Tarifstufen. Die jeweiligen Strompreise errechnen sich dabei aus den Base- und Peak-Preisen der Strombörse. Beispielsweise beträgt dann der Preis für Schwachlaststrom weniger als 10 €/ct/kWh, während der Strom im höchsten Tarif über 50 €/ct/kWh kosten kann. Die Einspeisetarife setzten sich analog zu den Lasttarifen aus fünf Tarif- und acht Zeitzonen zusammen, sind jedoch

---

<sup>4</sup> Bis Mitte 2013 konnten 800 Anlagen in Betrieb genommen werden [ZFK 13-b].

niedriger als die Bezugspreise und variieren etwas weniger.

Eine Verknüpfung von Strommarkt und KWK-Stromerzeugung ist auch bei Prognos [PRO 13] das entscheidende Kriterium dafür, dass KWK in das neue Energieversorgungssystem integriert werden können: Das oberste Ziel ist demnach die „Verdrängung der Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien durch den KWK-Einsatz auszuschließen“ ([PRO 13], S. 1). Erreicht werden kann dies durch „eine konsequente Orientierung der KWK am Strommarkt (...) die einen Umbau des derzeitigen Fördersystems erfordert“ ([PRO 13], S. 86). Die Flexibilität der KWK-Anlagen, welche als „Grundvoraussetzung für die Integration der erneuerbaren Energien“ (ebenda) angesehen wird, kann durch Wärmespeicher und Elektroheizer erhöht werden. Prognos schlägt vor, die bisher konstante Förderung (vgl. Kapitel 2.3.3) durch eine variable Vergütung „entsprechend den stündlichen Strommarktanforderungen“ (ebenda) zu ersetzen.

Eine erste Annäherung hin zu einer variablen Stromvergütung wurde bereits in Dänemark realisiert. Anlagen unter 5 MW, die auf der 400 V Spannungsebene einspeisen, erhalten in Dänemark während der Niedriglastphase 2,76 €/kWh<sup>5</sup>, 6,96 €/kWh zur Hochlastpreisphase und 9,70 €/kWh in der Spitzenlastzeit. Die Niedriglastphase beginnt um 21.00 Uhr und endet um 6.00 Uhr, der Spitzenlasttarif wird zwischen 8.00 und 12.00 Uhr sowie im Winter (Oktober bis März) zusätzlich von 17.00 bis 19.00 Uhr gezahlt. In den restlichen Stunden gilt der Hochlasttarif [ENE 14]. Die bezahlte Vergütung korreliert nur mit der Stromnachfrage. Eine Einbeziehung des Angebots aus EE sowie eine höhere Flexibilität hinsichtlich Preishöhe und Tarifzeiten sind noch nicht vorgesehen.

In der VDE-Studie „Smart Distribution 2020 – Virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen“ [VDE 08] werden verschiedene Vergütungsmodelle für EE- und KWK-Anlagen diskutiert. In den Modellen wird die KWK-Vergütung entweder „an den Marktpreisen der Strombörse EEX“ ([VDE 08], S. 18) ausgerichtet oder es sollen „dynamische Tarife“, welche sich u.a. an den „Preisverläufen der EEX-Börse“ ([VDE 08], S. 26) orientieren, verwendet werden.

Diese Betrachtungen scheinen beachtenswert, geht man davon aus, dass eine flexible Stromerzeugung von Mikro-KWK-Anlagen in Zukunft nur realisiert werden kann, wenn diese für die Betreiber wirtschaftlicher ist als die Eigenstromerzeugung. Wie solche Wirtschaftsmodelle aussehen, soll nicht Bestandteil diese Arbeit sein, wird aber beispielsweise von Pielke [PIE 10] und Luibl [LUI 12] diskutiert.

#### **1.4 Herangehensweise und Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit verfolgt das Ziel, eine flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK-Anlagen anhand einer intelligenten Speichereinsatzplanung und einer Wärmebedarfsprognose zu ermöglichen. Experimentelle Untersuchungen aus Feldtests und Prüfstandsmessungen stellten die Grundlage für eine Optimierung am PC dar. Die so gewonnenen Ergebnisse wurden als Eingangsparameter für erneute Prüfstandsmessungen verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE) jedoch zukünftig geplant ist die Optimierung und Regelung im Rahmen von Pilotprojekten in Feldtests zu erproben und validieren. In Abbildung 1-3 wird

---

<sup>5</sup> Wechselkurs vom 24.01.2014: 1 EU = 7,4620 DKK

die hier angedeutete Chronologie des Forschungsprozesses illustriert.

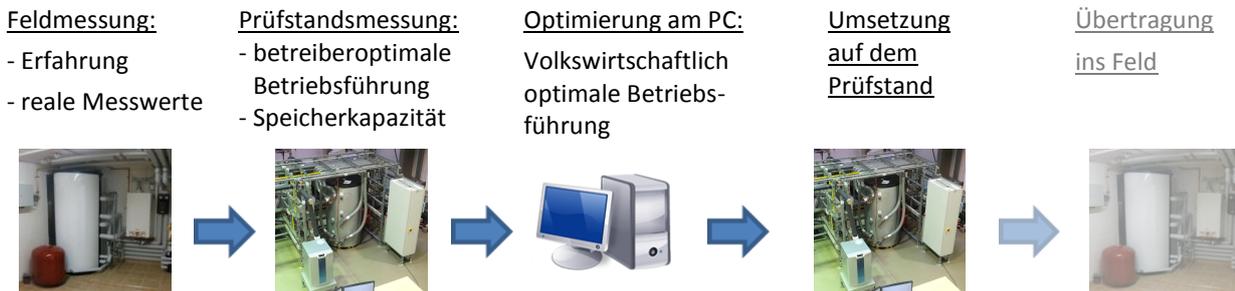


Abbildung 1-3: Chronologie des Forschungsprozesses

Den Ausgangspunkt stellten demnach gemessene Feldtestdaten von Mikro-KWK-Systemen dar: In diversen am IfE durchgeführten Feldtests wurden Kleinst-KWK-Systeme hinsichtlich der erzeugten Strommenge sowie der BHKW- und Spitzenlastkessel(SLK)-Laufzeit analysiert. Dabei auftretende Ineffizienzen, hervorgerufen durch (unnötige) SLK-Einsätze oder sehr kurze BHKW-Zyklen, konnten aufgezeigt werden.

Auf die Erfahrungen und Daten aus den Feldtests aufbauend wurde an einem eigens aufgebauten Mikro-KWK-Prüfstand versucht die Stromerzeugung dieser Anlage zu flexibilisieren. Die dafür notwendige Speichereinsatzplanung wurde durch ein neues Speichermodell verwirklicht, welches wiederum auf den Prüfstandsmessungen basiert. Die zuvor identifizierten Ineffizienzen wurden mit Hilfe des Mikro-KWK-Prüfstands detailliert analysiert und behoben („betreiberoptimale Betriebsführung“).

Mit Hilfe im Feldtest gemessener Wärmeverbräuche wurde dann eine Wärmebedarfsprognose entwickelt, die gemeinsam mit den am Prüfstand ermittelten Speichergrenzen und dem EEX-Preis in eine am PC entworfene Optimierungsfunktion einfließt, welche die Entwicklung eines BHKW-Fahrplans mit zugehörigem Speicherinhaltsverlauf ermöglicht. Die Ergebnisse der Optimierung gehen als Eingabeparameter in eine neu programmierte intelligente Regelung ein, die den Fahrplan am Prüfstand so umsetzt, dass dieser eingehalten und zugleich den Komfortbedürfnissen der Bewohner entsprochen werden kann.

Das hier angeschnittene Vorgehen und die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch detaillierter dargestellt und diskutiert. Die Arbeit gliedert sich wie folgt:

Im nachfolgenden zweiten Kapitel wird in wichtige Grundlagen zu Klein- und vor allem Kleinst-KWK-Anlagen eingeführt. Im Vordergrund stehen außerdem Fragen zu KWK-Technologien (Kap. 2.2) und zu deren ökologischen und ökonomischen Charakteristika (Kap. 2.3), zur Wärmespeicherung (Kap. 2.4) und Regelungsstrategien (Kap. 2.5) sowie in der Folge: zur Dimensionierung (Kap. 2.6).

Das dritte Kapitel widmet sich den Untersuchungsobjekten und Datengrundlagen. In Kapitel 0 werden die Potenziale und Schwachstellen von Kleinst-KWK-Anlagen, die in den bereits erwähnten Feldtests identifiziert wurden, präsentiert, um anschließend den zur Verbesserung der aktuellen Betriebsführung und zum Aufzeigen alternativer Modelle aufgebauten Mikro-KWK-Prüfstand näher zu beschreiben (Kap. 3.2). Das folgende Unterkapitel beschäftigt sich mit dem dynamischen Betriebsverhalten und der

Regelung des am Prüfstand installierten Whispergen BHKW (Kap. 3.3). Im nächsten Schritt wird der Versuch beschrieben, die Anlageneffizienz auf Betreiberebene zu verbessern. Anhand der Ergebnisse aus Typtagversuchen werden Verbesserungspotenziale hinsichtlich BHKW-Laufzeit, SLK-Reduzierung etc. im Vergleich zu den Feldtestergebnissen aufgezeigt (Kap. 3.4). Als eine Art Zwischenbilanz werden Kriterien für ein zu verbesserndes Betriebsverhalten benannt (Kap. 3.5).

Kapitel 4 setzt sich mit den Speichern der Mikro-KWK-Anlagen auseinander. Kapitel 4.1 untersucht das Speicherverhalten des eingesetzten Kombispeichers bei Be- und Entladung. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die darauffolgend eingeführte Definition eines nutzbaren Speicherinhalts ein (Kap. 4.2), an der sich auch die später neu zu entwickelnde BHKW-Betriebsführung ausrichten wird. In Kapitel 4.3 steht die Tauglichkeit dieser Speicherinhaltsdefinition im realen Betrieb zur Diskussion. In den letzten beiden Unterkapiteln (4.4 und 4.5) werden Ergebnisse aus Analysen der Speicherausnutzung unter Maßgabe der neu definierten Speicherinhaltsdefinition vorgestellt. Wichtigste Einsicht aus diesen Betrachtungen wird sein, dass bei herkömmlicher Speichernutzung lediglich ein Ausgleich der Nachfrageschwankungen, aber keine Wärmespeicherung stattfindet.

Abbildung 1-4 veranschaulicht die Zusammenhänge, welche in den Kapiteln 5 bis 7 nach und nach ausgearbeitet werden.

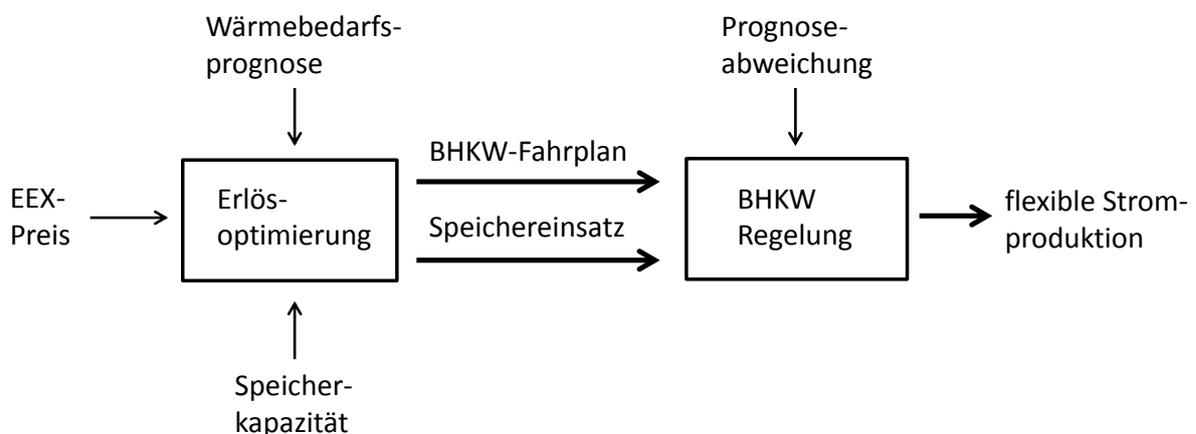


Abbildung 1-4: Ablaufdiagramm des Prozesses hin zur flexiblen Stromproduktion

Wie in Kapitel 1.2 bereits angedeutet wurde, bestehen notwendige Zwischenschritte für eine flexible Stromerzeugung darin, auf die definierten Speicherkapazitäten, die erstellte Wärmebedarfsprognose und EEX-Preise bezugnehmend einen Optimierungsalgorithmus zu entwickeln, der (täglich) BHKW-Fahrpläne und Speichereinsatzpläne ausgibt, deren Umsetzung (auch im Falle einer Prognoseabweichung) wiederum von einer eigens zu entwickelnden intelligenten BHKW-Regelung gewährleistet werden soll.

Im fünften Kapitel werden dann die drei für die Optimierungsfunktion notwendigen Eingangsparameter definiert: Der EEX-Preis, die Wärmebedarfsprognose und die in der Funktion verwendete Speicherkapazität. Wenn in dieser Arbeit von einer flexiblen Stromerzeugung die Rede ist, so ist gemeint, dass sich die Stromerzeugung aus den Mikro-KWK-Anlagen am EEX-Strompreis orientieren soll.

In Kap. 5.1 wird der EEX-Preis inklusive seiner typischen Charakteristika vorgestellt. Darauf aufbauend wird die Feldtest- und Prüfstandsstromerzeugung mit dem EEX-Preis zusammengebracht und aufgezeigt, dass die Stromproduktion prinzipiell signifikant mit den Preisen korreliert. Das BHKW startet lediglich am Morgen oftmals etwas zu früh, was zugleich bedeutet, dass bereits mit einer kleinen Verschiebung der Stromerzeugung viel bewirkt werden kann. In Kapitel 5.2 wird anhand der Feldtestdaten die hohe Korrelation der Wärmeverbräuche benachbarter Tage untersucht und mit Hilfe dieser die Wärmebedarfsprognose erstellt. Darauf aufbauend werden in 5.3 die aus den Ergebnissen von Kapitel 4 ableitbaren Speicherkapazitäten näher definiert, die ihrerseits in die Erlös-Optimierungsfunktion eingehen.

Kapitel 6 stellt die Optimierungsfunktion, die BHKW-Fahrpläne und Speichereinsatzpläne sowie die intelligente Regelung vor. In Kapitel 6.1 wird der Optimierungsalgorithmus entwickelt, wobei drei Szenarien, welche sich vor allem hinsichtlich des Anfangsspeicherinhalts unterscheiden, entworfen und evaluiert werden. Im Unterkapitel 6.2 wird die eigens programmierte intelligente Regelung vorgestellt, welche die Fahrpläne und Speichereinsatzpläne umsetzt, und in 6.3 deren Funktionalität auch im Falle von Abweichungen von der Wärmebedarfsprognose thematisiert.

Kapitel 7 präsentiert und diskutiert die Ergebnisse aus den Prüfstandsmessungen, welche den Betrieb der Mikro-KWK-Anlage unter optimierten und gesteuerten bzw. flexibilisierten Betriebsbedingungen erfassen. Im Unterkapitel 7.1 wird von dem Fall der zutreffenden Wärmebedarfsprognose ausgegangen, während 7.2 eine Prognoseabweichung mit ins Kalkül zieht. Abschließend wird eine gegenüberstellende und zusammenfassende Bewertung der Prüfstandsmessungen vorgenommen (Kap. 7.3).

In Schlusskapitel 8 werden die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Zudem wird die Generalisierbarkeit der getroffenen Annahmen eruiert, die Übertragbarkeit auf weitere technische Felder ausgelotet und ein kurzer Ausblick auf mögliche, sich anschließende und für lohnenswert erachtete Forschungsarbeiten gewährt.

## 2. Klein- und Kleinst-KWK-Anlagen zur Gebäudeenergieversorgung: Grundlagen

Der Anteil der Kraft-Wärme-Kopplung an der gesamten Stromerzeugung ist in den letzten zehn Jahren nur leicht von 13,5 % auf ca. 16 % gestiegen [UBA 13]. Das von der deutschen Politik formulierte Ziel, im Jahr 2020 25 % des Nettostroms aus KWK-Anlagen zu erzeugen, kann trotz des 2002 beschlossenen KWK-Gesetzes [KWKG 12] und dessen Verlängerung bzw. Novellierungen in den Jahren 2009 und 2012 nur erreicht werden, wenn der jährliche KWK-Zubau deutlich ansteigt. In diesem Sinne wird in den aus den Leitstudien nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima hervorgegangene „EE-Langfristszenarien 2011“ [BMU 12] davon ausgegangen, dass das 25 %-Ziel bis zum Jahr 2020 noch im Rahmen des Möglichen liegt. Der dafür notwendige Zubau müsste in der Industrie, in Wärmenetzen mit Blockheizkraftwerk (BHKW) sowie in der Objektversorgung mit kleinen KWK-Anlagen stattfinden. Eine Steigerung der Stromerzeugung von Groß-KWK-Anlagen in Heizkraftwerken (HKW) mit Fernwärmenetzen ist hingegen aufgrund des durch Gebäudesanierungen reduzierten Wärmebedarfs in den nächsten Jahren nicht möglich (Abbildung 2-1).

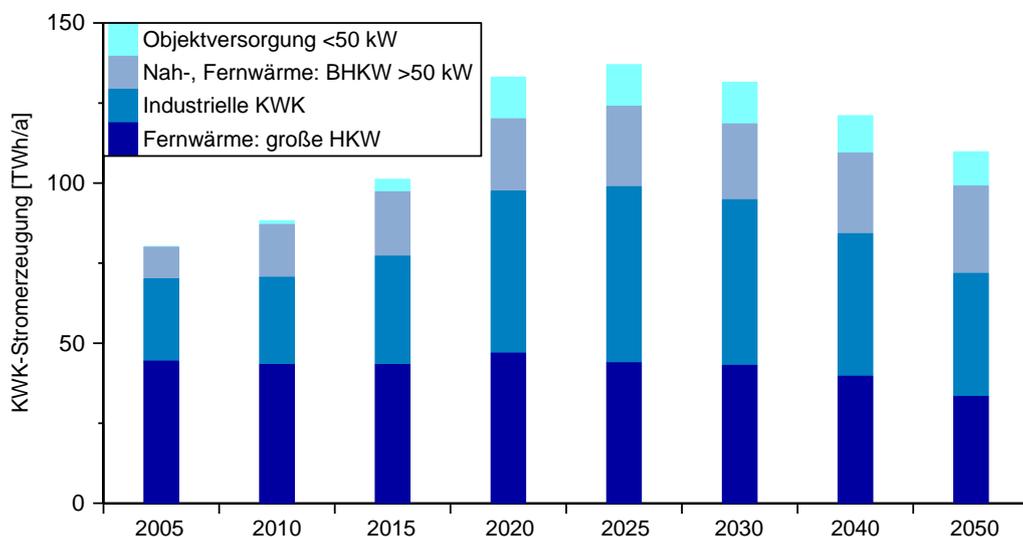


Abbildung 2-1: Entwicklung der KWK-Nettoerzeugung, Daten aus [BMU 12]

Da auch das Potenzial im industriellen Sektor begrenzt ist, liegen Möglichkeiten zukünftiger Zuwächse vor allem im gebäudeintegrierten KWK-Bereich (Objektversorgung) und somit in kleineren KWK-Anlagen. Als gebäudeintegrierte KWK-Anlage werden Anlagen verstanden, welche ein oder mehrere zusammenhängende Gebäude (v.a. Wohngebäude und Kleingewerbe) ohne Anschluss an ein Nahwärmenetz mit Wärme und Strom versorgen. Aufgrund der vornehmlich eingesetzten Verbrennungsmotortechnologie werden diese auch als BHKW bezeichnet.

Nachfolgend wird zunächst eine Klassifizierung von Klein- und Kleinst-KWK-Anlagen vorgenommen und zudem werden Eckdaten zu deren aktuellen und potenziellen Verbreitung in Deutschland skizziert (Kap. 2.1). Anschließend werden in Kapitel 2.2 die verschiedenen KWK-Technologien vorgestellt, die für den Einsatz in Wohngebäuden interessant sind. Im darauf folgenden Unterkapitel (2.3) werden nähere Betrachtungen zur Ökologie und Wirtschaftlichkeit von Kleinst-KWK-Anlagen angestellt, wodurch mitunter verdeutlicht werden soll, dass trotz einer nach wie vor nicht gegebenen (sicherlich aber weiter optimierbaren) Wirtschaftlichkeit für den Anlagen-Betreiber unterschiedliche Effizienz-Betrachtungen für einen weiteren Ausbau von KWK gerade im Bereich der Gebäudeversorgung sprechen. Kapitel 2.4 bis 2.6 beschäftigen sich mit technologischen Grundlagen von Klein- und Kleinst-KWK-Anlagen und Aspekten, welche noch vor der Anschaffung einer Anlage zu berücksichtigen sind, namentlich mit den verschiedenen Wärmespeicherkonzepten (2.4), mit unterschiedlichen Regelungsarten bzw. -strategien (2.5) sowie mit Fragen der Dimensionierung (2.6).

## 2.1 Klassifizierung, Verbreitung und Potenzial

Da KWK-Anlagen in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten immer kleiner wurden, musste die Nomenklatur der KWK-Größenklassen<sup>6</sup> immer wieder angepasst werden. In der im März 2005 vom Bundesministerium für Umwelt (BMU) veröffentlichten Studie „Kleine Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz“ [BMU 05] werden KWK-Anlagen unter 2 MW<sub>el</sub> als „Klein-KWK-Anlagen“ bezeichnet. Anlagen unter 50 kW<sub>el</sub> firmieren als „Kleinst-KWK-Anlagen“, solche kleiner 15 kW<sub>el</sub> als „Mini-KWK“- oder „Mikro-KWK-Anlagen“. Mit der andauernden Entwicklung hin zu immer kleineren elektrischen Leistungen, wurden wiederholt neue Abgrenzungen und Namensgebungen notwendig (z.B. Nano-BHKW oder stromerzeugende Heizung).

Eine eindeutige Klassifizierung der kleinsten KWK-Anlagen liegt demnach nicht vor. Orientieren kann man sich bspw. an den Vergütungsklassen im KWK-Gesetz [KWKG 12]. Die maximale Vergütung für KWK-Anlagen beträgt 5,41 €ct/kWh<sub>el</sub>, welche nur Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub> bekommen. Diese Anlagen werden im Weiteren als Klein-KWK-Anlagen bezeichnet. Die in dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten Kleinst-KWK-Anlagen werden nochmals in Mini-KWK der 5 kW-Klasse und die erst in den letzten Jahren auf den Markt gekommenen 1 kW-Anlagen (Mikro-KWK) unterschieden (Tabelle 2-1).

**Tabelle 2-1:** Klassifizierung der Klein-KWK-Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub>

	Klein-KWK	Kleinst-KWK	Mini-KWK	Mikro-KWK
Leistungsklasse [kW <sub>el</sub> ]	< 50	< 15	≈ 5	≈ 1

Mini-BHKW-Anlagen werden schon seit vielen Jahren im Kleingewerbe (Beherbergung, Nahrungsmittel, etc.) und in größeren Wohngebäuden (Mehrfamilienhäusern) ab einem Wärmebedarf von 100 MWh/a eingesetzt. In beiden Fällen bieten sich Mini-KWK-Systeme einerseits wegen der hohen

<sup>6</sup> KWK-Anlagen werden immer anhand ihrer elektrischen Leistung klassifiziert.

Vorlauftemperaturen und andererseits aufgrund der Möglichkeit einer einfachen „Beistelllösung“ zum herkömmlichen Wärmeerzeuger insbesondere bei Sanierungen an.

Mikro-KWK-Anlagen sind demgegenüber speziell für den Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser ausgelegt. Laut Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen [ARGE 11] gibt es in Deutschland knapp 15 Millionen Ein- und Zweifamilienhäuser. Wegen der verschiedenen Anlagentypen und Technologien (Kapitel 2.2) könnte theoretisch (abgesehen von den Häusern, die im Bereiche eines Nah- oder Fernwärmenetzes liegen) in jedem dieser Gebäude wie auch in sämtlichen zukünftigen Neubauten eine Mikro-KWK-Anlage installiert werden.

In der Novellierung des KWK-Gesetzes im Jahr 2009 [KWKG 09] stand vor allem die Stromerzeugung aus gebäudeintegrierten Klein-KWK-Anlagen im Fokus. Zwei Veränderungen wurden von staatlicher Seite vorgenommen, KWK-Anlagen für Gebäudeeigentümer interessanter zu machen: So wurde zum einen festgelegt, dass der Anlagenbetreiber die KWK-Vergütung nicht nur für den verkauften, sondern auch für den selbstgenutzten Strom bekommt. Zum anderen wurde ein Mini-KWK-Impulsprogramm [BMU 08] eingeführt, das die Investition von KWK-Anlagen unter 50 kW fördert (die Förderkonditionen finden sich im Anhang, Tabelle A-1). Dies führte im Jahr 2009 im Vergleich zu den Jahren davor zu einem sprunghaften Anstieg der verkauften Klein-KWK-Anlagen [MAR 11].<sup>7</sup> Angelehnt an Zahlen der BAFA [BAFA 14-a] zeigt Abbildung 2-2 die verkauften Klein-KWK-Anlagen bzw. deren kumuliert installierte Leistung nach der Novelle 2009, unterteilt in verschiedene Leistungsklassen. Deutlich wird, dass die Anlagenzahl nach dem Aufbrauchen der zur Verfügung gestellten Fördermittel im Rahmen der Impulsförderung zwar wieder gesunken, aufgrund der Förderung des selbstverbrauchten Stroms jedoch über den Verkaufszahlen vor 2009 geblieben ist [MAR 11].

---

<sup>7</sup> Marth und Breitschopf [MAR 11] untersuchen die Auswirkung von Politikmaßnahmen auf das Innovationsgeschehen im Bereich der Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung. Es finden sich detaillierte Zubauzahlen von Kleinst-KWK-Anlagen für die Jahre 1999 bis 2009, die als BAFA-Daten ausgewiesen werden, aber leider nicht nachvollzogen werden konnten.

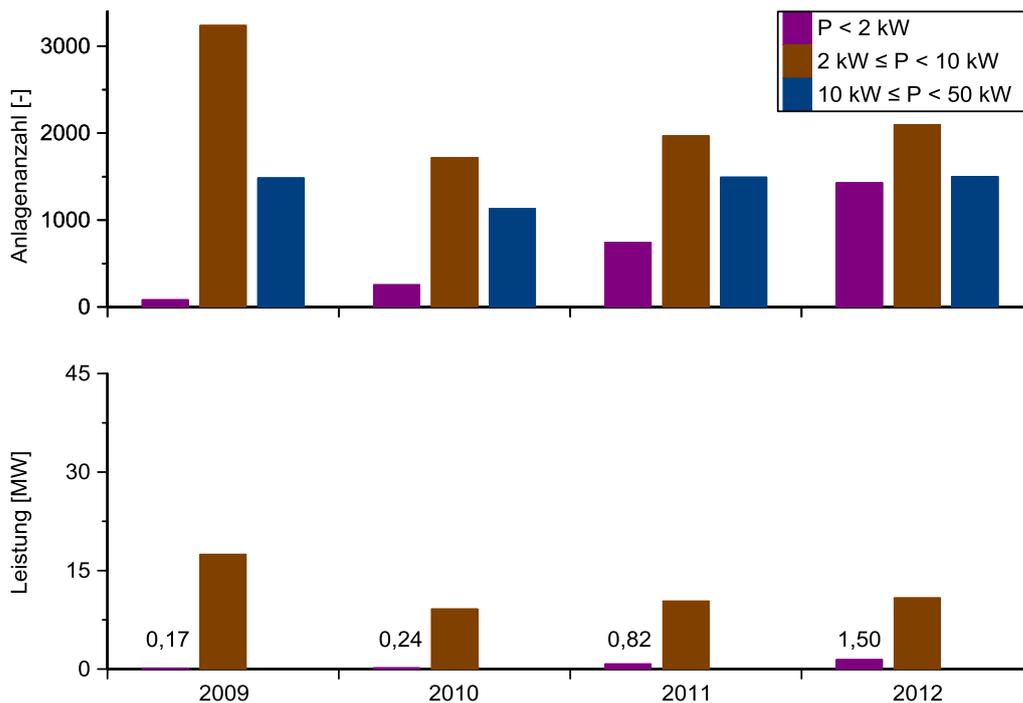


Abbildung 2-2: Installierte Anlagen und Leistungen von Klein-KWK Anlagen in den Jahren 2009 bis 2012, Daten aus [BAFA 14-a]

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Zahl der vom BAFA geförderten Mikro-KWK-Anlagen zwischen 2009 und 2012 stark gestiegen sind. Obwohl im Jahr 2012 ca. 1.500 Anlagen subventioniert wurden, ist deren installierte Leistung im Vergleich mit den anderen Klein-KWK-Anlagen immer noch fast vernachlässigbar (Abbildung 2-2, unteres Diagramm). Wie oben beschrieben, ist das erforderliche Ausbaupotenzial im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser vorhanden, um in Zukunft eine merklich erhöhte kumulierte Leistung aus neu installierten Mikro-KWK-Anlagen zu erzielen. So geht die Prognos AG [PRO 13] in ihrem mittleren Szenario von 185.000, im oberen Szenario („Verschärfung der Anforderungen an die CO<sub>2</sub>-Einsparung der Gebäude“) von 700.000 verkauften Mikro-KWK-Anlagen in deutschen Privathaushalten bis im Jahr 2030 aus. Der Anteil von Mikro-KWK-Anlagen könnte in diesem Szenario 10 % der auf dem Heizungsmarkt im Jahr 2030 installierten Geräte entsprechen.

Um der Stromerzeugung von Mikro-KWK-Anlagen einen weiteren Schub zu geben, fördert das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) seit dem 1. April 2012 im Rahmen eines neuen Impulsprogramms Mini-KWK-Anlagen bis 20 kW<sub>el</sub> mit 1.500 bis 3.500 Euro. Bis Ende Juni 2013 wurden insgesamt 4.270 Anlagen mit einer kumulierten elektrischen Leistung von 18,94 MW gefördert. Fast die Hälfte der geförderten Anlagen lag im Leistungsbereich zwischen 3,1 und 10 kW<sub>el</sub>. Während über 40 % der geförderten Anlagen eine Nennleistung größer als 10 kW<sub>el</sub> haben, waren nur 12,5 % (534) der geförderten Anlagen kleiner als 3 kW<sub>el</sub> [BAFA 13-a]. Laut der Shell BDH Hauswärmestudie [SHE 13] werden in Deutschland jedes Jahr zwischen 600.000 und 700.000 Wärmerezeuger installiert. Der Anteil der Mikro-KWK-Anlagen am Heizungsmarkt ist bislang folglich kleiner als 1 %.

## 2.2 Mikro-KWK-Technologien

Es gibt fünf verschiedene Technologien, welche gemeinhin als Mikro-KWK-Anlagen Verwendung finden. Am meisten ausgereift ist die Verbrennungsmotoren-Technologie, bei welcher auf jahrzehntelange Erfahrungen in der Automobilbranche zurückgegriffen werden kann. Daneben werden in den letzten Jahren in der 1 kW-Leistungsklasse auch immer mehr Stirlingmotoren verkauft, deren Weiterentwicklung in den vergangenen Jahren große Fortschritte gemacht hat. Schon seit vielen Jahren werden Brennstoffzellen sowohl im Automobilbereich als auch in der stationären Anwendung entwickelt und zwischenzeitlich sind die ersten Brennstoffzellen-Heizgeräte auf dem Markt verfügbar.

Auf Verbrennungsmotor, Stirlingmotor und Brennstoffzelle wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels näher eingegangen. Vernachlässigt werden im Folgenden demgegenüber die Dampfexpansionsmaschine und die Mikro-Gasturbine, welche gemeinsam nur einen sehr geringen Anteil der Mikro-KWK-Anlagen ausmachen.

Die von der Firma lion-energy, früher OTAG, entwickelte Dampfexpansionsmaschine „erzeugt Dampf, der einen Doppelfreikolben im patentierten Lineargenerator (Linator) durch gesteuerte Dampfzugabe hin- und herschwingen lässt“ ([LION 13], S. 6). Durch die thermische Modulationsfähigkeit zwischen 4,0 und 16 kW ist die Anlage laut Hersteller auch für Ein- und Zweifamilienhäuser geeignet. Die Verkaufszahlen sind jedoch gering [MÜH 13] und die KWK-Anlage war in der Vergangenheit nicht immer zuverlässig [LIPP 09]. Als weiterer negativer Aspekt hinzu kommt, dass die Stromkennzahl ( $< 0,1$ ), die das Verhältnis der elektrischen zur thermischen Leistung abbildet, kleiner ist als bei anderen Mikro-KWK-Technologien (vgl. Kap.2.3). Aus diesen Gründen wird die Dampfexpansionsmaschine nicht weiter einbezogen.

Auch die Capstone C30 Mikro-Gasturbine, die von E-quad Power Systems [EQU 14] vertrieben wird, bleibt im Folgenden unberücksichtigt. Trotz gewisser Vorteile (u.a. höhere Temperaturen) gegenüber anderen Klein-KWK-Technologien, ist die kleinste Anlage mit 30 kW elektrischer und 68 kW thermischer Leistung sowie mit einem hohen Schallleistungspegel von 65 dB(A) zwar in Leistungsklassen größerer Mehrfamilienhäuser, nicht aber in kleineren Wohngebäuden einsetzbar.

### 2.2.1 Verbrennungsmotor

Klein-KWK-Anlagen auf Basis eines Verbrennungsmotors (VM) sind die mit Abstand am häufigsten installierten KWK-Anlagen im kleineren Leistungsbereich. Bei verbrennungsmotorischen BHKW treibt der Motor einen Generator zur Stromerzeugung an. Die beim Verbrennungsprozess frei werdende Wärme, hauptsächlich aus Motor und Abgas, wird über einen Wärmetauscher dem Heizsystem zugeführt. Da der VM in der Automobilindustrie kontinuierlich verbessert wurde, sind verbrennungsmotorische BHKW im Vergleich zu den anderen KWK-Technologien deutlich weiter entwickelt. Verbrennungsmotorische BHKW werden in nahezu allen Leistungsklassen von mehreren Megawatt bis zu einem Kilowatt verkauft. Positiv hervorzuheben ist zudem die Stromkennzahl, die zwischen 0,35 und größer 1 liegt und mit der Anlagengröße steigt.

Im Mini-BHKW-Bereich gibt es momentan zwei Hersteller, welche nennenswerte Absatzzahlen aufweisen können: Das Vaillant ecoPOWER 4.7 [VAI 11-a] und den SenerTec Dachs [SEN 09]. Durch eine

variable Motordrehzahl und einen an den Generator angeschlossenen Umrichter kann das ecoPOWER 4.7 modulierend betrieben werden und folglich alle elektrischen Leistungen zwischen 1,3 und 4,7 kW stufenlos erzeugen. Der Dachs hingegen hat eine konstante elektrische Leistung von 5,5 kW. Er ist mit über 30.000 Geräten [SEN 13] das meist verkaufte Mini-BHKW.

Festzuhalten ist, dass das ecoPOWER 4.7 und der Dachs mit jeweils mindestens 12,5 kW thermischer Leistung in Ein- und Zweifamilienhäusern nicht genügend Vollbenutzungsstunden erreichen, um unter den heutigen Förderbedingungen (vgl. 2.3.3) wirtschaftlich betrieben werden zu können. Aufgrund der hohen elektrischen Nennleistung und der fehlenden Modulationsfähigkeit wird insbesondere beim Dachs der meiste Strom in das öffentliche Netz eingespeist (vgl. Abbildung 2-13) und steht somit nicht zur Selbstversorgung zur Verfügung.

Für den Mikro-KWK-Bereich ist seit wenigen Jahren das ecoPOWER 1.0 [VAI 11-b] von Vaillant verfügbar. Es ist das kleinste verbrennungsmotorische BHKW und baut auf dem Honda ecowill auf, das in Japan bereits über 100.000 Mal verkauft wurde [HON 13]. Das für den deutschen Markt modifizierte ecoPOWER 1.0 hat eine elektrische Leistung von 1 kW bei 2,5 kW thermischer Leistung. Laut Hersteller ist das Gerät für Ein- und Zweifamilienhäusern ab einem Wärmebedarf von 15.000 kWh einsetzbar. [VAI 11-b] Aufgrund der im Vergleich zum Gesamtwärmebedarf sehr geringen thermischen Nennleistung ist ein zusätzlicher Spitzenlastkessel jedoch unabdingbar.

### 2.2.2 Stirlingmotor

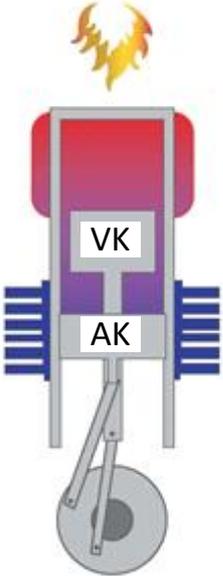
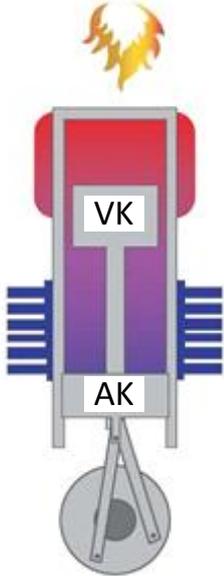
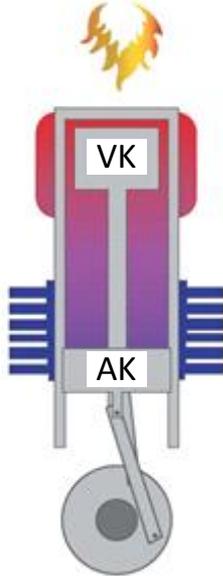
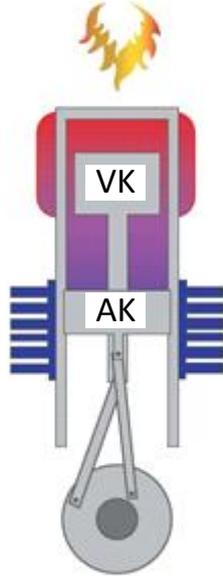
Stirlingmotoren (SM) sind Wärmekraftmaschinen, die Wärme in mechanische Energie bzw. durch einen angeschlossenen Generator in elektrische Energie umwandeln. Durch kontinuierliche Wärmezufuhr und -abfuhr an zwei unterschiedlichen Stellen eines Zylinders wird eine Druckdifferenz aufgebaut, die ein Arbeitskolben (AK) in mechanische Energie umformt. Neben dem AK bestehen Stirlingmotoren aus einem Verdrängerkolben (VK), der das Arbeitsgas zwischen warmer und kalter Seite verschiebt. In der beta-Konfiguration befinden sich beide Kolben in einem Zylinder. Bei vielen kleinen Stirlingmotoren ist der VK zugleich ein Kurzzeitwärmespeicher, ein sogenannter Regenerator.

Der SM basiert auf dem idealen Stirlingkreisprozess, welcher aus zwei Isothermen und zwei Isochoren (Abbildung 2-3) besteht. Der (theoretische) Wirkungsgrad dieses Kreisprozesses entspricht dem Carnotwirkungsgrad:

$$\eta_{Stirling,theo.} = \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{kalt}}{T_{heiß}} \quad (2.1)$$

Abbildung 2-3 zeigt die einzelnen Takte des idealisierten Stirlingkreisprozesses sowie die Zustandsänderungen im T-S und p-V-Diagramm.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Eine ausführliche Beschreibung der Kreisprozesse der anderen KWK-Technologien findet sich beispielsweise in Werner [WER 04].

1. Takt: 1 → 2	2. Takt: 2 → 3	3. Takt: 3 → 4	4. Takt: 4 → 1
<b>Isotherme Expansion</b>	<b>Isochore Abkühlung</b>	<b>Isotherme Kompression</b>	<b>Isochore Erwärmung</b>
Durch die Wärmezufuhr expandiert das Arbeitsgas. Der Arbeitskolben bewegt sich nach unten.	Das Arbeitsgas strömt am Verdrängerkolben vorbei und gibt dabei Wärme an den Regenerator ab. Dabei sinkt die Temperatur des Arbeitskolbens.	Der sich nach oben bewegende Kolben verdichtet das Arbeitsgas. Durch Wärmeabgabe nach außen bleibt die Temperatur des Arbeitsgases konstant.	Das Arbeitsgas strömt am Verdrängerkolben vorbei und nimmt dabei die im Regenerator gespeicherte Wärme auf. Die Temperatur des Arbeitsgases steigt an.
			

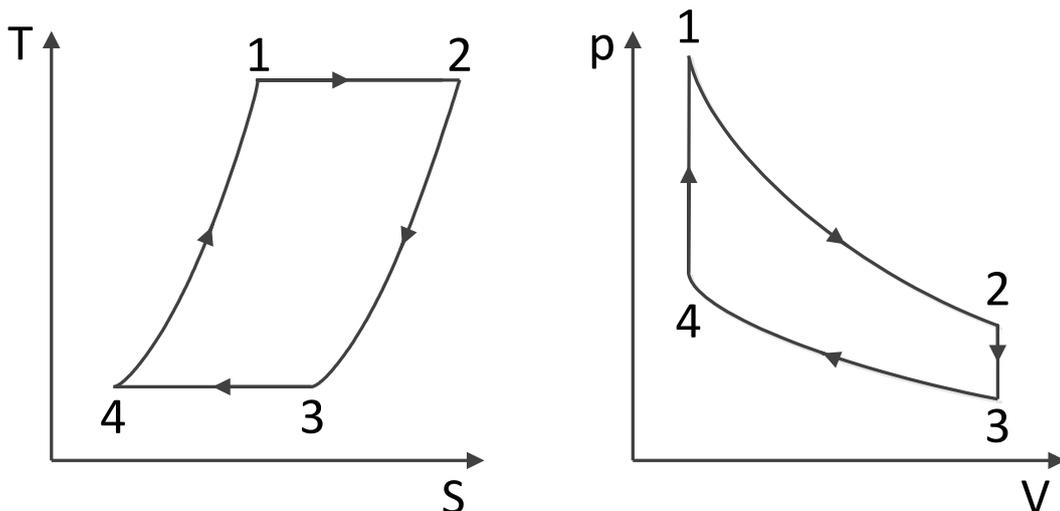


Abbildung 2-3: Zustandsänderungen im idealisierten Stirlingkreisprozess, Abbildung nach [REM 13]

Aufgrund der äußeren Verbrennung eignen sich nahezu alle Brennstoffe für den Einsatz in einem Stirlingmotor. Darüber hinaus sind die Wartungskosten im Vergleich zu den verbrennungsmotorischen BHKW deutlich niedriger. Während bei VM mindestens einmal im Jahr eine Komplettwartung inklusive

Ölwechsel, Zündkerzentausch, Luftfilterwechsel, etc. durchgeführt werden muss, ist der Wartungsaufwand eines SM vergleichbar mit dem einer normalen Gasheizung. Einschränkend auf den Betrieb wirkt sich dagegen die Trägheit beim Lastwechsel aus, was bei den meisten Geräten die Möglichkeit eines Modulationsbetriebs verhindert.

Der momentane Vorsprung der Stirlingmotoren gegenüber VM im kleinsten Leistungsbereich hat drei Gründe. Erstens fallen die Wartungskosten im kleinen Leistungsbereich deutlich mehr ins Gewicht als bei größeren Einheiten, weshalb der SM mit seinem geringen Wartungsbedarf positiv hervorsticht. Zweitens arbeiten Stirlingmotoren sehr leise. Drittens kann der Spitzenlastkessel zusammen mit dem SM in einem Gerät (Kombigerät) integriert werden. Dies ist durch den Wegfall eines zweiten Geräts nicht nur kostengünstiger, sondern auch einfacher in der hydraulischen Einbindung und damit platzsparend. Die im Vergleich zu VM sehr geringe Stromkennzahl fällt aufgrund der geringen Stromgrundlast in Ein- und Zweifamilienhäusern (vgl. Abbildung 2-13) und einem ähnlichen Verhältnis von Wärme- zu Stromverbrauch in diesem Bereich nicht zu stark ins Gewicht.

Nahezu alle Anbieter konventioneller Heizungstechnik haben eine Mikro-KWK-Anlage auf Stirlingbasis in ihrem Produktsortiment. Jedoch basieren alle Stirling Mikro-BHKW auf nur zwei unterschiedlichen Motoren: den Microgen und den Whispergen SM.



Abbildung 2-4: Microgen Stirlingmotor [VIE 13-a]



Abbildung 2-5: Whispergen Stirlingmotor [SAN 13]

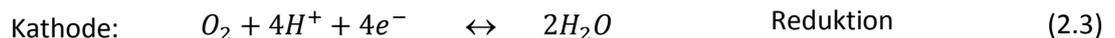
Der Microgen Stirlingmotor (Abbildung 2-4) wurde von der Microgen Engine Corporation [MIC 13] entwickelt und ist Bestandteil der meisten Stirling Mikro-KWK-Anlagen (Remeha, Vaillant, SenerTec, Brötje, Viessmann). Diese unterscheiden sich voneinander im Hinblick auf die Steuerung, den integrierten Spitzenlastkessel und den eingesetzten Speicher. Der Microgen Stirlingmotor ist als Linear-Freikolben-SM ausgeführt und oszilliert mit der Netzfrequenz.

Der Whispergen (WG) Stirlingmotor wurde in Neuseeland im Jahr 1987 von der Firma WhisperTech entwickelt und wurde ab dem Jahr 2010 durch das Joint Venture EHE (Efficient Home Energy) in Europa vertrieben. Ende 2012 hat EHE und in der Folge (Anfang des Jahres 2013) auch der deutsche Distributor

sanevo Insolvenz angemeldet. Der Whispergen Motor besteht aus vier 90° phasenverschobenen Zylindern (Abbildung 2-5). Die Auf- und Abbewegung der einzelnen Zylinder wird über eine Drehscheibe („Wobble Yoke“) in eine radiale Bewegung übersetzt, welche mit einem Generator in elektrische Energie umgewandelt wird.

### 2.2.3 Brennstoffzelle

Brennstoffzellen (BSZ; engl. Fuel Cell: FC) basieren auf der direkten Umwandlung von chemischer Energie in Strom und Wärme. Sie bestehen aus zwei Elektroden (Anode und Kathode), die durch einen Elektrolyten oder eine semipermeable Membran voneinander getrennt sind. Der Brennstoff Wasserstoff wird an der Anode oxidiert, während auf der Kathodenseite die Reduktion erfolgt. Aus den an der Reaktion beteiligten Edukten Wasserstoff und Sauerstoff entsteht reines Wasser:



Es gibt verschiedene Typen von BSZ, die unterschiedliche Elektrolyten, mobile Ionen und Temperaturniveaus aufweisen. Für stationäre KWK-Anwendungen sind insbesondere die Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEFC) sowie die Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) von Interesse. PEFC arbeiten in einem Temperaturniveau zwischen 60 °C und 120 °C und werden deshalb als Niedertemperatur(NT)-BSZ bezeichnet. Der Arbeitspunkt von SOFC liegt bei 650 °C bis 1000 °C, weshalb sie zu den Hochtemperatur(HT)-BSZ gezählt werden.

Das Temperaturniveau hat einen starken Einfluss auf die Betriebsstrategie der BSZ. Während NT-BSZ immer einen vorgeschalteten Reformer für die Erzeugung eines wasserstoffreichen Synthesegases aus Erdgas benötigen, können manche HT-BSZ direkt mit Erdgas versorgt werden. Allerdings ist die Modulationsfähigkeit aufgrund des hohen Temperaturniveaus bei den SOFC stark eingeschränkt. NT-BSZ eignen sich hingegen besser für Teillast- oder Lastfolgebetrieb.

Wegen der direkten Umwandlung von chemischer Energie in Wärme und Strom sind BSZ erstens sehr leise und unterliegen zweitens nicht dem Carnot-Wirkungsgrad, wodurch sie im Vergleich zu den anderen KWK-Technologien deutlich höhere elektrische Wirkungsgrade und somit eine hohe Stromkennzahl erreichen können. Jedoch sind Brennstoffzellen im Vergleich zu den anderen Mikro-KWK-Technologien noch sehr teuer in der Anschaffung, weshalb viele Hersteller und Forschungsinstitute an der Reduktion der Kosten, aber auch an der Langzeitstabilität arbeiten. Zusätzlich werden positive Synergien aus den Forschungsaktivitäten der BSZ-Mobilität erhofft. [BAD 13], [ECKL 07], [FFE 07], [CAL 13]

#### 2.2.4 Zwischenbilanz zu den Mikro-KWK-Technologien

Unter Berücksichtigung der Wärmeleistung kommen für Ein- und Zweifamilienhäuser vor allem Verbrennungs- und Stirlingmotoren sowie Brennstoffzellen in Frage. Neben feststehenden Kriterien (v.a. Preis, Leistung, Wirkungsgrad, Stromkennzahl) sind für die Wahl einer KWK-Technologie weitere Merkmale ausschlaggebend: Einbaugröße, Lautstärke, Modulationsfähigkeit, vorhandene Infrastruktur. Ferner gilt es Unterschiede zwischen den verschiedenen Herstellern hinsichtlich Betriebsführung (monovalent, bivalent) und Regelstrategie (Wärme- und/oder Stromführung) zu berücksichtigen.

Festhalten lässt sich, dass keine Technologie als klarer Favorit hervorsticht, sondern je nach Bedarf und Rahmenbedingungen eine passende Technologie gefunden werden muss, aber auch gefunden werden kann: Aufgrund der Varianz an Technologien und Leistungsklassen gibt es technisch gesehen für jeden Ein- und Zweifamilienhaustypus eine geeignete Mikro-KWK-Anlage. Anzumerken bleibt, dass im Zusammenhang dieser Arbeit mit Stirlingmotor gearbeitet wurde; dennoch sind die angestellten Betrachtungen auf die beiden anderen gängigen KWK-Technologien übertragbar.

### 2.3 Ökologie und Ökonomie

Wie nachfolgend näher ausgeführt werden wird, zeichnen sich KWK-Anlagen im Mini- und Mikro-Bereich durch eine hohe Effizienz aus. Die Effizienz von KWK-Anlagen wird in aller Regel recht undifferenziert vorausgesetzt: Beispielsweise werden Effizienz-Kriterien, welche die Primärenergieeinsparung betreffen, mit jenen, die auf CO<sub>2</sub>-Emissionswerte abzielen, unzulässig „in einen Topf geworfen“. Wie sich zeigen wird, kann zu Recht auf eine hohe Effizienz von Mini- und Mikro-KWK-Anlagen geschlossen werden – und das unabhängig von den zum Vergleich herangezogenen Referenzsystemen und -technologien.

Die Effizienz von KWK-Anlagen auch im Mini- und Mikro-Bereich ist gesondert hervorzuheben, da sich Gründe, die für die Anschaffung einer solchen Anlage sprechen, nicht ohne weiteres aus Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ableiten lassen. Hinzuzuziehen ist ferner eine Betrachtung der möglichen lokal auftretenden Schadstoffemissionen, welche spätestens im Falle einer zunehmenden Verbreitung der Technologie, etwa unter verbesserten Wirtschaftlichkeitsbedingungen, bedeutsam werden wird.

#### 2.3.1 Effizienz

Anlagen, die auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung betrieben werden, produzieren zeitgleich Wärme und Strom. Da diese beiden Energieformen in der KWK genutzt werden können, ist sie in der Regel effizienter als die getrennte Erzeugung von Wärme und Strom. Eine für KWK-Anlagen wichtige Größe ist die in Formel (2.8) definierte Stromkennzahl  $\sigma$ . Sie ist der Quotient aus elektrischer und thermischer Leistung bzw. der Quotient aus dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad. Für alle Anlagen, die mit KWK betrieben werden, gilt:

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{Gas}} \quad (2.5)$$

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{Gas}} \quad (2.6)$$

$$\eta_{ges} = \frac{P_{th} + P_{el}}{P_{Gas}} = \eta_{th} + \eta_{el} \quad (2.7)$$

$$\sigma = \frac{P_{el}}{P_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (2.8)$$

Um die Effizienz von KWK-Anlagen jener der getrennten Erzeugung gegenüberstellen zu können, wird im Allgemeinen die „Hocheffizienzrichtlinie der EU“ [EU 04] herangezogen. Davon ausgehend lässt sich die Primärenergieeinsparung (PEE) von KWK-Anlagen im Vergleich zu den gewählten Referenzsystemen wie folgt berechnen [BAFA 13-b]:<sup>9</sup>

$$PEE = \left( 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{KWK,th}}{\eta_{Ref,th}} + \frac{\eta_{KWK,el}}{\eta_{Ref,el}}} \right) \times 100\% \quad (2.9)$$

Die Anlageneffizienz wird hauptsächlich von den beiden KWK-Einzelwirkungsgraden und den gewählten Referenzsystemen bestimmt. Als Referenz sollte die „beste verfügbare Technik“ (BVT) dienen. Für den Brennstoff Erdgas sind das beispielsweise Gasbrennwertgeräte bzw. Gas- und Dampfturbinenkraftwerke.

Um die Einflüsse der Einzelwirkungsgrade des KWK-Systems und der Referenzsysteme aufzuzeigen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 2-6 zu sehen sind. Mittels der in Abbildung 2-6 oben aufgeführten Wirkungsgrade wurde der Ausgangspunkt für die Sensitivitätsanalyse berechnet. Für diesen ergibt sich mit Formel (2.9) eine Primärenergieeinsparung von 12,74 %. Anschließend wurde jeweils ein Wirkungsgrad auf seine PEE-Sensitivität hin überprüft. Dafür wurde der Parameter prozentual (in diesem Beispiel bis zu 20 %) erhöht bzw. gesenkt und die resultierende PEE berechnet. Es zeigt sich, dass mit steigenden Einzelwirkungsgraden der KWK-Anlage auch die PEE steigt und vice versa. Zudem sinkt die PEE bei Verwendung eines Referenzsystems mit höheren Einzelwirkungsgraden. Da im Allgemeinen der elektrische Referenzwirkungsgrad kleiner ist als der thermische, steigt die PEE bei KWK-Anlagen mit höheren Stromkennzahlen.

<sup>9</sup> Diese Formel beinhaltet nicht die vermiedenen Netzverluste. Das BAFA beispielsweise verwendet beim Nachweis der Hocheffizienz einen Korrekturfaktor, der die Netzverluste mit einrechnet [BAFA 13-b].

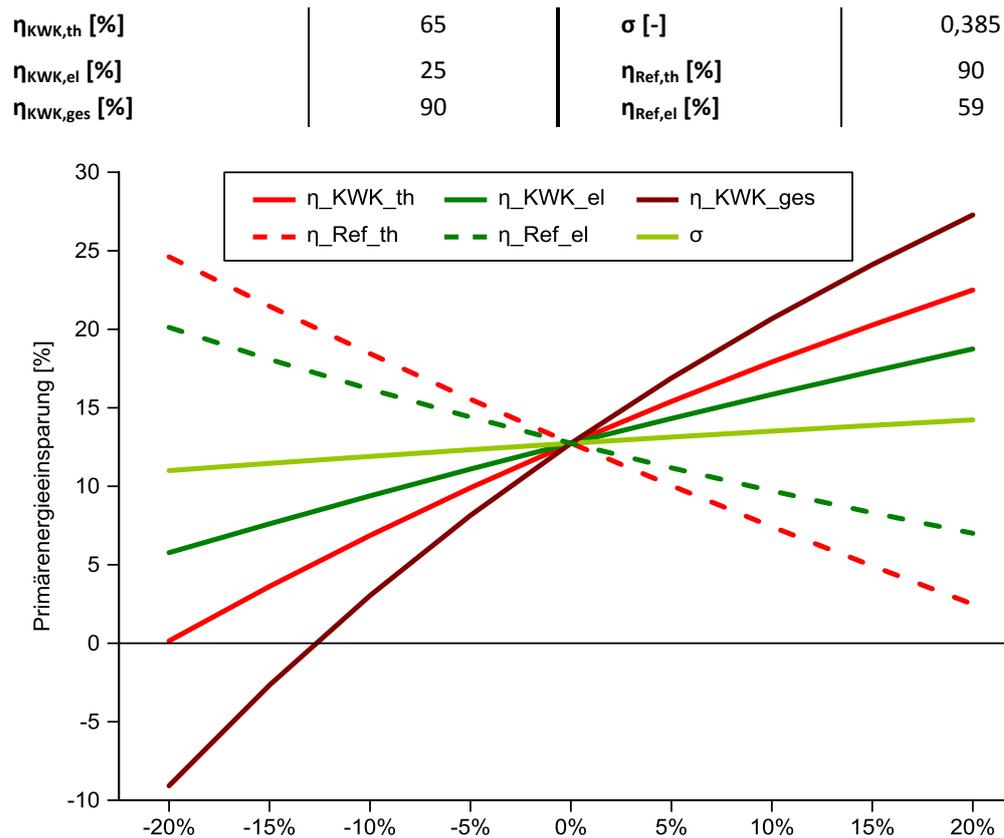


Abbildung 2-6: Einfluss der BHKW- und der Referenzwirkungsgrade auf die Primärenergieeinsparung

Sensitivitätsanalysen zeigen den Einfluss verschiedener Eingangsparameter auf eine gewählte Kennzahl (in diesem Beispiel die PEE). Allgemein wird diese Analyseform bei kleinen Änderungen der Eingangsparameter herangezogen. Im Falle der PEE von KWK-Anlagen können die Eingangsparameter jedoch sehr stark variieren. Zusätzlich ist die Variation der in diesem Beispiel gewählten Parameter untereinander sehr ausgeprägt. So werden thermische Referenzsysteme in aller Regel nicht mehr als 22 % schlechter als die BVT sein (z.B. veralteter Gaskessel), während elektrische Referenzsysteme einen bis zu 50 % kleineren Wirkungsgrad haben können (z.B. Gasturbine). Ein großer Unterschied besteht auch bei der Stromkennzahl, welche je nach Technologie sowohl deutlich kleiner als auch sehr viel größer als 0,385 sein kann.

Neben der Primärenergieeinsparung sind auch die  $\text{CO}_2$ -Emissionen ein relevantes Effizienzkriterium. Werden die  $\text{CO}_2$ -Emissionen von KWK-Anlagen der ungekoppelten Erzeugung gegenübergestellt, gibt es nach Arndt [ARN 08] drei Varianten der Stromerzeugung, die herangezogen werden können (hier: für den Fall Deutschland):

- Deutscher Strommix
- Beste verfügbare Technik: GuD-Kraftwerk
- Verdrängungsmix durch die Einspeisung von KWK-Strom

Die gängigste Variante ist der deutsche Strommix. Laut der ersten Schätzung von statista [STA 13] lag der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor in Deutschland im Jahr 2012 bei 576 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh. Trotz des sich in den letzten beiden Jahren aufgrund der sukzessiven Abschaltung von Kernkraftwerken und der dadurch gestiegenen Stromproduktion aus Kohle erhöhenden Emissionsfaktors, wird die CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromerzeugung im Zuge des weiteren Ausbaus von EE-Anlagen langfristig sinken. Insofern kann auch die Nutzung von KWK-Anlagen auf lange Sicht nicht mehr zu einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen.

Vergleicht man hingegen den Neubau von Erdgas-Kraftwerken mit dem von Erdgas-KWK-Anlagen, sollte als Referenz die BVT dienen: Bei einem Erdgas-GuD-Kraftwerk beträgt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß 386 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh<sup>10</sup>, also deutlich weniger als beim Strommix, womit KWK-Anlagen mittelfristig nichts zur CO<sub>2</sub>-Minderung beitragen können.

Für die Bewertung von KWK-Anlagen als planbare Stromerzeuger erscheint der Verdrängungsmix im Sinne einer „anteiligen Verdrängung der zu jeder Stunde vorzufindenden energieträgerspezifischen Kraftwerksleistung durch KWK-Strom“ ([ARN 08], S. 27) am sinnvollsten. Laufen KWK-Anlagen immer bei niedriger EE-Einspeisung, ist die CO<sub>2</sub>-Intensität der Referenzstromerzeugung hoch und die KWK-Anlagen im Vergleich effizient.

Neben den betrachteten drei Varianten der Stromerzeugung lassen sich KWK-Anlagen auch mit Gasturbinen (GT) vergleichen, sofern sie als Spitzenlastkraftwerke genutzt werden. Gasturbinen haben einen verhältnismäßig geringen Wirkungsgrad ( $\eta_{el} = 38\%$ ; [KUHN 12]), weshalb KWK-Anlagen in diesem Vergleichsszenario in einem sehr guten Licht erscheinen.

Abbildung 2-7 zeigt die CO<sub>2</sub>-Reduktion verschiedener Mikro-KWK-Technologien (Wärmereferenz: Erdgas-Brennwertgerät:  $\eta_{th} = 95\%$ ) bei unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Referenzemissionen. Deutlich wird, dass bei hoher CO<sub>2</sub>-Intensität die Brennstoffzelle aufgrund des höchsten elektrischen Wirkungsgrads am meisten CO<sub>2</sub> einspart. Jedoch emittiert die Brennstoffzelle schon bei 330 (und weniger) g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh mehr CO<sub>2</sub> als die getrennte Erzeugung. Da das Stirlingmotor-BHKW die kleinste Stromkennzahl der drei untersuchten KWK-Technologien aufweist, ist bei diesem die CO<sub>2</sub>-Reduktion bei hoher CO<sub>2</sub>-Intensität des Referenzsystems am geringsten. Aufgrund des höchsten Gesamtwirkungsgrades emittiert es im Gegensatz zur Brennstoffzelle noch bei einer Referenz von 250 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh weniger CO<sub>2</sub>. Beim Verbrennungsmotor, der dritten betrachteten Mikro-KWK-Technologie neben Brennstoffzelle und Stirlingmotor, liegen in diesem Beispiel sowohl die Stromkennzahl als auch der Gesamtwirkungsgrad und demnach die CO<sub>2</sub>-Reduktionskurve jeweils zwischen den Werten der beiden anderen Technologien.

Zusätzlich lässt sich aus Abbildung 2-7 die CO<sub>2</sub>-Reduktion der KWK-Technologien gegenüber dem aktuellen Strommix, den GuD- sowie GT-Kraftwerken entnehmen. Trotz Vernachlässigung der auftretenden Netzverluste schneiden die KWK-Anlagen in allen betrachteten Fällen besser ab.

---

<sup>10</sup> Wirkungsgrad des GuD-Kraftwerks: 59 % [KUHN 12], CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung von Erdgas inklusive Energiebereitstellung: 228 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh [IIN 13].

	$\dot{Q}_{th}$ [kW]	$P_{el}$ [kW]	$P_{Gas}$ [kW]	$\sigma$ [-]	$\eta_{th}$ [%]	$\eta_{el}$ [%]	$\eta_{ges}$ [%]
Stirlingmotor	8,0	1,0	9,5	0,125	84,2	10,5	94,7
Verbrennungsmotor	2,5	1,0	3,8	0,400	65,8	26,3	92,1
Brennstoffzelle	1,0	1,0	2,5	1,00	40,0	40,0	80,0

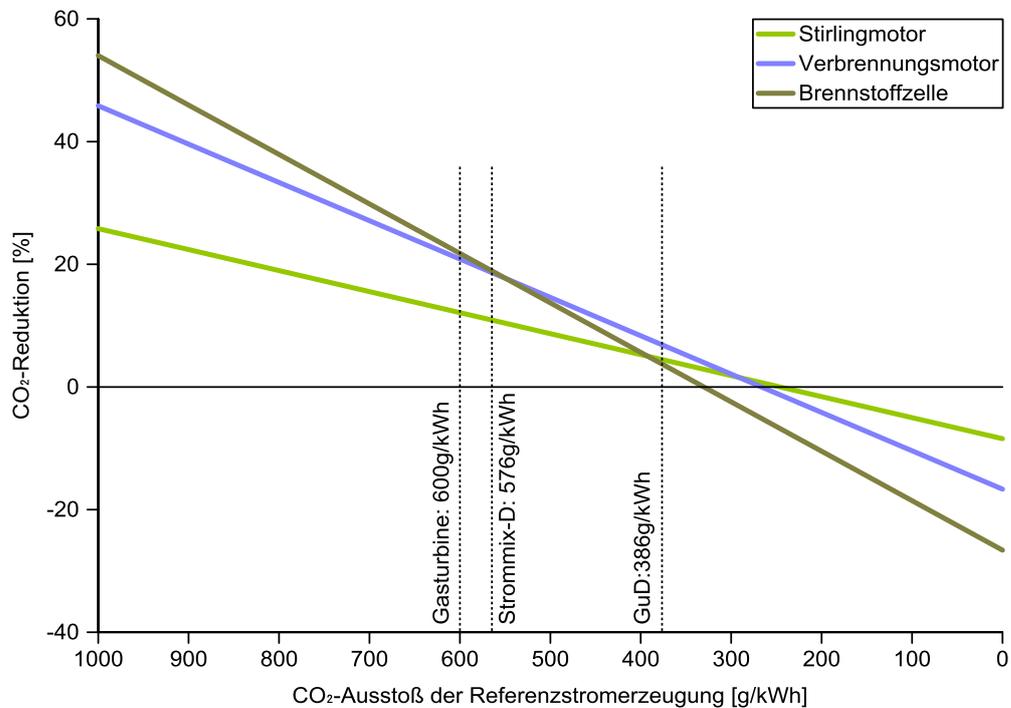


Abbildung 2-7: CO<sub>2</sub>-Reduktion verschiedener KWK-Anlagen in Abhängigkeit von der Referenzstromerzeugung

### 2.3.2 Schadstoffemissionen

Neben den klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen gilt es für die verschiedenen KWK-Technologien auch den Ausstoß weiterer Emissionen (Staub, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeloxide) zu betrachten. Im Unterschied zu den konventionellen Stromerzeugern entstehen bei Mikro-KWK-Anlagen die Emissionen lokal, also direkt vor Ort. Da Staub- und Schwefeloxid-Emissionen bei erdgasbasierten KWK-Anlagen „praktisch keine Rolle spielen“ ([ASUE 10], S. 9), liegt der Fokus im Folgenden auf den Kohlenmonoxid- (CO) und Stickstoff- (NO<sub>x</sub>) Emissionen.

Obwohl nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG, [BIM 13]) KWK-Anlagen erst ab einer Feuerwärmeleistung größer 1 MW genehmigungspflichtig sind, werden die dort aufgeführten Grenzwerte auch für Kleinanlagen als technischer Stand vorausgesetzt und manchen Förderungsprogrammen zugrunde gelegt (z.B. Mini-KWK-Impulsprogramm [BMU 08]). Die maximalen Schadstoffemissionen für Klein-BHKW werden meist der „Technische(n) Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (TA-Luft: [TAL 02]), einer Verwaltungsvorschrift des BImSchG, entnommen. Die Schadstoffgrenzwerte der TA-Luft gelten u.a. für verbrennungsmotorische BHKW und Gasturbinen,

wobei die VM in Magergasmotoren<sup>11</sup> und sonstige Viertakt-Ottomotoren unterschieden werden. Emissionsgrenzen für andere KWK-Technologien schreibt die TA-Luft hingegen nicht vor. Tabelle 2-2 fasst die Schadstoffgrenzwerte nach der TA-Luft zusammen.

**Tabelle 2-2: Schadstoffgrenzwerte nach der TA-Luft [TAL 02], bezogen auf 5 % Restsauerstoff im Abgas**

	VM-Magerbetrieb	VM-3-Wege-Katalysator	Gasturbine
CO [mg/m <sup>3</sup> ]	300	300	100
NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	500	250	75

Thomas [THO 07] untersuchte u.a. die Schadstoffemissionen des SenerTec Dachs, des Vaillant ecoPOWER 4.7 und des SOLO-Stirling-161<sup>12</sup> und konnte zeigen, dass die CO-Emissionen sowohl des Dachs aufgrund des Magerbetriebs und des verwendeten Oxidationskatalysators als auch des ecoPOWER 4.7 (mit integriertem 3-Wege-Abgaskatalysator<sup>13</sup>) vernachlässigbar klein sind. Das modulierende SOLO-Stirling-161 emittiert bei Volllast 191 mg<sub>CO</sub>/m<sup>3</sup> und liegt demnach trotz des Fehlens eines zusätzlichen Katalysators deutlich unter dem CO-Grenzwert der TA-Luft.

Die NO<sub>x</sub>-Kriterien kann der Dachs jedoch nicht einhalten. Er emittiert 550 mg/m<sup>3</sup>, während die NO<sub>x</sub>-Emissionen der beiden anderen gemessenen BHKW deutlich niedriger sind (SOLO-Stirling BHKW 105 mg/m<sup>3</sup>, ecoPOWER 4.7: 8 mg/m<sup>3</sup>). Thomas hält fest, dass „Ottomotor-BHKW immer (...) mit einem Katalysator zur Abgasnachbehandlung ausgerüstet sein müssen, während Stirlingmotor-BHKW (...) aufgrund der schadgasarmen äußeren Verbrennung ohne Katalysator auskommen“ ([THO 07], S. 251).

Krewitt et al. [KRE 04] dokumentieren ebenfalls sehr geringe Schadstoffemissionen für stirlingmotorbetriebene Mikro-BHKW. Die CO-Emissionen des Stirling BHKW liegen bei 2 mg/MJ<sub>in</sub><sup>14</sup> und die NO<sub>x</sub>-Emissionen bei 6,7 mg/MJ<sub>in</sub>, also sogar unter denen eines Gasbrennwertgeräts (14 mg<sub>CO</sub>/MJ<sub>in</sub> bzw. 22 mg<sub>NO<sub>x</sub></sub>/MJ<sub>in</sub>). Die Schadstoffemissionen des erdgasbetriebenen Motor-BHKW liegen dagegen bei 63 mg<sub>CO</sub>/MJ<sub>in</sub> sowie bei 52,3 mg<sub>NO<sub>x</sub></sub>/MJ<sub>in</sub>.

Teilweise deutlich höhere Schadstoffemissionen als die von Thomas gemessenen finden sich auf [www.bhkw-prinz.de](http://www.bhkw-prinz.de) [BHP 14], einer Informationsseite, die Auskunft über die verschiedenen KWK-Technologien, BHKW-Hersteller und -Geräte gibt. Die dort aufgeführten Emissionswerte des

<sup>11</sup> Bei Magergasmotoren wird ein Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  deutlich größer als bei stöchiometrischer Verbrennung ( $\lambda = 1$ ) gewählt. Die dadurch verminderte Verbrennungstemperatur reduziert die Stickoxidbildung. Zur Verringerung der CO- und Kohlenwasserstoff-Emissionen werden Magermotoren mit Oxidationskatalysatoren ausgerüstet.

<sup>12</sup> Die Solo Stirling GmbH ging 2007 insolvent. 2008 wurden die Rechte des BHKW an die schwedische Cleanenergy AB übertragen. Seit 2009 wurde die KWK-Anlage von Cleanenergy weiterentwickelt und ist mittlerweile als „Cleanenergy C9G“ [CLE 14] auf dem deutschen Markt erhältlich [BHKW 14-b] und wird auch auf der BAFA-Liste [BAFA 14-b], die alle förderfähigen Mini-KWK-Anlagen bis einschließlich 20 kW<sub>el</sub> enthält, geführt.

<sup>13</sup> 3-Wege-Katalysatoren können Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe gleichzeitig reduzieren.

<sup>14</sup> Bei reinen Wärmeerzeugern werden die Schadstoffemissionen auf die zugeführte Energie bezogen. Da Krewitt et al. [KRE 04] die verschiedenen KWK-Technologien konventionellen Wärmeerzeugern gegenüberstellt, findet sich in seiner Arbeit die Einheit mg/MJ<sub>in</sub>.

SenerTec Dachs liegen bei  $22 \text{ mg}_{\text{CO}}/\text{m}^3$  und  $349 \text{ mg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$  und erfüllen demnach die Anforderung der TA-Luft. Die angegebenen Emissionen des ecoPOWER 4.7 sind mit  $115 \text{ mg}_{\text{CO}}/\text{m}^3$  und  $50 \text{ mg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$  beziffert, also deutlich höher als bei Thomas. Auf dieser Seite finden sich auch die Schadstoffemissionen der Capstone C30 Mikro-Gasturbine. Diese emittiert demnach weniger als  $50 \text{ mg}_{\text{CO}}/\text{m}^3$  und  $19 \text{ mg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$ , erfüllt demnach die verstärkten Anforderungen der TA-Luft für Gasturbinen und emittiert weniger Schadstoffe als VM-BHKW.

Einen guten Überblick über die Schadstoffemissionen von VM-BHKW findet sich auch in der Überarbeitung der Vergaberichtlinien für das Umweltzeichen „Blauer Engel“ [IÖW 12]. Die mittleren CO-Emissionen von erdgasbetriebenen BHKW bis 50 kW betragen  $183 \text{ mg}/\text{m}_n^3$ , variieren jedoch zwischen  $3 \text{ mg}/\text{m}_n^3$  und  $550 \text{ mg}/\text{m}_n^3$ . Die Stickoxid-Emissionen der 48 betrachteten Anlagen liegen laut [IÖW 12] zwischen 50 und  $500 \text{ mg}/\text{m}_n^3$  (Mittelwert:  $203 \text{ mg}/\text{m}_n^3$ ). Es kann festgehalten werden, dass die meisten VM-BHKW die Schadstoffgrenze nach TA-Luft unterbieten. Jedoch ist die Streuung der einzelnen Anlagen sehr hoch.

Wegen der direkten Umwandlung von Wasserstoff und Sauerstoff haben BSZ keine lokalen Schadstoffemissionen. Werner [WER 04] addiert die  $\text{NO}_x$ - oder CO-Emissionen einer vorgelagerten Erdgasreformierung und errechnet Schadstoffemissionen von  $9,6 \text{ mg}_{\text{CO}}/\text{kWh}$  bzw.  $4,4 \text{ mg}_{\text{NO}_x}/\text{kWh}$ , was im Vergleich zu den andern KWK-Technologien vernachlässigbar wenig ist. Höhle et al. [HÖH 09] analysieren die Schadstoffe von BSZ-Systemen im Detail und kommen dabei zum Schluss, dass das „PEFC-BHKW bei den durch die TA-Luft limitierten Schadstoffen am besten ab(schneidet)“ ([HÖH 09], S. 102). Des Weiteren wird angeführt, dass in einem PEFC-KWK-System mehr lokale Emissionen vom SLK als von der BSZ stammen.

Für die in dieser Arbeit relevanten Mikro-KWK-Anlagen lassen sich weder in der gängigen Fachliteratur noch bei den Herstellern Hinweise auf die Schadstoffemissionen dieser Leistungsklasse finden. Deshalb muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass ein massiver Ausbau von verbrennungsmotorischen Mikro-KWK-Anlagen im Vergleich zu modernen Gasbrennwertgeräten das Risiko eines möglichen Anstiegs der lokalen Schadstoffe (Kohlenmonoxid und Stickoxide) in sich birgt. Bei einem vermehrten Einsatz von SM oder BSZ würden die lokalen Emissionen hingegen annähernd konstant bleiben oder im Falle von BSZ-Systemen sogar vermindert werden. Zudem lässt sich technologieunabhängig feststellen, dass die Schadstoffemissionen auch stark vom Betriebsverhalten der KWK-Anlage abhängen. Häufiges Takten oder Modulationsbetrieb können erheblich höhere Schadstoffemissionen zur Folge haben [THO 07].

### 2.3.3 Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Anlagen

Für eine weite Verbreitung von Mikro-KWK-Anlagen sind die Kosten dieser Anlagen im Vergleich zu konventionellen Heiztechniken entscheidend. Da Mikro-KWK-Anlagen in der Anschaffung teurer sind als Heizkessel, müssen die Mehrausgaben an anderer Stelle hinzuverdient oder eingespart werden. Dafür gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Förderung oder Stromeigenverbrauch.

Für die (aktuelle) Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Anlagen ist insbesondere der Stromeigenverbrauch von großer Bedeutung. Pro Kilowattstunde selbstverbrauchten Stroms reduziert sich die Stromrechnung

des Anlagenbetreibers um 25,32 €ct [SWM 13-a]. Zusätzlich erhält der Anlagenbetreiber seit 2009 auch die KWK-Förderung [KWKG 09] für den selbstverbrauchten Strom, weshalb der Wert dieses Stroms mit knapp 31 €ct/kWh beziffert werden kann. Demgegenüber steht bei der Stromeinspeisung die Gesamtvergütung für den verkauften Strom, die sich aus dem „üblichen Preis“, also dem Mittelwert des EEX-Preises des letzten Quartals [BHKW 13-a], dem vermiedenen Netznutzungsentgelt ( $vNNE$ <sup>15</sup>) sowie der KWK-Förderung zusammensetzt. Addiert ergeben die drei Vergütungen ca. 10 €ct/kWh.

Grundlegend kann deshalb geschlussfolgert werden, dass Mikro-KWK-Systeme nur wirtschaftlich betrieben werden können, wenn diese erstens hohe Stromeigenverbrauchsquoten und zweitens eine lange Laufzeit aufweisen. Neben diesen beiden Parametern zeigt die folgende Beispielrechnung in Abbildung 2-8 die Sensitivitäten der anderen Faktoren, die für die Wirtschaftlichkeit einer Mikro-KWK-Anlage entscheiden sind. Alle nicht variierten Kostenbestandteile der Sensitivitätsanalyse sind in Tabelle A-2 im Anhang aufgelistet. Die sensitiven Parameter beruhen auf (realistischen) Annahmen und finden sich im oberen Bereich von Abbildung 2-8.

Die Grafik verdeutlicht, dass die aktuellen Bedingungen der KWK-Förderung und der für die Stromeinspeisung gezahlte „üblicher Preis“ den geringsten Einfluss auf die Anlagenwirtschaftlichkeit haben. Die Amortisationszeit verringert sich zudem bei steigenden Strompreisen und erhöht sich bei zunehmenden Gaspreisen. Demgegenüber stellen, wie bereits betont wurde, die Investitionsmehrkosten aufgrund ihrer stark negativen Steigung den Haupteinfluss auf die Wirtschaftlichkeit dar. Während die bereits erwähnten Parameter in der Planungsphase bekannt sind und in der Nutzungsphase (annähernd) konstant bleiben,<sup>16</sup> werden die jährliche Betriebsdauer und die Stromeigennutzungsquote mittels Erfahrungswerten bestimmt und können während der Nutzung Schwankungen unterliegen. Da diese beiden Werte für die Wirtschaftlichkeit entscheidend sind, sollten bei Anschaffung einer Mikro-KWK-Anlage eher vorsichtige Schätzungen zugrunde gelegt werden.

---

<sup>15</sup> Das vermiedene Netznutzungsentgelt ist eine zusätzliche Vergütung für KWK-Anlagen, da die dezentrale Einspeisung Netze und Umspannwerke entlastet. Wegen fehlender gesetzlicher Vorgaben zur Höhe der  $vNNE$  variiert das Entgelt, je nach Netzbetreiber, zwischen 0,05 €ct/kWh und 2 €ct/kWh.

<sup>16</sup> Ausnahme ist der „üblicher Preis“. Dieser variierte in den letzten Jahren zwischen 3 €ct/kWh und 5 €ct/kWh [BHKW 13-a].

<b>Laufzeit</b>	[h/a]	4.500
<b>Stromeigenverbrauch</b>	[%]	50
<b>KWK-Förderung [KWKG 09]</b>	[€ct/kWh <sub>erzeugt</sub> ]	5,41
<b>„üblicher Preis“ [BHKW 13-a]</b>	[€ct/kWh <sub>eingespeist</sub> ]	4,0
<b>Strompreis [SWM 13-a]</b>	[€ct/kWh]	25,32
<b>Gaspreis [SWM 13-b]</b>	[€ct/kWh]	5,39
<b>Investitionsmehrkosten</b>	[€]	8.000

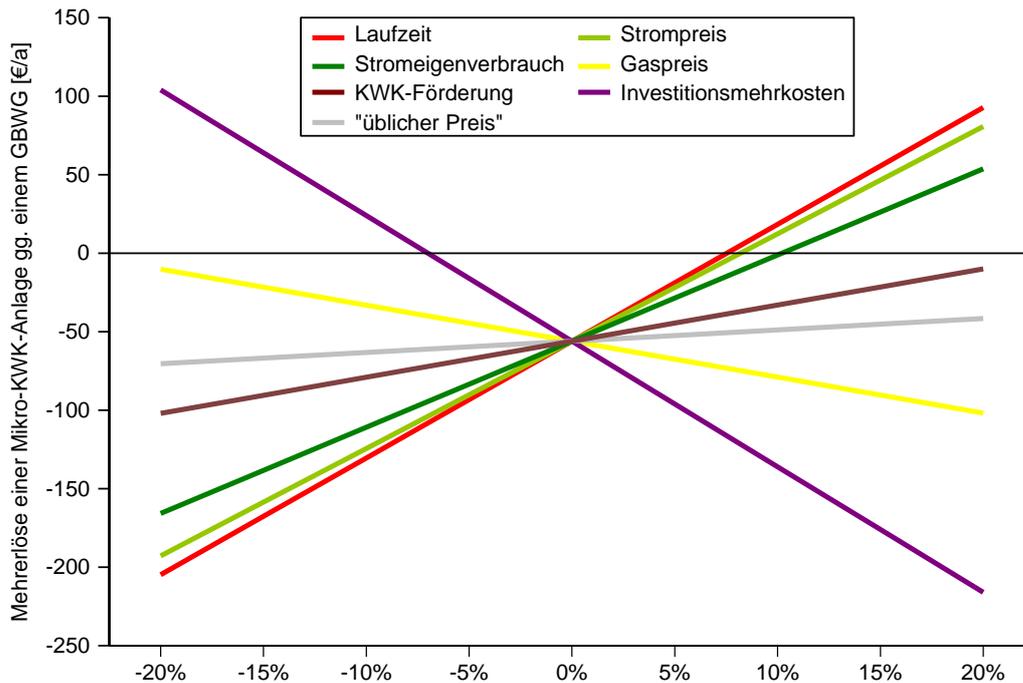


Abbildung 2-8: Sensitivitätsanalyse der Einflussgrößen auf den wirtschaftlichen Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen

## 2.4 Wärmespeicherung

Um Nachfragespitzen und -täler auszugleichen sowie häufiges An- und Ausschalten (Takten) zu vermeiden, werden in Mikro-BHKW-Systemen thermische Speicher eingesetzt. Als Speichermedium wird in nahezu allen Fällen Wasser verwendet. Im Fall von an Fernwärmesetze angeschlossenen Groß-KWK-Anlagen steht das Wasser unter Druck, so dass auch Temperaturen über 100 °C verwendet werden können [KOR 12]. Im Wohngebäudebereich werden die Speicher normalerweise mit maximal 95 °C betrieben. Neben der sensiblen Speicherung kann Wärme auch latent, also unter Nutzung des Phasenübergangs, oder chemisch durch Stoffanreicherung (Sorption) gespeichert werden. Latent- und Sorptionswärmespeicher besitzen aufgrund ihrer größeren Speicherkapazität zwar ein hohes Potenzial für eine flexible Stromproduktion im KWK-Bereich, sind allerdings (noch) nicht kommerziell verfügbar, weshalb sie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden.

Sensible Speicher können sowohl direkt als auch indirekt beladen werden. Bei der direkten Beladung strömt das Fluid vom Wärmeerzeuger in den Speicher und weiter zu den Verbrauchern. Indirekt

beladene Speicher werden über Wärmetauscher geladen, die sich in der Regel im Speicher befinden. Durch die Trennung des BHKW-Kreises von den Verbrauchern wird ein Mediaustausch verhindert. Bei Warmwasserspeichern (Frischwasser) und Solarspeichern (Kältemittel) ist diese Trennung zwingend notwendig. Bei Klein-KWK-Systemen ist eine Systemtrennung nicht unbedingt erforderlich, jedoch können sich bei fehlender Trennung Schmutzrückstände aus dem Heizkreis im Motorblock ablagern und diesen schädigen. Manche BHKW-Hersteller vermeiden dieses Problem, das bei der direkten Beladung auftreten kann, durch einen externen Wärmetauscher am BHKW. [BHKW 13-b], [HUHN 07]

#### 2.4.1 Warmwasserspeicher

Die einfachste hydraulische Einbindung von Mikro-KWK-Systemen zeigt Abbildung 2-9. Das Mikro-BHKW ersetzt den konventionellen Wärmeerzeuger und wird über eine hydraulische Weiche (nicht eingezeichnet) mit dem Heizkreis verbunden. Der Warmwasserspeicher wird bei Bedarf über den integrierten Wärmetauscher vorrangig geladen. Je nach Anzahl der Bewohner und geplantem Warmwasserverbrauch werden 150 bis 300 Liter Warmwasser in einem Einfamilienhaus vorgehalten.

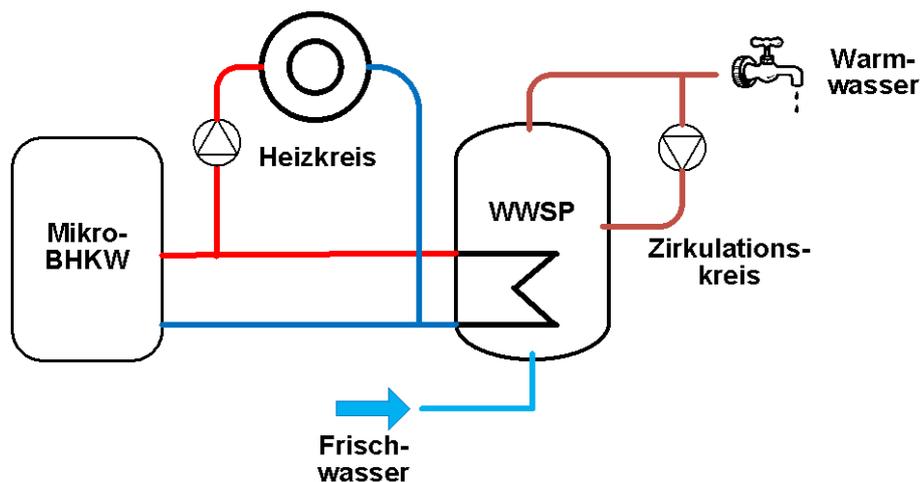


Abbildung 2-9: BHKW-Anlagenkonfiguration mit einem Warmwasserspeicher

Die Vorteile dieser Hydraulik sind die einfache Realisierung und die im Vergleich zu den anderen Systemen geringeren Kosten. In einem vorangegangenen Feldtest [LIPP 10] konnte gezeigt werden, dass in einer hydraulischen Konfiguration, in der das BHKW direkt mit dem Heizkreis verbunden ist, mit häufigem Takten zu rechnen ist und kein effizienter BHKW-Betrieb stattfindet.

#### 2.4.2 Pufferspeicher mit Warmwasserspeicher

Die im Klein-KWK-Bereich am häufigsten vorkommende hydraulische Konfiguration ist in Abbildung 2-10 zu sehen. Das BHKW ist direkt mit dem Speicher verbunden. Das warme Wasser fließt in den oberen Bereich des Speichers. Der BHKW-Rücklauf ist im unteren Bereich angebracht. Sollte ein zweiter Wärmeerzeuger, sprich ein SLK, installiert sein, lädt dieser meist parallel zum BHKW den Speicher. Weil

das BHKW die Hauptwärmeversorgung sicherstellt, liegen die Speicheranschlüsse des SLK zwischen den BHKW-Anschlüssen. Ein Vorteil der direkten Beladung des Pufferspeichers ist die Ausbildung einer thermischen Schicht, die dazu führt, dass fast immer hohe Temperaturen für die Verbraucher und niedrige Temperaturen für die Erzeuger zur Verfügung stehen (Brennwerteffekt). Die thermische Last ist in dieser Konfiguration von den Erzeugern getrennt. Der Warmwasserspeicher wird indirekt über den Pufferspeicher mit dem heißesten Wasser des Pufferspeichers versorgt. Der Heizkreisvorlauf ist wegen der niedrigeren Solltemperaturen unterhalb des Warmwasserspeichervorlaufs platziert. Die jeweiligen Rückläufe werden ebenfalls so angeschlossen, dass die Schichtung (siehe Kap. 4.1) im Pufferspeicher bestehen bleibt.

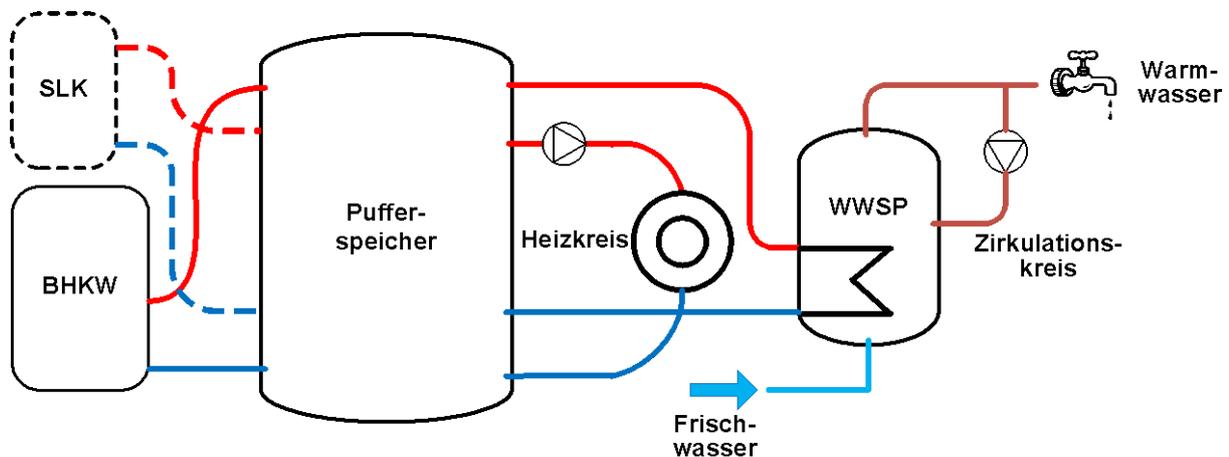


Abbildung 2-10: BHKW-Anlagenkonfiguration mit Puffer- und Warmwasserspeicher

Ein Nachteil dieser Speicherkonfiguration ist, dass für die Warmwasserspeicherladung immer sehr viel heißes Wasser im Puffer vorgehalten werden muss. Damit der Warmwasserspeicher in akzeptabler Zeit auf 60 °C geladen werden kann, sollte die Temperatur im oberen Teil des Pufferspeichers mindestens 70 °C, besser noch 75 °C betragen. Aufgrund der Zweispeicherkonfiguration ist ein Verlust an Exergie nicht zu vermeiden. Die Wärmemenge, die für eine Warmwasserladung im Pufferspeicher vorgehalten werden muss, ist demnach deutlich größer als der Bedarf für die Raumwärme [WEH 12].

### 2.4.3 Pufferspeicher mit Frischwasserstation

Für Mikro-KWK-Systeme eignen sich auch Pufferspeicher mit Frischwasserstationen (FWS), wie in Abbildung 2-11 dargestellt. Die Speicherladung kann hier sowohl direkt als auch indirekt erfolgen. Der Heizkreis wird über den Speicher versorgt. Die Erwärmung des Frischwassers erfolgt auf Nachfrage über einen externen Wärmetauscher mit Wasser aus dem oberen Bereich des Speichers. Dafür wird eine Pumpe, die das Wasser an den Wärmetauscher fördert, auf Anforderung aktiviert. Dementsprechend ist die Vorhaltung von Warmwasser nicht notwendig; es wird bei Bedarf erwärmt.

Nachteilig bei FWS ist, dass bei hartem Wasser mit Temperaturen über 60 °C Kalk ausfällt, der die Wärmeleistung des Wärmetauschers stark reduziert und diesen zerstören kann. Eine Lösung dieses Problems wird vom Hersteller Solvis beschrieben [SOL 13]: Bei dem vorgeschlagenen Verfahren wird

dem heißen Pufferspeicherwasser soviel Kaltwasser zugemischt, dass die Temperatur unter 60 °C oder weniger fällt. FWS können separat in der Nähe des Speichers installiert werden. Für eine einfache Installation bieten sich allerdings Komplettpakete bestehend aus Mikro-BHKW und Speichern mit direkt angeschlossener Frischwasserstation an.

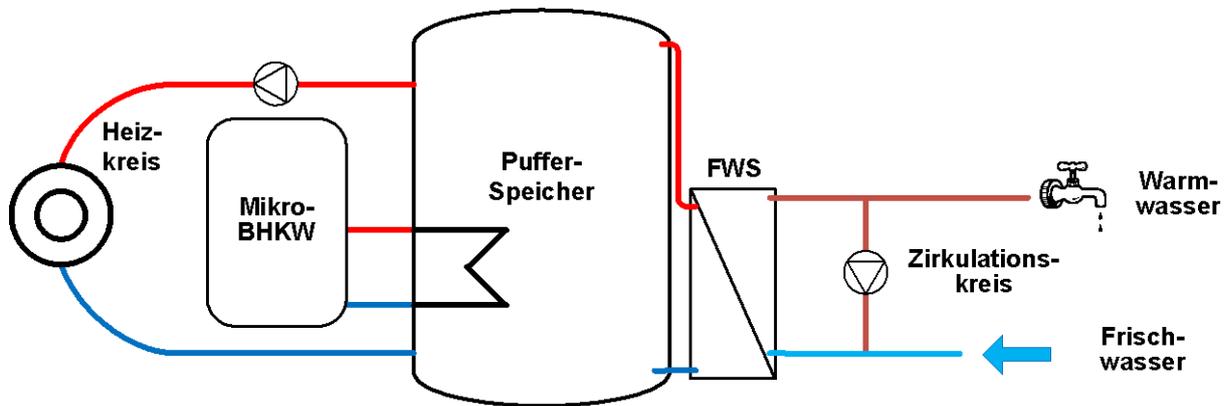


Abbildung 2-11: BHKW-Anlagenkonfiguration mit indirekter Pufferspeicherladung und Frischwasserstation

#### 2.4.4 Kombispeicher

Die meisten Mikro-BHKW werden im Paket mit einem Kombispeicher (Abbildung 2-12) verkauft. Kombispeicher werden seit einigen Jahren für solarthermische Anlagen zur Heizungsunterstützung eingesetzt. Solarthermieanlagen oder Mikro-BHKW laden den Speicher indirekt im unteren Bereich.<sup>17</sup> Das Frischwasser wird über ein Wellrohr erwärmt, welches den Speicher von unten bis oben spiralförmig durchzieht. Die Zirkulationsleitung wird über eine Zirkulationslanze im oberen Teil des Wellrohres eingebracht. Der Heizkreis wird über den Speicher, sprich unabhängig vom BHKW, versorgt.

<sup>17</sup> Wegen der niedrigen Solarthermie-Vorlauftemperatur wird der Speicher im kältesten Bereich geladen.

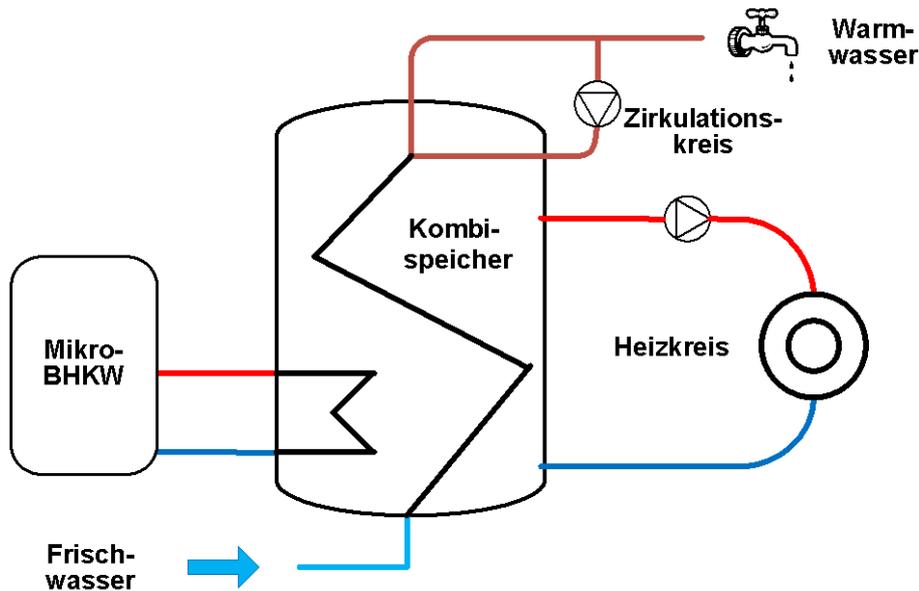


Abbildung 2-12: BHKW-Anlagenkonfiguration mit indirekt geladenem Kombispeicher

## 2.5 Regelungsstrategien

Für Klein-KWK-Anlagen gibt es prinzipiell vier Regelungsarten: Beim wärmegeführten Betrieb versucht das BHKW sich dem Wärmebedarf des Gebäudes anzupassen, während beim stromgeführten Betrieb der Gebäudestrombedarf die Regelgröße darstellt. Die dritte Möglichkeit ist eine Kombination aus den beiden ersten Regelungsarten. Als Viertes lässt sich die externe Betriebsführung aufführen, welche, je nachdem wer für die Steuerung verantwortlich ist, als netzgeführter Betrieb oder als virtuelles Kraftwerk bezeichnet werden kann (vgl. hierzu die Ausführungen in Kap. 1.3.2).

### 2.5.1 Wärmegeführter Betrieb

In den meisten Klein-KWK-Systemen sind drei Temperaturfühler am Speicher ( $T_{Sp,oben}$ ,  $T_{Sp,mitte}$ ,  $T_{Sp,unten}$ ) angebracht. Im wärmegeführten Betrieb erfolgt die BHKW-Regelung ausschließlich anhand von Sollwerten dieser Fühler. Der oberste ist zugleich der Warmwassertemperaturfühler. Er ist für die Einhaltung des Warmwassersollwerts verantwortlich. Ein zweiter Fühler auf mittlerer Speicherhöhe oder auf Höhe des Heizkreisvorlaufs ist an den Heizkreissollwert gekoppelt. Beiden Temperatursollwerten gemein ist, dass sie immer mindestens zwei verschiedene Sollwerte umfassen. Je nach KWK-Anlage spricht man bspw. von Tag- und Nachtsollwert oder von Komfort-, Normal- und Absenkttemperatur. Zusätzlich ist die Heizkreissolltemperatur über die Heizkurve mit der Außentemperatur verknüpft. Ein dritter Fühler, der sich im unteren Bereich des Speichers befindet, ist meist für die Abschaltung des BHKW verantwortlich. Die Abschaltung des BHKW kann sowohl außentemperaturabhängig bei einer festen Temperatur als auch stundenweise (z.B. über Nachtabsenkung) erfolgen.

Vorteil der Wärmeführung ist zum einen der einfache und kostengünstige Aufbau, da nur drei Fühler verbaut und die Werte an die BHKW-Steuerung übermittelt werden müssen. Zum anderen können durch die eingestellten Sollwerte zu hohe und zu niedrige Speichertemperaturen vermieden bzw. bei Bedarf leicht angepasst werden. Durch die Kopplung des mittleren Speicherfühlers mit der

Außentemperatur befindet sich der Speicher im Mittel immer im optimalen Füllstand. Im Winter kann viel Wärmeenergie bereitgestellt werden, während im Sommer der Speicher eher „leer“ ist. Mit Hilfe der eingestellten Sollwerte plus/minus einer Temperatur- und/oder Zeitgrenze erfolgt die Steuerung des Spitzenlastkessels. Steigt die Temperatur im Speicher im Anschluss an die BHKW-Zuschaltung nach einer gewissen Zeit nicht an oder unterschreitet die Solltemperatur abzüglich eines eingestellten Werts, dann startet der SLK. In der Regel wirkt sich die meist eingestellte Nachtabsenkung positiv auf die Eigenstrombedarfsdeckung aus. Wärmegeführte BHKW starten morgens beim Wechsel der Solltemperaturen, während nachts nur an sehr kalten Tagen Strom erzeugt wird.

Nachteilig hingegen ist die Trägheit des Systems, da dem Speicher viel Energie entnommen werden kann, noch bevor die Temperaturfühler dies registrieren. Ebenso können kleine Entnahmemengen zum Einschalten des BHKW oder sogar des SLK führen. Der wärmegeführte Betrieb folgt also „nur“ den aktuellen Temperaturen, während „Zukünftiges“ (Senkung der Solltemperaturen) außer Acht gelassen wird. Ebenso ist das System nicht lernfähig: Häufig auftretende Spitzen (morgens und/oder abends) fließen nicht in die Regelung ein.

### 2.5.2 Stromgeführter Betrieb

Es gibt zwei Arten des stromgeführten Betriebs: Erstens kann man mit einem bekannten ¼-Stunden-Lastprofil das BHKW genau zu den Zeiten laufen lassen, zu denen der Stromverbrauch hoch ist. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Gebäudestromverbrauch direkt als Regelsignal für das BHKW zu verwenden. Dabei wird der aktuelle Stromverbrauch mit einem „Smart-Meter“ oder einem Energiezähler mit Impuls- oder Analogausgang gemessen und an das BHKW übertragen. Modulierende BHKW folgen dem Stromverbrauch, nichtmodulierende starten bei Überschreitung eines Sollwerts.

Die erste Möglichkeit bietet sich vor allem für gewerbliche Verbraucher an, da der werktägliche Verlauf des Strombezugs aufgrund fester Arbeitszeiten oder Abläufe sehr ähnlich ist [LIPP 13-a]. Für private Haushalte hat Vogt [VOGT 11] in seiner Arbeit mehrere tausend ¼-Stunden Lastgänge auf ihre Ähnlichkeit hin untersucht und dabei festgestellt, dass aufeinanderfolgende Tage kaum korrelieren.

Abbildung 2-13 (zur Detailansicht vgl. Abbildung A-2 im Anhang) zeigt exemplarisch den im Feldtest aufgezeichneten Stromverbrauch eines Einfamilienhauses in Miesbach zwischen dem 19. und 21. Juli 2012.<sup>18</sup> Dieser liegt meistens unter 1 kW, also unter der elektrischen Nennleistung der in dieser Arbeit betrachteten Mikro-KWK-Anlagen. Eine stromgeführte Betriebsweise mit Hilfe des ¼-Stunden Lastgangs ist wenig zielführend, da die Verbrauchsspitzen zu unterschiedlichen Zeiten auftreten. Eine Stromführung nach realem Lastverlauf ist an den meisten Tagen nachteilig. Die in Abbildung 2-13 dargestellten kurzen Morgenspitzen würden das BHKW bei hohem Verbrauch starten. Da das BHKW aber eine gewisse Mindestlaufzeit hat, würde auch in den folgenden Nachfragetälern Strom erzeugt und größtenteils eingespeist. Die starken Schwankungen und die nur kurz auftretenden Peaks machen eine

---

<sup>18</sup> Dieser Feldtest in Miesbach ist derjenige Feldtest, dessen Ergebnisse auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit immer wieder Eingang finden (vgl. u.a. Kap. 3.1).

sinnvolle Stromführung für einzelne kleine Wohngebäude nahezu unmöglich.<sup>19</sup>

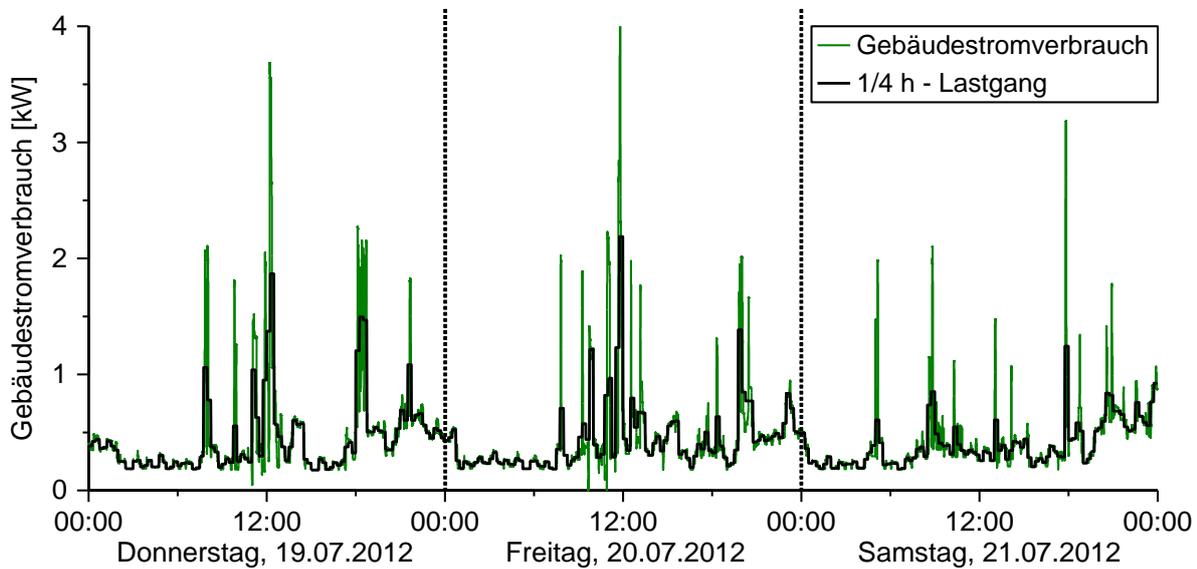


Abbildung 2-13: Stromverbrauch in Miesbach vom 19.07. bis 21.07.2012

### 2.5.3 Mischbetrieb

Um die Vorteile des wärme- und stromgeführten Betriebs zu verbinden, kann der wärmegeführte Betrieb durch Bedienungseingriffe so verändert werden, dass das BHKW zwingend „AN“ oder „AUS“ ist. Dies bietet sich insbesondere bei Gebäuden an, bei denen der Stromverbrauch bekannt ist, oder bei Gewerbebetrieben, die einen so hohen Stromverbrauch haben, dass ein Leistungspreis bezahlt werden muss. Beispiele für verschiedene Gewerbebetriebe finden sich im „FORETA Abschlussbericht“ (Teilprojekt F) [LIPP 13-a]. Im Bereich der 1 kW-Anlagen können Sollwerte zu Zeiten eines angenommenen hohen Strombedarfs erhöht und bei niedrigem Strombedarf (z.B. nachts) abgesenkt werden.

## 2.6 Dimensionierung von Kleinst-KWK-Anlagen, Spitzenlastkesseln und Speichern

In diesem Kapitel werden Aspekte der Dimensionierung behandelt, die bei der Wahl und Anschaffung eines Kleinst-KWK-Systems berücksichtigt werden müssen: Erstens die Dimensionierung der thermischen BHKW-Leistung, zweitens die des SLK, drittens die des Speichervolumens. Zu berücksichtigen ist dabei, dass sich die folgenden Überlegungen am aktuellen Stand der Technik orientieren.

Ein wichtiges Werkzeug für die Dimensionierung von Mikro-KWK-Anlagen ist die Jahresdauerlinie (JDL).

<sup>19</sup> Bei einem (elektrischen) Zusammenschluss mehrerer Einfamilienhäuser könnte eine gesteuerte Stromführung sinnvoll eingesetzt werden. Potenziale hierzu untersuchten Huber und Sänger[HUB 13].

Für die Erstellung der JDL wird der stündliche Wärmeverbrauch ( $Q_{\text{Wärme}}$ ) sortiert auf der y-Achse aufgetragen. Anschließend wird mit den gewünschten Sollbetriebsstunden ( $Bh_{\text{soll}}$ ) der Wert für die thermische BHKW-Leistung berechnet:

$$\int_0^{8760} \frac{\min(\dot{Q}_{\text{BHKW},th}, Q_{\text{Wärme}})}{\dot{Q}_{\text{BHKW},th}} dt \stackrel{!}{=} Bh_{\text{soll}} \quad (2.10)$$

Abbildung 2-14 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer BHKW-Auslegung für 5.000 Betriebsstunden. Die thermische BHKW-Leistung entspricht in diesem Fall knapp 27 % der maximal auftretenden Leistung. Damit können 64 % des thermischen Energiebedarfs gedeckt werden.

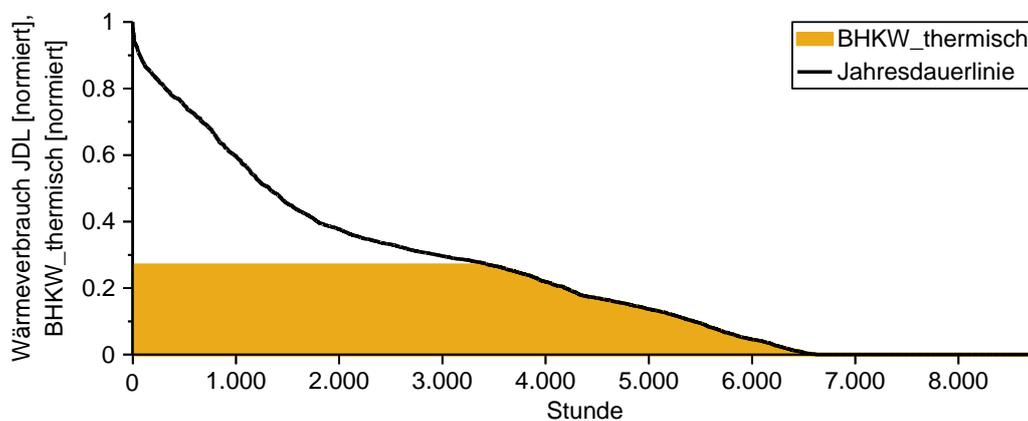


Abbildung 2-14: BHKW-Auslegung anhand der Jahresdauerlinie

Die Auslegung eines BHKW hängt stark von der Form der Jahresdauerlinie ab. Für sehr steile Jahresdauerlinien (Bürogebäude, Gebäude ohne zentrale Warmwasserversorgung) liegt die thermische BHKW-Leistung zwischen 5 und 10 %, während für sehr flache Dauerlinien (Hallenbäder, Gewerbebetriebe mit Niedertemperaturprozesswärme) thermische Leistungen mit bis zu 40 % der maximalen Nachfrage gewählt werden können. Im Wohngebäudebereich sollte die thermische Leistung 25 % nicht übersteigen. [PIE 10], [POW 07]

Mikro-KWK-Anlagen werden in der Regel als (Wärme-)Grundlastherzeuger eingesetzt. Daraus ergibt sich einerseits eine hohe Laufzeit des KWK-Aggregats, andererseits wird aber ein zusätzlicher Spitzenlastkessel zur Deckung von Wärmeverbrauchsspitzen benötigt. Dieser dient ebenfalls als redundanter Wärmeerzeuger bei Wartung und Störung. Die thermische Leistung des SLK sollte der maximal benötigten Wärmeleistung des Gebäudes, sprich der Normheizlast entsprechen (deren Berechnung findet sich in [DIN 12831]). Bei einer Sanierung bietet es sich an, den bereits vorhandenen Kessel als Spitzengerät einzusetzen. Damit die BHKW-Laufzeit nicht reduziert wird, sollte dieser modulierend ansteuerbar sein.

Im Mikro-BHKW-Bereich haben sich insbesondere für Stirlingmotoren und Brennstoffzellen Kombigeräte

aufgrund ihrer einfacheren Hydraulik und ihrer geringeren Gesamtkosten durchgesetzt. Kombigeräte bestehen aus dem KWK-Aggregat und einem im gleichen Gehäuse integrierten SLK (siehe Abbildung 3-2).

Die Größe des Speichers hängt von der Leistung des Wärmeerzeugers, den Verbrauchern und dem Speichertyp ab. Warmwasserspeicher werden gemäß DIN 4708, Teil 2 [DIN 4708] ausgelegt. Für Ein- und Zweifamilienhäuser ergeben sich je nach Bewohneranzahl und Einrichtung Werte zwischen 150 und 300 Liter. Um kurze BHKW-Laufzeiten zu vermeiden, sollte der Speicher tendenziell größer und mit größerer Temperaturspreizung als bei konventionellen Wärmeerzeugern ausgelegt bzw. geregelt werden. Puffer- und Kombispeicher werden im Vergleich zu Warmwasserspeichern deutlich größer dimensioniert. Um einen möglichst kontinuierlichen BHKW-Betrieb zu ermöglichen, sollten das Volumen und damit die thermische Kapazität möglichst groß sein. Dieser Forderung stehen in der Praxis das begrenzte Platzangebot, die Einbringungsmöglichkeiten, die Speicherkosten und v.a. die Speicherverluste gegenüber.

Das BAFA, welches für die KWK-Förderung verantwortlich ist, fördert thermische Speicher, die eine Mindestgröße von  $1 \text{ m}^3$  oder 300 Liter pro  $\text{kW}_{\text{el}}$  aufweisen [BAFA 13-c]. Gleichzeitig wird die KWK-Förderung nur ausbezahlt, wenn das Speichervolumen größer als 70 Liter pro Kilowatt thermischer Nennleistung ist [BMU 08]. Arndt, der in seiner Dissertation eine Sensitivitätsanalyse für verschiedene Pufferspeichergrößen für einen SenerTec Dachs durchgeführt hat [ARN 08], verwendet als Qualitätskriterien Wirtschaftlichkeit, Systemwirkungsgrad und Anlagenstarts. Seinen Ergebnissen zufolge liegt das Optimum bei  $80 \text{ l/kW}_{\text{th}}$ ; damit verweist Arndt auf einen vergleichbaren Speichervolumenwert wie das BAFA.

### 3. Untersuchungsobjekte und BHKW-Standardbetrieb

Wie bereits hervorgehoben wurde, baut diese Arbeit auf Ergebnissen der Analyse von Stromerzeugungsprofilen in Mini- und Mikro-KWK-Feldtests auf, die am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE durchgeführt wurden: So wird zum einen auf in Feldtests generierte Daten zurückgegriffen; zum anderen wurde ein realitätsnaher Mikro-KWK-Prüfstand aufgebaut, mit dessen Hilfe die Stromerzeugung an den jeweiligen Bedarf flexibel angepasst und vom Wärmebedarf entkoppelt werden kann.

Der Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik führt zusammen mit der Energie Südbayern GmbH seit 2008 mehrere Feldtests mit verschiedenen Mini- und Mikro-KWK-Anlagen durch. Im zwischenzeitlich abgeschlossenen Mini-BHKW-Projekt [LIPP 09] lag der Fokus auf Mehrfamilienhäusern und auf der Frage, unter welchen Voraussetzungen Mini-KWK-Anlagen noch wirtschaftlich betrieben werden können [VAL 09]. Getestet wurden zwei verschiedene Mini-KWK-Technologien: Der Lion Powerblock der lion-energy (damals OTAG) und das ecoPOWER 4.7 von Vaillant. Die dabei eingesetzte Messtechnik erfasste die eingesetzten bzw. erzeugten Leistungen und Energien der BHKW und der SLK. Ein auf diesem Projekt aufbauender, ebenfalls bereits beendeter Feldversuch hatte zum Ziel, Mikro-KWK-Anlagen auf Basis der Stirling Technologie zu untersuchen [LIPP 10]. Eingesetzt wurde das Remeha eVita Mikro-BHKW [REM 13]. Das Forschungsinteresse dieses Projekts galt den verschiedenen Speichertypen (vgl. Kapitel 2.4). Ein weiterer Mikro-KWK-Feldtest („Miesbach“) beschäftigte sich mit Stromproduktion und thermischer Speicherung und wird im Folgenden näher betrachtet.

Im Weiteren werden zwei nur leicht variierende Mikro-KWK-Anlagen betrachtet: einmal eine „reale“ Anlage im Feldtest „Miesbach“, zum anderen die Anlage eines eigens am IfE aufgebauten Prüfstands. Es handelt sich in beiden Fällen um ein Stirlingmotor Mikro-BHKW-Kombigerät (d.h. mit integriertem SLK) mit Kombispeicher. Die Miesbacher KWK-Anlage ist vom Hersteller Viessmann, in der ein Microgen Motor eingebaut ist. Beim Prüfstand wurde demgegenüber auf eine Whispergen Mikro-KWK-Anlage zurückgegriffen.

Während, wie im nachfolgenden Kapitel 0 näher ausgeführt werden wird, im Miesbacher Fall eine gezielte (An-)Steuerung des Geräts nach Inbetriebnahme selbst durch den Betreiber nur sehr eingeschränkt möglich ist, zeichnet sich die Prüfstandsanlage dadurch aus, dass sämtliche Einstellungen variiert werden können, wodurch etwa die später in Kapitel 6.2 zu entwickelnde Regelungsstrategie unter divergierenden Voraussetzungen getestet werden konnte.

Im vorliegenden Kapitel werden die dieser Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungsobjekte im BHKW-Standardbetrieb vorgestellt. Kapitel 0 widmet sich einer näheren Beschreibung der Feldtestanordnung und der Ergebnisse aus dem Feldtest „Miesbach“, Kapitel 3.2 dem Aufbau des eigens aufgebauten Mikro-KWK-Prüfstands. Anschließend werden das dynamische Betriebsverhalten und die Regelung des am Prüfstand installierten Whispergen BHKW näher beleuchtet (Kap 3.3). Darauf folgend werden Möglichkeiten zur Verbesserung der Anlageneffizienz auf Betreiberebene anhand der Ergebnisse aus Typtagversuchen diskutiert (Kap. 3.4). Abschließend werden die wesentlichen Kriterien für ein verbesserstes Betriebsverhalten bilanzierend betrachtet (Kap. 3.5).

### 3.1 Mikro-KWK-Feldtest Miesbach

Das vermessene Mikro-KWK-System steht in einem Einfamilienhaus mit drei Bewohnern in Miesbach, ca. 40 Kilometer südlich von München und befindet sich zudem in der gleichen Referenzregion (Klimazone 13 „Schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland“) des Deutschen Wetterdienstes [TRY 04] wie die bayerische Landeshauptstadt. Das 1967 errichtete Gebäude wurde 1989 energetisch saniert. Der im Energieausweis berechnete Primärenergiebedarf beträgt  $117 \text{ kWh/m}^2$ . Der tatsächliche Gasverbrauch lag in den Jahren vor dem Mikro-KWK-Einbau bei ungefähr  $1.850 \text{ m}^3$ . Tabelle 3-1 fasst die Gebäudedaten zusammen:

**Tabelle 3-1: Daten zum Feldtestgebäude in Miesbach**

<b>Baujahr</b>	1967
<b>Energetische Sanierung</b>	1989
<b>Gebäudefläche [<math>\text{m}^2</math>]</b>	150
<b>beheiztes Volumen [<math>\text{m}^3</math>]</b>	622
<b>Bewohner</b>	3
<b>Primärenergiebedarf* [<math>\text{kWh/m}^2</math>]</b>	117
<b>Gasverbrauch vor Einbau der Mikro-KWK Anlage [<math>\text{m}^3</math>]</b>	1850

\* berechnet nach EnEV 2007, [BMW I 07]

#### 3.1.1 Viessmann Vitotwin Mikro-BHKW

Das Mikro-KWK-System in Miesbach besteht aus dem Vitotwin Mikro-BHKW der Firma Viessmann und einem Vitocell 340-M Kombispeicher [VIE 13-b]. Das Viessmann Mikro-BHKW wurde zusammen mit der Messtechnik (Samplerate: 1/s) im März 2011 eingebaut und in Betrieb genommen. Neben der Effizienzbetrachtung des Viessmann BHKW war das Zusammenspiel des gesamten KWK-Systems, bestehend aus thermischem Erzeuger, Speicher und Verbraucher, von Interesse. Dementsprechend wurden neben den BHKW-Leistungsverläufen auch die der thermischen Verbraucher gemessen und insgesamt fünf zusätzliche Temperaturfühler am Speicher angebracht (siehe Anhang, Abbildung A-1). Das KWK-Aggregat in Miesbach ist mit einem Kombispeicher verbunden, der indirekt im unteren Speicherbereich geladen wird. Im Gegensatz zu der in Kapitel 2.4.4 dargestellten Hydraulikanordnung gibt es im Miesbacher Gebäude keine Zirkulationsleitung, weshalb das Warmwasser nur bei Bedarf zum Verbrauchsort fließt. Das gesamte Hydraulikschema, inklusive der Position der einzelnen Messstellen, zeigt Abbildung 3-1.

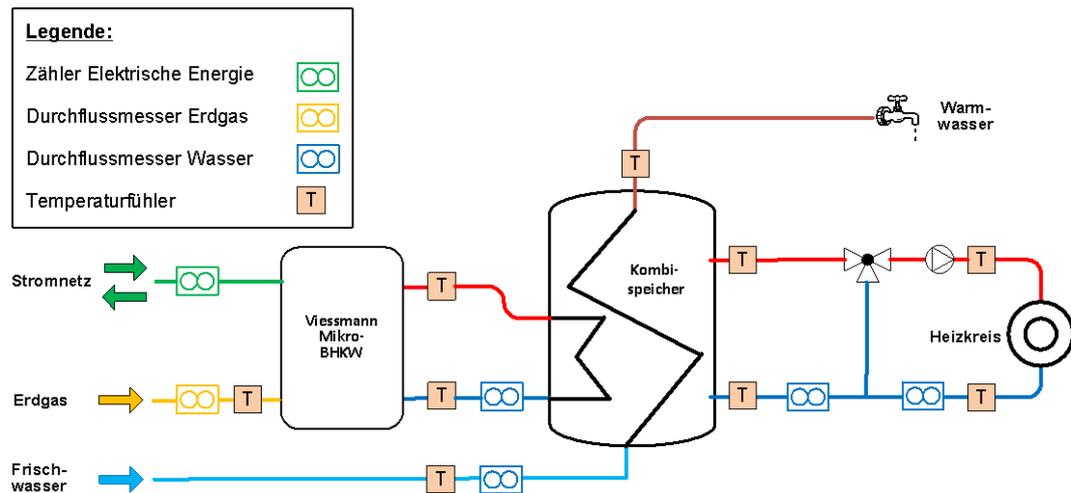


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Mikro-KWK-Systems in Miesbach

Viessmanns Vitotwin BHKW-Stirlinggerät (Abbildung 3-2) besteht aus dem in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Microgen Stirlingmotor und einem darüber liegenden integrierten Spitzenlastkessel. Der SLK entspricht einem konventionellen Viessmann Gasbrennwertgerät, mit einer entsprechend hohen variablen thermischen Leistung von 4,8 - 20 kW<sub>th</sub>, was zusammen mit der thermischen Leistung des Stirlingmotors (5,7 kW<sub>th</sub>) eine maximale Systemleistung von an die 26 kW<sub>th</sub> ergibt. Die Stromkennzahl des Motors beträgt ausgehend von den vom Hersteller angegebenen Leistungen (1,0 kW<sub>el</sub> und 5,7 kW<sub>th</sub>) 0,175. Die wichtigsten technischen Daten der Anlage zeigt Tabelle 3-2.



Abbildung 3-2: Viessmann Vitotwin Mikro-BHKW, [ESB 13]

Tabelle 3-2: Technische Daten Viessmann Vitotwin Mikro-BHKW, [VIE 13-c]

$\dot{Q}_{th,Stirlingmotor}$ [kW]	5,7
$\dot{Q}_{th,ges}^{20}$ [kW]	3,4 - 25,3
$P_{el}$ [kW]	1,0
$\eta_{Stirlingmotor, ges, heizwertbezogen}$ [%]	107
$\sigma$ (berechnet)	0,175
<b>Motor</b>	Linear-Freikolben-Stirlingmotor
<b>Schall-Leistungspegel [db(A)]</b>	54
<b>Abmessungen [L x B x H] [mm]</b>	480 x 480 x 900
<b>Gewicht [kg]</b>	125

<sup>20</sup> Mittelwert aus 50/30°C und 80/60°C

Eine Gaszuleitung versorgt sowohl den Ringbrenner des Stirlingmotors als auch den SLK, während das Abgas beider Brenner über ein gemeinsames Abgassystem abgeführt wird. Gemeinsam mit den kompakten Abmessungen der Anlage folgt daraus, dass der Installationsaufwand nicht höher als bei einem konventionellen wandhängenden Erdgas-Brennwertgerät ist [VIE 13-c].

Während der Inbetriebnahme hat der Betreiber der BHKW-Anlage die Möglichkeit, vom Servicetechniker verschiedene Einstellungen bzgl. der BHKW- und Heizungsregelung vornehmen zu lassen. Nach der Inbetriebnahme bleiben dem Betreiber nur noch wenige Möglichkeiten den Heizbetrieb (Nachtabsenkung, Steigung der Heizkurve, Sommer-/Winterumschaltung), den Warmwasserbetrieb (Nachtabsenkung, Komfortwert, reduzierter Wert) sowie den Zirkulationsbetrieb bei Bedarf anzupassen. Eine Auflistung prinzipiell realisierbarer Einstellungen vor der Inbetriebnahme sowie der bei Inbetriebnahme des Feldtest-Geräts eingestellten Werte finden sich im Anhang, Tabelle A-3.

### **3.1.2 Wärmeverbrauch, Wärmeerzeugung und Stromerzeugung im Jahresüberblick**

Abbildung 3-3 illustriert den Wärmeverbrauch (Heizkreis und Warmwasser) sowie die mittlere Tagesaußentemperatur für den Standort Miesbach im Jahresverlauf 2012. Während der Warmwasserverbrauch über das Jahr annähernd gleichbleibend niedrig ist, korreliert der Heizkreisverbrauch mit der Außentemperatur. Insbesondere Anfang Februar, als die mittlere Außentemperatur Werte kleiner minus 10 °C betrug, stieg der Verbrauch auf bis zu 80 kWh/d. Zudem sind manuelle Eingriffe auf das Heizungssystem erkennbar.<sup>21</sup> Der Betreiber schaltete die Heizung vom 23. Mai bis einschließlich 12. September komplett ab, obwohl die Außentemperatur teilweise unter 15 °C lag. Ein weiterer Sprung des Heizwärmeverbrauchs erfolgte am 24. Oktober. Dies lässt darauf schließen, dass zwischen dem 13. September und dem 23. Oktober nur ein Teil der Heizkörper in Betrieb war (Heizung\_reduziert).

---

<sup>21</sup> Manuelle Eingriffe wurden im Feldtest nicht protokolliert. Dennoch erlauben die Feldtestdaten plausible Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten.

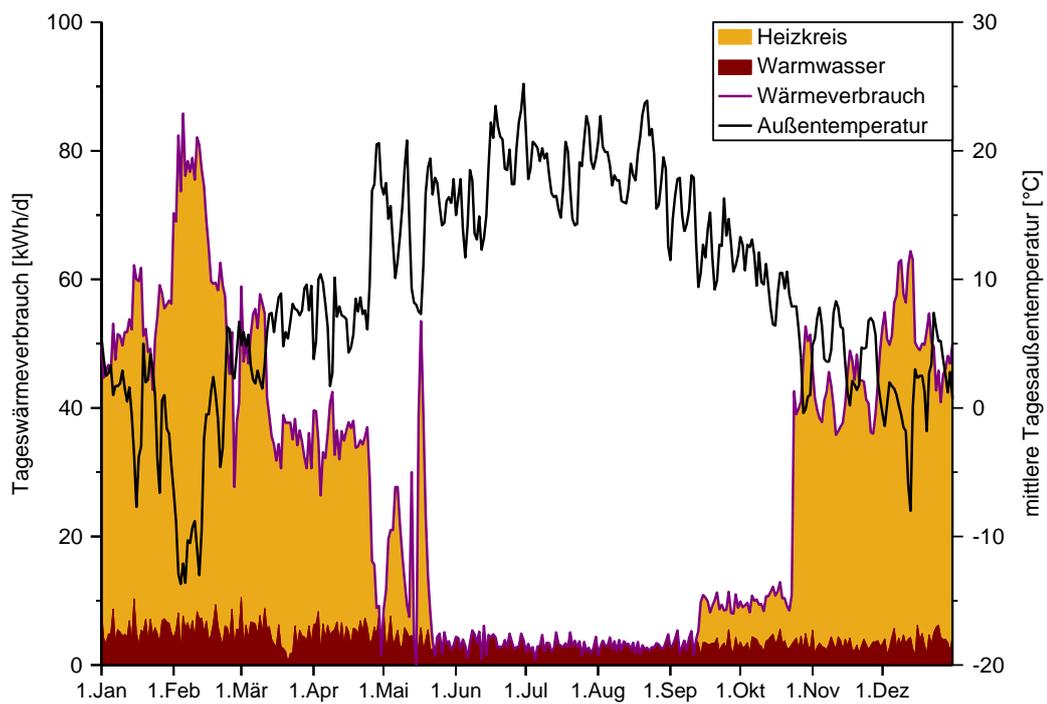


Abbildung 3-3: Heizwärme- und Warmwasserverbrauch im Jahr 2012, Miesbach

Die zugehörigen verbrauchten und erzeugten Energiemengen veranschaulicht Abbildung 3-4. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass der Stirlingmotor zwischen dem 27. Februar und 15. Mai nicht in Betrieb war.<sup>22</sup> Der integrierte SLK deckte in diesem Zeitraum die Wärmenachfrage. Die Stromerzeugung ist im Winter deutlich höher als im Sommer. An einigen Sommertagen läuft das BHKW wegen der geringen Wärmenachfrage gar nicht. Auch an den kältesten Tagen im Februar steigt die Stromerzeugung aufgrund der Nachtabstaltung und des SLK-Einsatzes nicht über 13,8 kWh.

<sup>22</sup> Der Grund hierfür ist leider nicht bekannt.

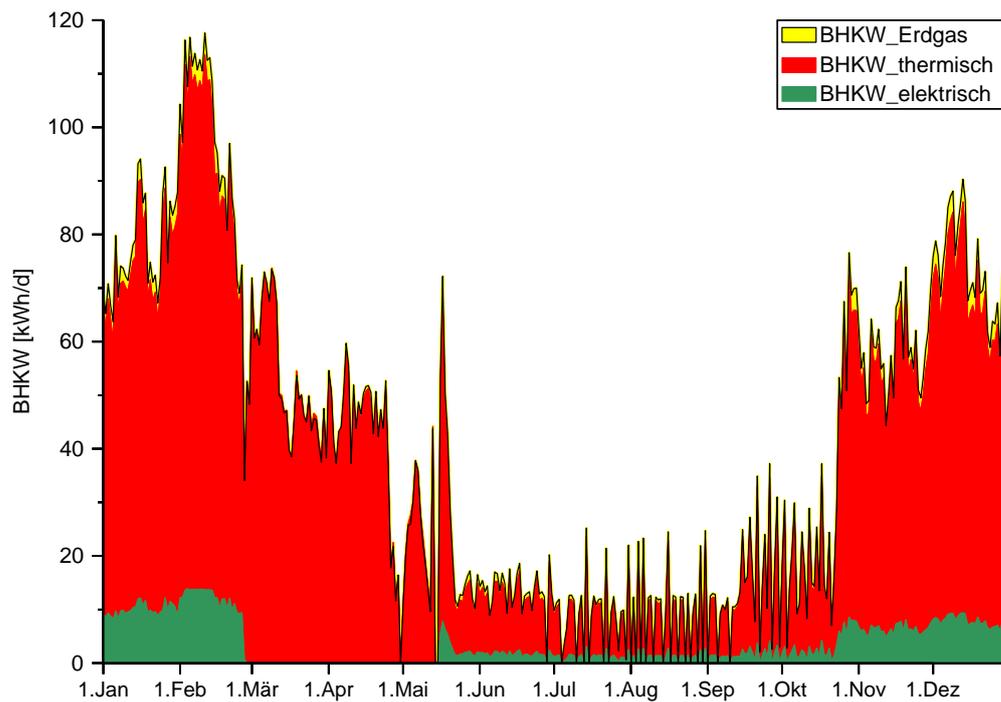


Abbildung 3-4: BHKW Verbrauch und Erzeugung im Jahr 2012, Miesbach

Die im Jahr 2012 kumuliert eingesetzten, erzeugten und verbrauchten Energiemengen sowie die verschiedenen Verlustarten des KWK-Anlagensystems in Miesbach zeigt das Energieflussdiagramm in Abbildung 3-5.

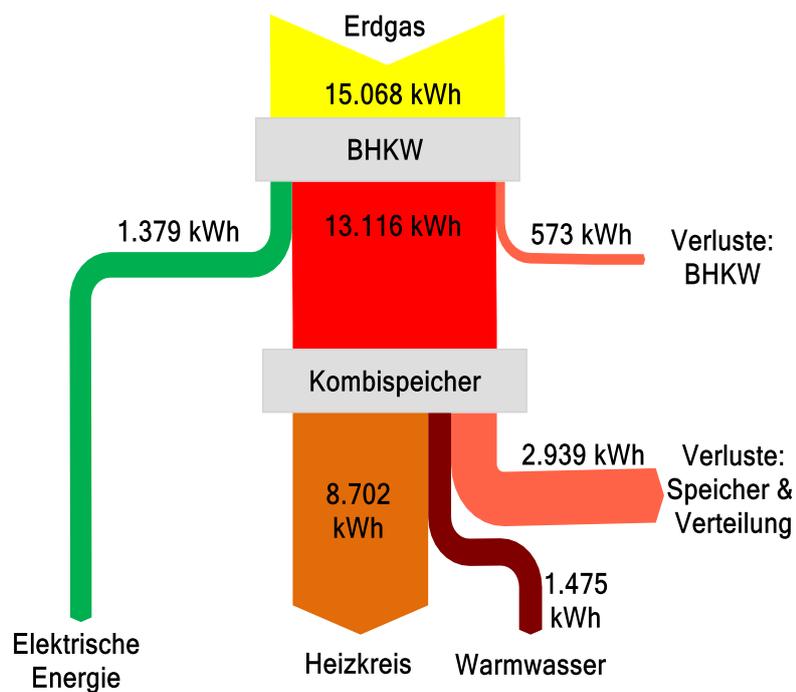


Abbildung 3-5: Energieflussdiagramm, Miesbach 2012

### 3.1.3 Typtaganalysen zu Heizkreisverbrauch, BHKW-Betrieb und Warmwasserverbrauch

Als Typtage werden Tage definiert, die typische Eigenschaften besitzen, die an vielen Tagen einer definierten Gruppe (Jahreszeit, Wochentag etc.) auftreten. Ein Typtag ist jener reale Tag, der die durchschnittlichen Eigenschaften der Gruppe am besten repräsentiert, und nicht etwa ein idealer Tag, dem die jeweiligen Mittelwerte als Eigenschaften nur zugeschrieben werden. Typtage beinhalten folglich Gradienten, wie sie in der Realität auftreten. Nur eine hohe zeitliche Auflösung der Typtage garantiert, dass die Gradienten nicht ausgeglichen werden.

Typtage können auf zweierlei Weise in die Forschung Eingang finden: Zum einen können anhand von Typtagen mit nur wenigen Prüfstandsmessungen Jahresbetrachtungen durchgeführt werden [MÜH 07]. Zum anderen erlaubt die Analyse nur weniger Typtage generalisierbare Aussagen über das gesamte interessierende System. Auf erstgenannte Variante wird im späteren Verlauf der Arbeit mehrfach zurückgegriffen, wenn es darum geht, anhand typischer Tages-Wärmelastgänge ein gesamtes Jahr möglichst gut abbilden zu können (z.B. Kap. 3.2.6 und 3.4). An dieser Stelle interessiert demgegenüber der zweite Fall, da somit die Messergebnisse aus dem Miesbach-Feldtest auf wenige repräsentative Tage mit einem je typischen Betriebsverhalten reduziert werden können.

Die Merkmale, die in die Bestimmung von Typtagen einfließen, variieren je nach Forschungsinteresse. In der Heizungstechnik werden Typtage immer anhand der Außentemperatur und bisweilen zusätzlich anhand des Bedeckungsgrades (heiter oder trüb) geclustert. Geht man nun davon aus, dass sich Werkstage nicht von Sonn- oder Feiertagen unterscheiden und der Einfluss der solaren Einstrahlung gering ist, ist es ausreichend, die Taggruppen anhand der Außentemperatur zu unterscheiden. Eine Einteilung in Sommer-, Übergang- und Wintertage bietet sich dann in vielen Fällen an. Welche Temperaturen sinnvollerweise zur Abgrenzung verwendet werden, kann nur mit Kenntnis des betrachteten Untersuchungsobjekts entschieden werden. Bei Mühlbacher [MÜH 07] liegt beispielsweise die Grenze zwischen Übergangs- und Sommertag in unsanierten Gebäuden bei 15 °C bzw. in sanierten Gebäuden bei 13 °C.

Erst im Anschluss an die Gruppenclusterung (hier: Sommer, Übergang, Winter) muss innerhalb der Gruppe der Typtag bestimmt werden. Dafür hat Sänger [SÄN 13] ein computergestütztes Verfahren entwickelt. Dabei werden zuerst alle Tage nach der mittleren Tagesaußentemperatur, in Sommer-, Übergangs- und Wintertage gruppiert. In einem zweiten Schritt werden aus den sekundlichen Werten insgesamt 96 15-Minuten-Blöcke gebildet und für jeden Block der Mittelwert bestimmt. Anschließend werden alle Einzeltagesblöcke mit dem mittleren Tag (Mittelwert aller Tage) der jeweiligen Gruppe verglichen und diejenigen mit der geringsten Abweichung als sogenannte Typtage festgelegt.

#### Heizkreisverbrauch an den Typtagen

Für den Standort Miesbach ergeben sich aus diesem Verfahren für die Heizverbrauchsanalyse zwei Gruppen<sup>23</sup>: Übergangstage zwischen 2 °C und 12 °C (Abbildung 3-6) und Wintertage kälter als 2 °C (Abbildung 3-7). Die Abbildungen zeigen für jede Gruppe drei verschiedene als repräsentativ qualifizierbare Tage, um auf die auffallend hohe Gleichmäßigkeit aufmerksam zu machen.

---

<sup>23</sup> Da es sich um eine Betrachtung ausschließlich des Heizverbrauchs handelt, fällt die Gruppe „Sommer“ weg.

Zunächst zu den Übergangstagen: Der nachts fehlende Heizwärmeverbrauch und die jeweils genau um 03.45 Uhr auftretende Morgenspitze in Abbildung 3-6 lassen auf eine Nachtabstaltung des Heizungssystems schließen. Während des Heizens beträgt die mittlere Heizleistung ca.  $2 \text{ kW}_{\text{th}}$ , liegt also deutlich unter der thermischen BHKW-Nennleistung.

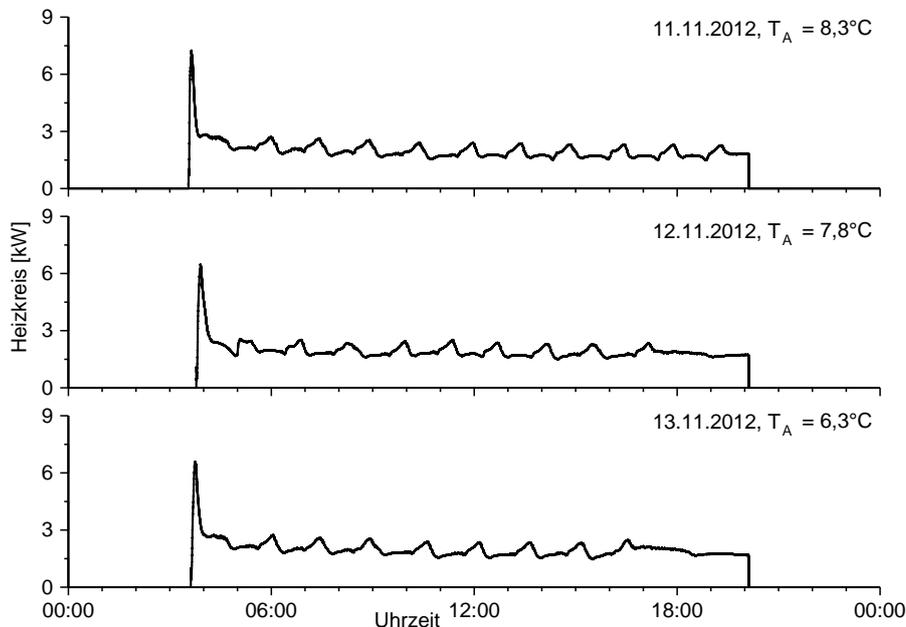


Abbildung 3-6: Heizkreisverbrauch an den Übergangstypen, Miesbach Feldtest

Abbildung 3-7 zeigt die drei repräsentativen Wintertage. Die Morgenspitze für diese Tage ist um 05.15 Uhr, also später als an den Übergangstagen. Dies kann nur durch eine veränderte Einstellung an der Heizkreisregelung erklärt werden. Die Winter-Verlaufskurven weisen sowohl untereinander als auch im Vergleich zu den Übergangstagen sehr ähnliche Tendenzen auf, befinden sich aber aufgrund der niedrigeren Außentemperaturen auf einem höheren Niveau als an den Übergangstagen.

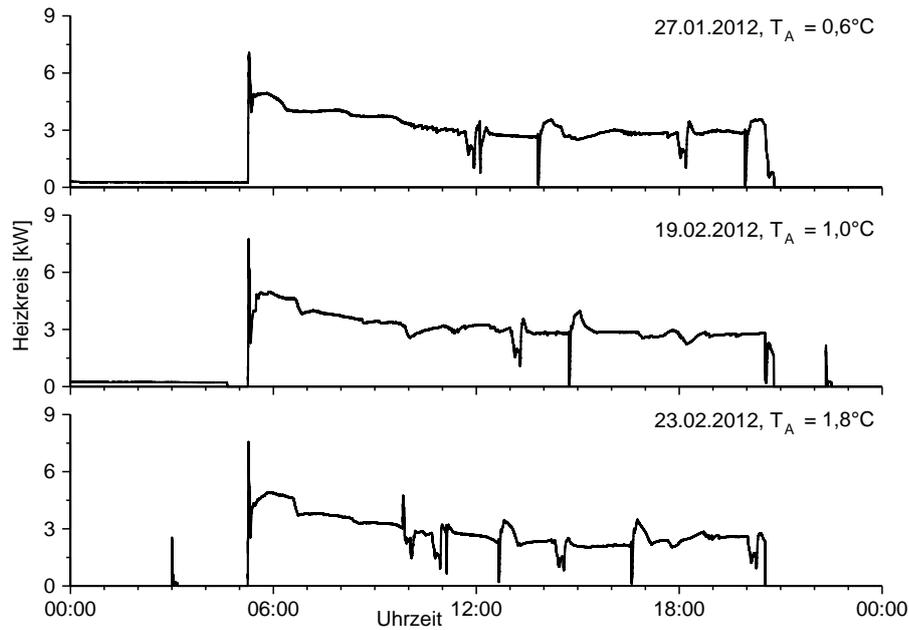


Abbildung 3-7: Heizkreisverbrauch an den Wintertypen, Miesbach Feldtest

### BHKW-Betrieb an den Typtagen

Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 zeigen die BHKW-Wärmeerzeugung an den oben identifizierten Typtagen. An den Übergangstagen findet ein häufiges Takten statt. Da die thermische BHKW-Leistung größer als die kontinuierlich abgenommene Heizleistung ist (vgl. Abbildung 3-6), läuft das BHKW zwischen neun (12.11.2012) und elf Mal (13.11.2012). Dieses für Stirling BHKW typische Übergangsphänomen wird auch von Jungwirth und Lipp beschrieben [LIPP 11].

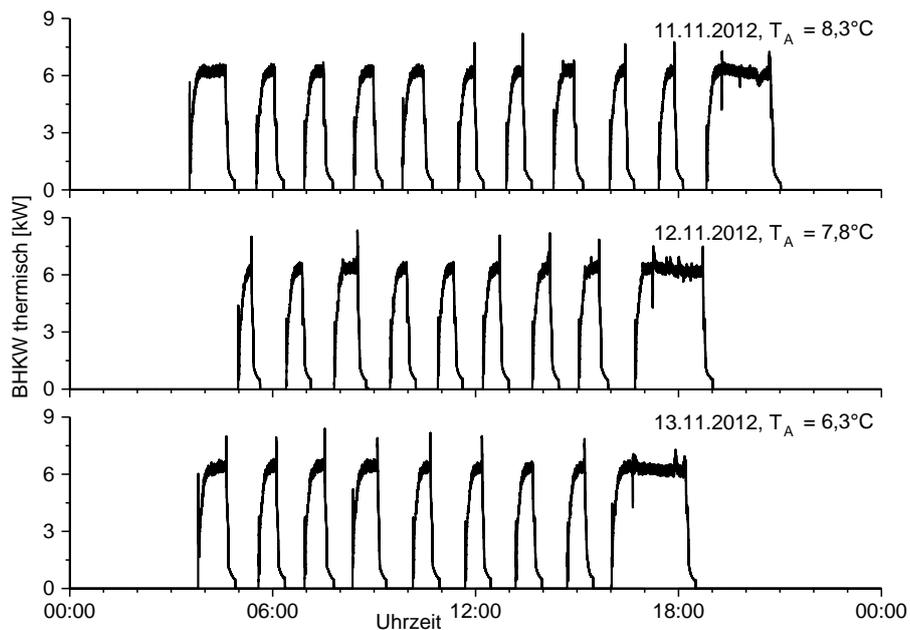


Abbildung 3-8: Thermische BHKW-Leistung an den Übergangstypen, Miesbach Feldtest

Deutlich längere BHKW-Zyklen weisen die Wintertypstage mit einer Außentemperatur unter 2 °C auf (Abbildung 3-9). Durch den höheren thermischen Verbrauch sinkt die Zyklenzahl auf maximal drei. Zusätzlich lässt sich festhalten, dass der erste Betriebszyklus zeitgleich mit dem Heizbeginn um 5.45 Uhr startet.

Wie an den Übergangstagen schafft es das BHKW auch an den Wintertagen den Wärmebedarf meist ohne SLK komplett zu decken. Nur zu einem Zeitpunkt (23.02.2012, 11.00 Uhr) läuft dieser ca. 30 Minuten. Da kurz darauf das Mini-BHKW stoppt, wäre die Aktivierung des Spitzengeräts bei einer intelligenten Regelung gar nicht erst eingetreten.

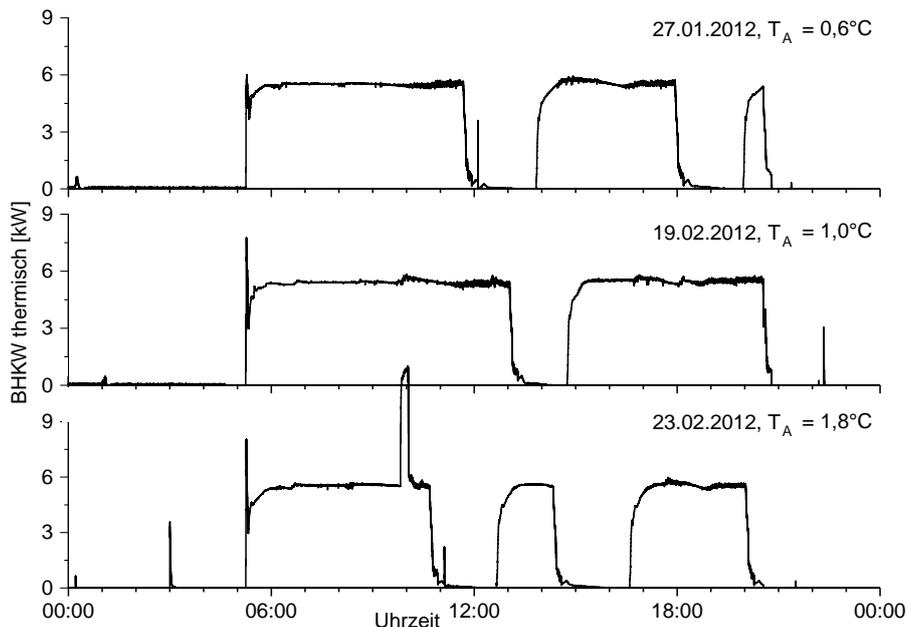


Abbildung 3-9: Thermische BHKW-Leistung an den Wintertypstagen, Miesbach Feldtest

An Sommertagen läuft das BHKW maximal einmal. Die Laufzeit beträgt im Mittel 1 ½ Stunden. Der Startzeitpunkt liegt meistens in den Morgenstunden. Ein typisches Verhalten kann an den Sommertagen nicht festgestellt werden.

### Warmwasserverbrauch an den Typtagen

Der Warmwasser- und Zirkulationsverbrauch (Messpunkt: Speicher) wurde von Candic [CAN 12] für mehrere Einfamilienhäuser des ersten Mikro-KWK-Feldtests vom IfE untersucht. In den meisten Fällen liegt der durchschnittliche Wärmeverbrauch im Bereich der VDI-Richtlinie 2067, Blatt 12 [VDI 2067]. Candic verweist zudem darauf, dass die Verbräuche am Wochenende im Vergleich zu den Werktagen nicht signifikant höher sind. Ein im Sommer niedriger Warmwasserverbrauch trifft für die meisten, jedoch nicht für alle Standorte zu. Für den Mikro-BHKW-Betrieb stellte sich insbesondere die zeitliche Auflösung als wichtig heraus, zeigte sich doch, dass Warmwasserzapfungen meist tagsüber, insbesondere in den Morgenstunden, stattfinden und die Zirkulationszeiten dem Verhalten der Gebäudebewohner angepasst wurden.

Für den Standort Miesbach (kein Zirkulationssystem) wurden mit dem oben vorgestellten Verfahren

nach Sänger drei Tage mit „typischen“ Warmwasserzapfvorgangen (Abbildung 3-10) gefunden. Sie zeigen einen hohen morgendlichen Verbrauch und kleinere Zapfungen tagsüber und nahezu keinen Warmwasserverbrauch in der Nacht. Die Regelmäßigkeit wie auch die absoluten Zapfmengen ähneln sich zwischen den drei Tagen deutlich weniger als im Falle des Heizungssystems. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Zapfungen eher zufällig auftreten und nur bedingt planbar sind.

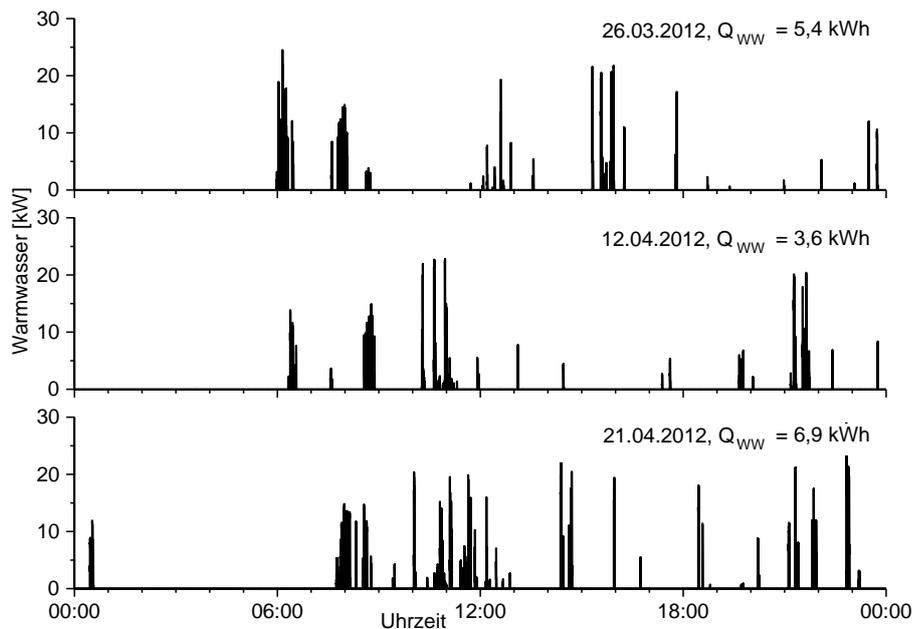


Abbildung 3-10: Typische Warmwasserverbrauche, Miesbach Feldtest

### 3.1.4 Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch und Außentemperatur

Im Folgenden wird der erforderliche Zusammenhang für die in Kapitel 5.2 zu entwickelnde Wärmeprognose zwischen Wärmeverbrauch und Außentemperatur anhand der Feldtestergebnisse in Miesbach analysiert.

Mühlbacher [MÜH 07] formuliert in seiner Arbeit einen s-förmigen Zusammenhang zwischen dem Heizkreisverbrauch und der Außentemperatur, d.h. die sogenannte Sigmoidfunktion. Die auch als Schwanenhalskurve bezeichnete Funktion lässt sich in drei Bereiche einteilen: Bei hohen Außentemperaturen wird die Heizung ausgeschaltet, bei mittleren Temperaturen steigt der Heizkreisverbrauch linear mit fallender Außentemperatur und bei sehr niedrigen Außentemperaturen läuft die Heizung mit maximaler Leistung. Hellwig [HEL 03] benennt in seiner Dissertationsschrift zwei Varianten der Berechnung der Sigmoidfunktion (in den untenstehenden Formeln: Sigmoid und TANHYP). Die jeweiligen Parameter werden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

Betrachtet man nicht nur den Heizkreisverbrauch, sondern den gesamten Wärmeverbrauch, werden die Verbräuche für Warmwasser und zur Deckung der Zirkulationsverluste<sup>24</sup> als Konstante ( $Q_{ww}$  und  $Q_{zk}$ ) dazugaddiert.

<sup>24</sup> Das Gebäude in Miesbach verfügt über keine Zirkulationsleitung, weshalb die Zirkulationsverluste im Weiteren nicht berücksichtigt werden.

$$Q_{HK,Sigmoid} = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{T_A - 40}\right)^C} \quad (3.1)$$

$$Q_{W,Sigmoid} = \frac{A}{1 + \left(\frac{B}{T_A - 40}\right)^C} + Q_{WW} + Q_{ZK} \quad (3.2)$$

$$Q_{HK,TANHYP} = -A \times \tanhyp(B \times T_A - C) \quad (3.3)$$

$$Q_{W,TANHYP} = -A \times \tanhyp(B \times T_A - C) + Q_{WW} + Q_{ZK} \quad (3.4)$$

Abbildung 3-11 zeigt den täglichen Wärmeverbrauch in Miesbach im Jahr 2012, die beiden gefundenen Regressionskurven sowie die Regressionsgerade aufgetragen über der mittleren Außentemperatur.

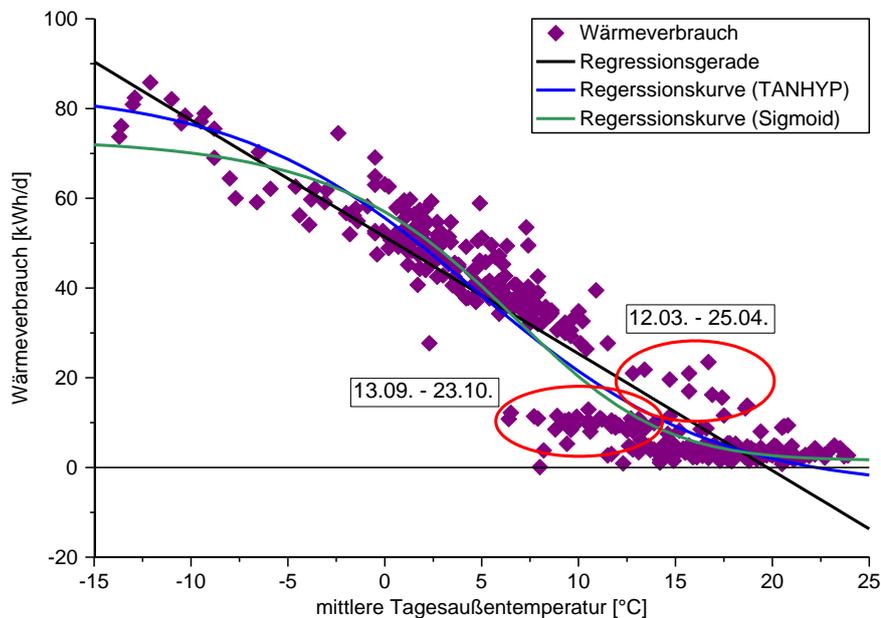


Abbildung 3-11: Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch und mittlerer Außentemperatur, Miesbach 2012

Es wird deutlich, dass Mühlbachers [MÜH 07] gemachte Annahmen nur zwischen  $-5\text{ °C}$  und  $10\text{ °C}$  zutreffen. Bei sehr kalten Temperaturen steigt der Heizkreisverbrauch weiter. Weiterhin muss festgestellt werden, dass die manuellen Eingriffe in das Heizungssystem durch alle drei gefundenen Regressionsfunktionen nicht abgebildet werden können. Insbesondere die Wärmeverbräuche zwischen dem 13. September und dem 23. Oktober liegen unterhalb den Regressionsfunktionen; die Wärmeverbräuche von Mitte März bis Ende April sind trotz höherer Außentemperaturen im Vergleich größer und liegen zudem über den Kurven.

Gegenüber den Sigmoidkurven hat die Regressionsgerade den Vorteil, dass sie den Wärmeverbrauch bei sehr niedrigen Temperaturen besser abbildet. Jedoch wird bei der linearen Funktion der Wärmebedarf bei Außentemperaturen über  $20\text{ °C}$  negativ, was zur Folge hätte, dass das Gebäude gekühlt werden müsste. Aufgrund des Fehlens einer Klimaanlage, ist der Heizwärmebedarf null und der

Wärmeverbrauch entspricht der Warmwasserentnahme.

Eine mögliche Lösung der optimalen Regression des Wärmeverbrauchs findet sich bei Beck [BECK 12]. Er hat in seiner Arbeit die Wärmeverbräuche aus einem Mikro-KWK-Feldtest untersucht und ist zu dem Schluss gekommen, dass zwei Regressionsgeraden, eine für den Heizbetrieb und eine weitere für den Sommer, den tatsächlichen Wärmeverbrauch am besten widerspiegeln: Die separate (lineare) Sommerregression bildet die Grundlast in Form der Warmwasserbereitstellung adäquat ab. Die Wintergerade veranschaulicht demgegenüber einen linearen Zusammenhang zwischen dem Heizkreisverbrauch und der Außentemperatur. Der Schnittpunkt der Wintergerade mit der x-Achse liegt in einem Temperaturbereich größer der Heizgrenztemperatur, weshalb beide Geraden für eine sinnvolle Prognose verwendet werden können.

Die verschiedenen Eingriffe in das Heizungssystem in Miesbach durch den Benutzer werden nunmehr auch mittels zweier Geraden nur unzureichend abgebildet. Abbildung 3-12 zeigt den Versuch einer Approximation mit einer zweiten Regressionsgerade für die Zeiträume ohne Heizbetrieb (Abbildung 3-12, links) bzw. mit reduziertem Betrieb (Abbildung 3-12, rechts). Im linken Diagramm wird der Wärmeverbrauch im Sommer sehr gut angenähert, der reduzierte Heizbetrieb jedoch äußerst ungenau wiedergegeben. Im rechten Fall werden alle „normalen“ Heiztage einigermaßen gut angenähert, die Wärmeverbräuche an den kälteren Tagen ohne Heizbetrieb jedoch stark überschätzt.

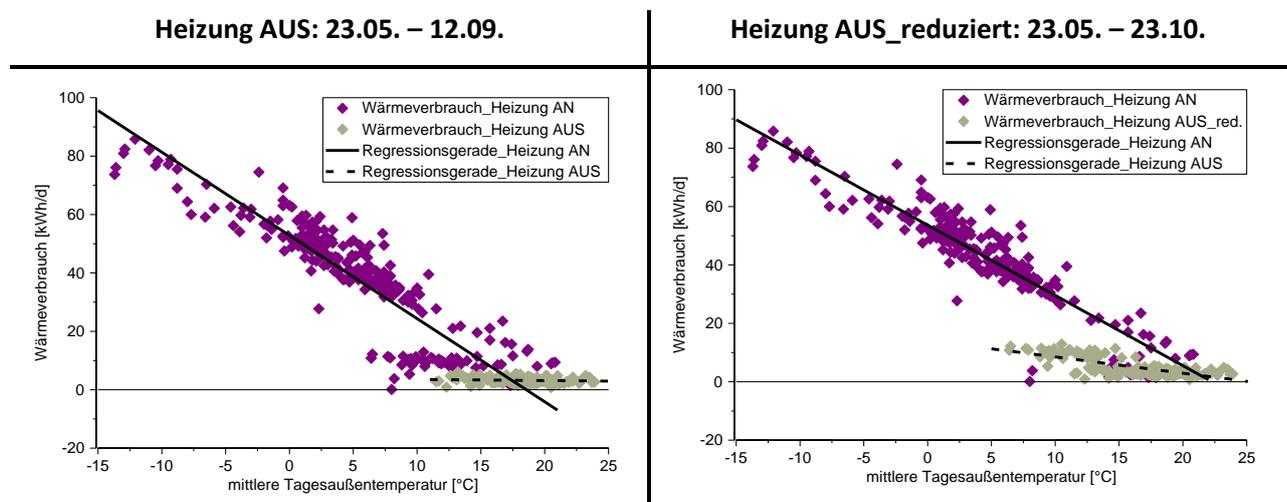


Abbildung 3-12: Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch und mittlerer Außentemperatur, 2 Regressionsgeraden, Miesbach 2012

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Wärmeverbrauch zwar prinzipiell mit der Außentemperatur korreliert, bei Veränderungen der Heizkreiseinstellungen eine sinnvolle Wärmepronose jedoch nicht mehr möglich ist, weshalb es plausibel erscheint, den Zusammenhang (zwischen Außentemperatur und Wärmeverbrauch) neu zu bilden.

### 3.1.5 Zusammenfassung Miesbach Feldtest

Die Analyse des Feldtests in Miesbach zeigt, dass im Heizbetrieb der Wärmeverbrauch linear mit fallender Außentemperatur steigt. Außerhalb der Heizperiode entspricht der Wärmeverbrauch dem

Warmwasserverbrauch und ist annähernd konstant. Auf diese Zusammenhänge wird in den aktuell eingesetzten BHKW-Steuerungen jedoch nicht zurückgegriffen.

Ebenfalls kann festgestellt werden, dass der BHKW-Betrieb hinsichtlich Laufzeit und Taktverhalten in vielen Fällen nicht optimal ist. Insbesondere an Übergangstagen mit Heizkreisverbräuchen, die ungefähr der halben BHKW-Leistung entsprechen, tritt ein starkes Taktverhalten auf. An diesen Tagen ist der Speicher weder in der Lage über längere Zeiträume den Heizkreis zu versorgen, noch kann er genügend Wärme aufnehmen, damit das BHKW längere Zyklen erreichen kann. Ferner zeigt die Analyse, dass die Zuschaltung des Spitzenlastkessels nicht optimal erfolgt (vgl. Abbildung 3-9).

Ergänzend lässt sich festhalten, dass der Startzeitpunkt des BHKW von den manuell eingestellten Sollwerten abhängt. Das BHKW startet in der Heizperiode am Ende der Nachtabenkung, also zeitgleich mit dem Start der Heizkreispumpe. Der Start erfolgt demnach deutlich vor dem Aufstehen der Bewohner. Im Sommer hingegen ist die Stromproduktion über den Tag verteilt.

### 3.2 Mikro-KWK-Prüfstand

Der an der Technischen Universität München aufgebaute Mikro-KWK-Prüfstand (Abbildung 3-13) bietet die Möglichkeit, Versuche realitätsnah durchzuführen. Das Hauptaugenmerk der Prüfstandsuntersuchungen liegt dabei auf dem Verhalten des thermischen Speichers, weshalb dieser mit zusätzlichen Temperaturfühlern ausgestattet wurde. Um das Mikro-BHKW-Verhalten möglichst realistisch nachzubilden, wurde zudem eine dynamische Wärmelast implementiert.

**Gesamtansicht**



**Verbraucherseite**



Abbildung 3-13: Mikro-KWK-Prüfstand am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Der Prüfstand spielt in dreierlei Hinsicht im Forschungsprozess dieser Arbeit eine wichtige Rolle: So können zum Ersten die im Feldtest identifizierten Ineffizienzen mit Hilfe des Prüfstands detailliert analysiert und behoben werden („betreiberoptimale Betriebsführung“). Diese „optimierte“ Betriebsführung dient im Weiteren als Basisszenario. Zum Zweiten, und darum wird es insbesondere im vierten Kapitel gehen, wird über systematische Be- und Entladeversuche ein Speichermodell entwickelt, welches eine neue Definition von Speichergrenzen bzw. der Speicherkapazität zulässt, womit einem weiteren sich aus den Feldtest-Ergebnissen ergebenden Modifikationsbedarf begegnet wird. Zum dritten wird auf den Prüfstand zurückgegriffen, um die Anwendung der aus der Optimierungsfunktion abgeleiteten BHKW-Fahrpläne, Speichereinsatzpläne und der intelligenten Regelung zu testen.

### 3.2.1 Prüfstandsaufbau

Am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik wurde im Jahr 2012 ein Mikro-KWK-Prüfstand aufgebaut [WILD 12]. Dieser besteht aus einem Whispergen Mikro-BHKW, einem Kombispeicher, einem Zapfgenerator und einer dynamischen Last für Heizkreis und Zirkulation. Letztgenannte wird durch Wärmetauscher mit durchflussgeregeltem Kühlwasser emuliert. Das Kühlwasser wird von einer externen Kältemaschine zur Verfügung gestellt. Die Kaltwassertemperatur liegt meist zwischen 10 °C und 14 °C. Abbildung 3-14 zeigt den schematischen Aufbau und die Positionierung der eingesetzten Messtechnik (ohne Speicherfühler, Wärmetauscher und Kühlkreis).

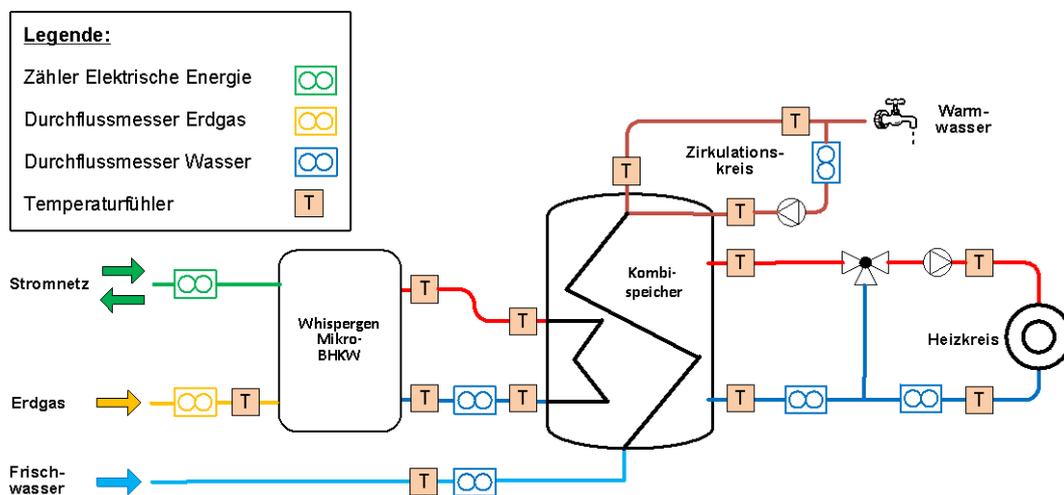


Abbildung 3-14: Schematische Darstellung des Mikro-KWK Prüfstands

#### Heizkreis

Das Wasser für den Heizkreis wird aus dem heißen, oberen Teil des Speichers entnommen und fließt zum Heizkreismischer. Dieser regelt über die Menge des zugemischten Heizkreisrücklaufwassers die Heizkreisvorlauftemperatur ( $T_{HK,WT,VL}$ ), welche in der Regel außentemperaturabhängig über die Heizkurve vorgegeben wird. Messtechnisch erfasst werden die Temperaturen und Durchflüsse vor und nach dem Mischer (vM bzw. nM).

$$\dot{Q}_{HK,vM} = \dot{V}_{HK,vM} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times (T_{HK,Sp,VL} - T_{HK,Sp,RL}) \quad (3.5)$$

$$\dot{Q}_{HK,nM} = \dot{V}_{HK,nM} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times (T_{HK,WT,VL} - T_{HK,WT,RL}) \quad (3.6)$$

### Zapfgenerator

Um verschiedene Zapfvorgänge (Händewaschen, Spülen, Dusche, Vollbad) nachstellen zu können, gibt es für den Warmwasserverbrauch drei verschiedene pneumatische Hähne, die manuell auf folgende Werte voreingestellt sind: 0,02 l/s, 0,04 l/s und 0,07 l/s. Die Hähne können sowohl individuell als auch in allen denkbaren Kombinationen angesteuert werden. Der maximale Durchfluss ist jedoch durch den Rohrleitungsdruck begrenzt. Ebenso kann während einer Messaufzeichnung durch einen nicht konstanten Druck der Volumenstrom leicht variieren. Da jedoch Energiemengen oder Volumina gezapft werden, hat ein nicht konstanter Volumenstrom einen nur sehr geringen Einfluss auf die Messergebnisse. Die Zapfleistung berechnet sich aus dem Zapfdurchfluss (identisch dem Kaltwasserzufluss) und dem Temperaturunterschied zwischen zugeführtem Kaltwasser ( $T_{KW}$ ) und Warmwasser, das aus dem Speicher ( $T_{WW,Sp}$ ) fließt. Zusätzlich misst ein weiterer Temperaturfühler die Temperatur an der Zapfstelle ( $T_{WW,zst}$ ), die während des Zirkulationsbetriebs nur minimal kleiner als  $T_{WW,Sp}$  ist. Die Warmwasser- oder Zapfleistung berechnet sich folgendermaßen:

$$\dot{Q}_{WW} = \dot{V}_{KW} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times (T_{WW,Sp} - T_{KW}) \quad (3.7)$$

### Zirkulationssystem

Am Prüfstand ist eine Zirkulationsleitung installiert. Bei Aktivierung der Zirkulationspumpe fließt Warmwasser aus dem Speicher zu einem (geregelten) Wärmetauscher und anschließend über eine Zirkulationslanze zurück in den Speicher. Die Zirkulationsleistung berechnet sich aus dem Durchfluss,  $T_{WW,Sp}$  und der Zirkulationstemperatur ( $T_{ZK}$ ) am Speichereintritt.

$$\dot{Q}_{ZK} = \dot{V}_{ZK} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times (T_{WW,Sp} - T_{ZK}) \quad (3.8)$$

### BHKW

Der Erdgasverbrauch wird von einem Experimentiergaszähler gemessen. Die Prüfstandssoftware (vgl. Kap. 0) berechnet aus den digitalen Impulseingängen (1 Impuls pro Liter) den Erdgasdurchfluss. Für die zugeführte Leistung muss zuerst der gemessene Erdgasvolumenstrom in Normbedingungen ( $p_n = 1013,25 \text{ mbar}$ ,  $T_n = 273,15 \text{ K}$ ) umgerechnet werden:

$$\dot{V}_{Erdgas,n} = \dot{V}_{Erdgas} \times \frac{T_n}{T_{Erdgas}} \times \frac{p_l + \Delta p_{Erdgas}}{p_n} \quad (3.9)$$

Der Gasdruck setzt sich dabei aus dem atmosphärischen Luftdruck ( $p_l$ , [MET 14]) und dem Gasüberdruck während des Betriebs ( $\Delta p_{Erdgas} = 24\text{mbar}$ ) zusammen. Anschließend kann mit Hilfe des Heizwerts ( $H_{i,n} = 10,1207\text{kWh/m}^3$ , [SWM 13-d]) die Erdgasleistung berechnet werden:

$$P_{Erdgas,n} = \dot{V}_{Erdgas,n} \times H_{i,n} \quad (3.10)$$

Die thermische BHKW-Leistung wird mit zwei Temperaturfühlern ( $T_{BHKW,VL/RL}$ ) direkt am BHKW bestimmt. Um die vom BHKW in den Speicher eingebrachte Leistung zu ermitteln, wurden zwei zusätzliche Fühler ( $T_{BHKW,Sp,VL/RL}$ ) unmittelbar am Speicher angebracht. Der Leitungsverlust zwischen dem BHKW-Ausgang und dem Speichereingang kann aus der Differenz der beiden BHKW-Leistungen abgeleitet werden:

$$\dot{Q}_{BHKW,th} = \dot{V}_{BHKW} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times (T_{BHKW,VL} - T_{BHKW,RL}) \quad (3.11)$$

$$\dot{Q}_{BHKW,th,Sp} = \dot{V}_{BHKW} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times (T_{BHKW,Sp,VL} - T_{BHKW,Sp,RL}) \quad (3.12)$$

$$\dot{Q}_{V,BHKW,Leitung} = \dot{Q}_{BHKW,th} - \dot{Q}_{BHKW,th,Sp} \quad (3.13)$$

### 3.2.2 Whispergen Mikro-BHKW

Der Whispergen Stirlingmotor (Abbildung 3-15) hat im Vergleich zum Microgen SM bei gleicher elektrischer Leistung eine um ca. 40 % höhere thermische Nennleistung (8 kW). Im Gegensatz zu den anderen Mikro-KWK-Anlagen, die über einen redundanten Spitzenlastkessel verfügen, sorgt beim WG ein zusätzlicher Brenner am Abgaswärmetauscher für die Abdeckung von thermischen Spitzen. Verglichen mit den SLK der anderen Hersteller, welche auf die Normheizlast eines Gebäudes ausgelegt sind, beträgt die thermische Leistung des WG Zusatzheizgeräts (ZHG) nur 6 kW. Falls die gesamte KWK-Anlagenleistung ( $14\text{ kW}_{th}$ ) nicht für die thermische Nachfrage ausreicht, können weitere Wärmeerzeuger zusätzlich installiert werden.

Wegen der größeren thermischen Motorleistung sind auch der elektrische Wirkungsgrad (10 - 11 %, Tabelle 3-3) und die Stromkennzahl (0,127) kleiner als bei den Microgen BHKW. Aufgrund seiner Entwicklung in Neuseeland und ersten Projekten in Großbritannien, also in Ländern, in denen es traditionell keine Heizungskeller gibt, war das Gerät anfangs unterbaufähig, z.B. für die Küche, geplant. Dementsprechend sind die Anschlüsse hinter dem Gerät und nicht wie beim Viessmann BHKW unten (Vorlauf, Rücklauf, Gasleitung) und oben (Abgas). Auf dem deutschen Markt wurde das Whispergen

BHKW als bodenstehendes Gerät verkauft.<sup>25</sup>



Abbildung 3-15: Whispergen Mikro-BHKW, [EHE 10]

Tabelle 3-3: Technische Daten Whispergen Mikro-BHKW, [EHE 10]

$\dot{Q}_{th,Stirlingmotor}$ [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
<b>Schall-Leistungspegel [db(A)]</b>	48
<b>Abmessungen [L x B x H] [mm]</b>	563 x 491 x 838
<b>Gewicht [kg]</b>	142

Für eine optimale Stromproduktion bzw. eine möglichst lange Laufzeit kann der Betreiber zwischen einem wärmegeführten und einem stromgeführten Betrieb wählen. Im wärmegeführten Betrieb gibt es Sollwerte für den Heizkreis und für das Warmwasser, deren Einhaltung von den Speicherfühlern überprüft wird. Wenn diese Werte unterschritten werden, startet das BHKW. Sollten die Speichertemperaturen weiter fallen, können bis zu drei zusätzliche externe Wärmeerzeuger kaskadiert zugeschaltet werden. Des Weiteren erlaubt es die Whispergen Regelung, maximal drei Heizkreise und eine Zirkulationspumpe zu steuern. Im Wärmeführungsmodus kann der Betreiber durch eine Optimierung der einstellbaren Parameter (siehe Anhang, Tabelle A-4) versuchen die Stromeigennutzungsquote zu erhöhen.

Bei der Stromführung gibt es zwei unterschiedliche Betriebsarten: Im Modus „Stromführung nach Sensor“ muss am Stromzähler ein Impulsausgang angeschlossen sein. Die BHKW-Steuerung regelt dann, wann der Whispergen bevorzugt laufen soll. Im zweiten Betriebsmodus („Stromführung nach Schaltzeiten“) hat der Betreiber die Möglichkeit, Schaltzeiten zu wählen, um somit die gewünschten Laufzeiten zu bestimmen. Für beide Modi muss eine zusätzliche Startverzögerung programmiert werden [SAN 11-b]. Diese senkt den jeweiligen Temperatursollwert außerhalb der eigentlichen Betriebszeit um die eingestellte Temperatur ab.

<sup>25</sup> Die Herstellerfirma des Whispergen Mikro-BHKW, die ehe (efficient home energy), hat am 26. November 2012 einen Insolvenzantrag gestellt. Ca. drei Monate später musste auch die sanevo home energy, einer der Vertriebspartner des Whispergen in Deutschland, Insolvenz anmelden. Zurzeit (Stand: 19.12.2013) wird das Whispergen BHKW nicht verkauft. Aufgrund fehlender Ersatzteile können beschädigte Geräte auch nicht repariert oder getauscht werden [BHKW 13-c].

<sup>26</sup> Der Wert berechne sich über den Mittelwert aus 40/30°C und 80/60°C.

### 3.2.3 Speicher

Das Whispergen BHKW wird standardmäßig mit einem Kombispeicher (Multihygieneufferspeicher Typ 800 L, [SAN 13]) ausgeliefert. Die hydraulischen Anschlüsse, die Positionen der drei Speicherfühler (oben, mitte, unten) und die für die Speicherinhaltsbestimmung zusätzlich installierten Speichertemperaturfühler zeigt Abbildung 3-16:

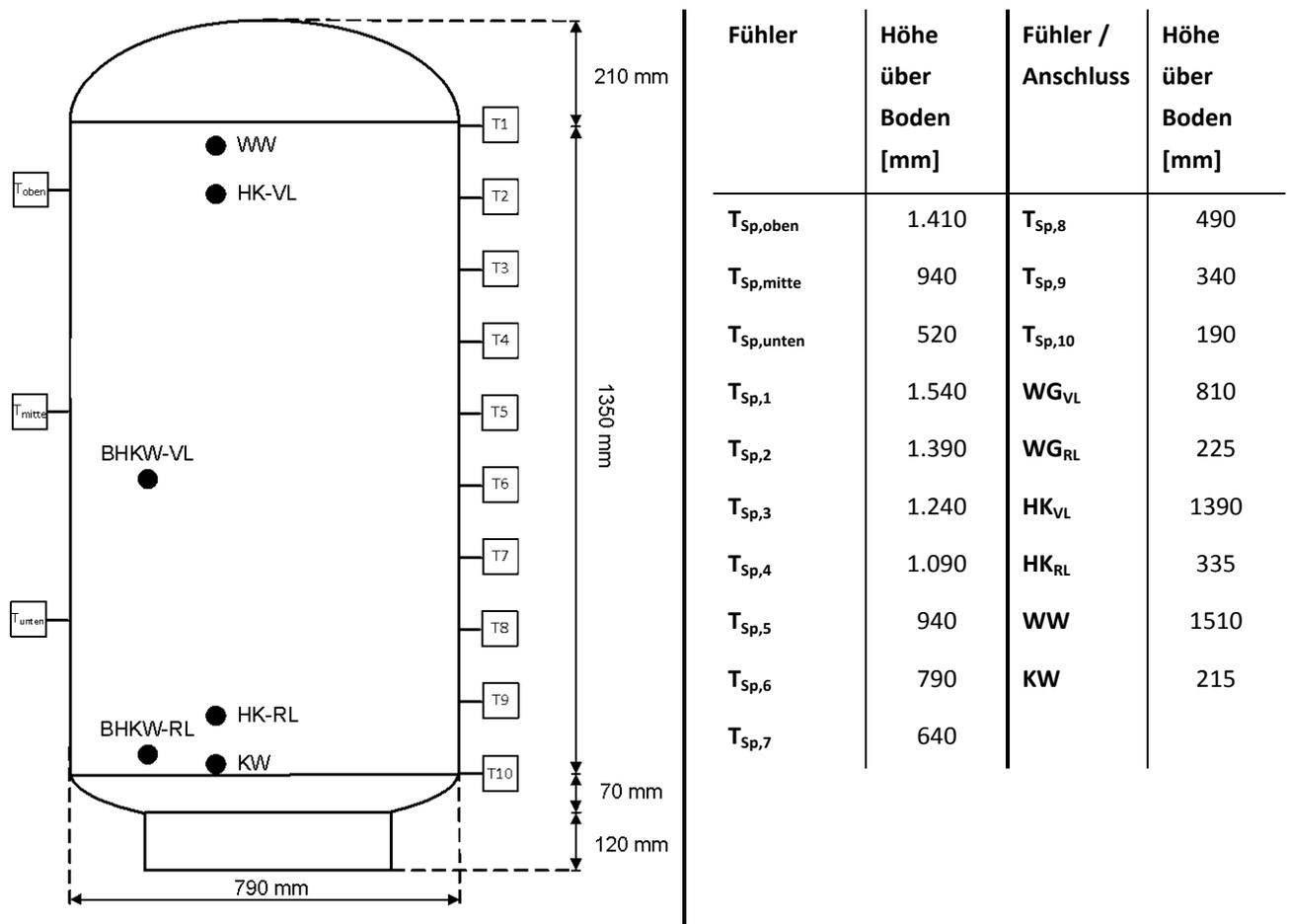


Abbildung 3-16: Schematische und tabellarische Darstellung der Anschlusshöhen und Positionierung der Speichertemperaturfühler am Whispergen Speicher, [SAN 13]

Für die in Kapitel 3.3.2 folgende Analyse der BHKW-Regelung werden die Temperaturwerte der Whispergen Speicherfühler ( $T_{Sp,oben}$ ,  $T_{Sp,mitte}$ ,  $T_{Sp,unten}$ ) benötigt. Da diese von der Prüfstandssoftware nicht aufgezeichnet werden, wurden diese manuell notiert und durch die Temperaturen der Speicherfühler mit der Methode des kleinsten Fehlers approximiert. Der Fehler verkleinert sich in Folge dieser Maßnahme im relevanten Messbereich von über  $\pm 1,0$  °C auf weniger als  $\pm 0,3$  °C. Die gefundenen Annäherungsfunktionen sind in den Formeln (3.14) bis (3.16) dargestellt:

$$T_{Sp,oben} = 1,24 \text{ }^{\circ}\text{C} \times \ln\left(\frac{T_{Sp,2}}{1 \text{ }^{\circ}\text{C}}\right) - 4,52 \text{ }^{\circ}\text{C} + T_{Sp,2} \quad \text{für } 35^{\circ}\text{C} \leq T_{Sp,2} \leq 65^{\circ}\text{C} \quad (3.14)$$

$$T_{Sp,mitte} = 1,16 \text{ }^{\circ}\text{C} \times \ln\left(\frac{T_{Sp,5}}{1 \text{ }^{\circ}\text{C}}\right) - 4,22 \text{ }^{\circ}\text{C} + T_{Sp,5} \quad \text{für } 35^{\circ}\text{C} \leq T_{Sp,5} \leq 65^{\circ}\text{C} \quad (3.15)$$

$$T_{Sp,unten} = 1,39 \text{ }^{\circ}\text{C} \times \ln\left(\frac{T_{Sp,7}}{1 \text{ }^{\circ}\text{C}}\right) - 5,13 \text{ }^{\circ}\text{C} + T_{Sp,7} \quad \text{für } 35^{\circ}\text{C} \leq T_{Sp,7} \leq 65^{\circ}\text{C} \quad (3.16)$$

### 3.2.4 Messtechnik

Der für die Bestimmung des Gasverbrauchs verwendete Experimentiergaszähler (trockene Bauart) stammt von der Firma Elster [ELS 13-a]. Die Fehlertoleranz liegt bei  $\pm 2 \%$ .

Für die Temperaturmessung wurden Pt100-Sensoren in Vierleiterausführung von der Firma Fühlersysteme eingesetzt. Die gewählte Genauigkeitsklasse ist „1/10 Klasse B“, was einer maximalen Abweichung von  $\pm(0,03 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0,0005 \times T \text{ [}^{\circ}\text{C]})$  entspricht [REC 08]. Bei einer Systemtemperatur von  $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ergibt sich ein Fehler von  $\pm 0,0625 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die für die Leistungsmessung benötigte Temperaturdifferenz kann also im schlechtesten Fall einen Fehler von  $0,125 \text{ }^{\circ}\text{C}$  aufweisen. Um diesen weiter zu verkleinern, wurden die jeweiligen Temperatursensorpaare mit einem Kalibriergerät von Jofra (ATC 156B, [AME 13]) kalibriert. Laut Hersteller beträgt dessen Genauigkeit  $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Für die Messung des Durchflusses werden magnetisch-induktive Durchflussmessgeräte (MID) der Firma Endress+Hauser eingesetzt. Diese sind zweckmäßig, wenn hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit und -dynamik gestellt werden. Wegen der steilen Gradienten bei den Zapfvorgängen wurden in der Frischwasserleitung ein Proline Promag 53H Gerät (höchste Messdynamik) und für alle anderen Durchflussmessstellen Proline Promag 50H Geräte (normale Dynamik) installiert [E+H 10]. Die maximale Messabweichung des Stromausgangs (0 - 20 mA) dieser Geräte beträgt  $\pm 5 \mu\text{A}$ . Die Messgenauigkeit sinkt demzufolge bei Durchflüssen kleiner dem Nenndurchfluss. Die Durchflussmesser werden vor der Auslieferung von Endress+Hauser kalibriert, wodurch der Fehler auf  $1/10$  reduziert wird. Der Fehler ist nach der Kalibrierung aller verwendeten MID im Hauptmessbereich ( $\dot{V} \geq 0,4 \times \dot{V}_{\text{Nenn}}$ ) kleiner  $0,1 \%$ .

Die elektrische Leistung des Mikro-BHKW wird mit einem Wirkleistungsumformer (WLU), der über einen Stromwandler (Wandlerverhältnis: 5:1) verfügt, gemessen. Die Herstellerfirma Müller+Ziegler nennt im Datenblatt eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,5 \%$  sowohl für den Umformer als auch für den Wandler [M+Z 09]. Der WLU gibt ein analoges Signal zwischen  $-20 \text{ mA}$  und  $+20 \text{ mA}$  aus. Damit ergibt sich die Möglichkeit, sowohl die Stromerzeugung als auch den Eigenverbrauch des BHKW zu bestimmen. Da wie in Abbildung 3-14 dargestellt die Strommessung außerhalb des BHKW stattfindet, wird immer der Nettostrom (Stromerzeugung minus Eigenverbrauch) ausgegeben.

$$P_{BHKW,el,netto} = P_{BHKW,el,brutto} - P_{BHKW,el,EV} \quad (3.17)$$

Bei der Übertragung der Messwerte zum Messrechner kommt es zu Übertragungsfehlern. Für die Analogausgänge betragen diese  $0,46 \%$  (unipolar, MID) bzw.  $0,55 \%$  (bipolar, WLU) [NI 13-a]. Da die

digitalen Ausgänge sehr schnell (10 kHz, [NI 13-b]) abgetastet werden, ist der Fehler jedoch vernachlässigbar. Bei den Temperaturfühlern wurde die Übertragungsstrecke „mitkalibriert“, weshalb ebenfalls kein zusätzlicher Fehler berücksichtigt werden muss. Alle Messgeräte inklusive der maximalen Messfehler fasst Tabelle 3-4 zusammen.

**Tabelle 3-4: Eingesetzte Messtechnik und deren relativer Fehler**

Messgerät	Hersteller	Bezeichnung	relativer Fehler
<b>Gaszähler, [ELS 13-a]</b>	Elster	Experimentier- gaszähler	±2,00 %
<b>Temperaturfühler, [REC 08]</b>	Fühler- systeme	Pt-100, Genauigkeits- klasse 1/10 B	kalibriert
<b>Kalibrator, [AME 13]</b>	Jofra	ATC 156B	±0,10 °C
<b>Durchflussmesser, [E+H 10]</b>	Endress+ Hauser	Proline Promag 50H und 53H	±0,58 % (±1,04 %) <sup>27</sup>
<b>Wirkleistungsmesser (inkl. Stromwandler), [M+Z 09]</b>	Müller-Ziegler	Pw - MU	±1,00 % (±1,55 %) <sup>27</sup>

### 3.2.5 Genauigkeitsabschätzung

Um die Aussagekraft der folgenden Prüfstandsmessungen beurteilen zu können, ist eine „Fehlerrechnung“ bzw. eine Genauigkeitsabschätzung unabdingbar. Mit Hilfe der in Tabelle 3-4 gegebenen Fehlertoleranzen und dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz [SCH 07] kann die Genauigkeit bei der Berechnung der elektrischen, der thermischen und der Erdgasbezugsleistung bestimmt werden.

Bei der Messung der elektrischen Leistung ist die Fehlertoleranz des Wirkleistungsumformers und des Stromwandlers jeweils 0,5 %. Zusätzlich beträgt der maximale Messfehler der analogen Signalübertragung zum Mess-PC 0,55 %. Für die Bestimmung der thermischen Leistung ist der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf notwendig. Entsprechend dem Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt sich:

$$\Delta(T_{VL} - T_{RL})_{abs} = \Delta(\Delta T)_{abs} = \sqrt{\Delta T_{VL}^2 + \Delta T_{RL}^2} \quad (3.18)$$

Nach der Kalibrierung beträgt der maximale Fehler der Temperatursensoren 0,10 °C und jener der Temperaturdifferenz folglich 0,14 °C. Der relative Fehler wird auf die Temperaturdifferenz bezogen. Das führt bei kleinen Differenzen zu sehr großen relativen Fehlern.

<sup>27</sup> Angabe inklusive des Fehlers der analogen Signalübertragung an den Mess-PC.

$$\Delta(\Delta T)_{rel} = \frac{\Delta(\Delta T)_{abs}}{T_{VL} - T_{RL}} \times 100 \% \quad (3.19)$$

Der Durchflussfehler hängt von der Genauigkeit des MID ab. Der relative Fehler der Promag Geräte inklusive des Übertragungsfehlers zum PC beträgt 1,04 %. Zusammen mit dem oben definierten Temperaturdifferenzfehler kann der relative Fehler der thermischen Leistung berechnet werden:

$$\Delta\dot{Q}_{th,rel} = \sqrt{\Delta\dot{V}_{rel}^2 + \Delta(\Delta T)_{rel}^2} \quad (3.20)$$

Für die Fehlerbestimmung der zugeführten Brennstoffleistung muss zuerst der Fehler, der bei der Umrechnung auf Normbedingungen entsteht, ermittelt werden:

$$\Delta\dot{V}_{Erdgas,n,rel} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{abs}}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_{abs}}{p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{abs}}{T}\right)^2} \quad (3.21)$$

Der absolute Fehler des Gastemperatursensors ist 0,1 °C. Da der relative Fehler auf die minimale Gastemperatur in Kelvin (ca. 288 K) bezogen wird, beträgt dieser 0,035 % und kann daher vernachlässigt werden. Der absolute Luftdruck ist auf eine Nachkommastelle genau angegeben. Durch die ¼-stündige Abrufung und den Ortsfehler (Messort des Luftdrucks [MET 14] ist vom Gaszähler ca. 500 m entfernt und liegt auf ähnlicher Höhe) kann mit einem maximalen Fehler von 1 mbar ( $\Delta p_{rel} = 0,1 \%$ ) gerechnet werden. Der relative Fehler bei der Umrechnung des Gasvolumenstroms auf Normbedingungen wird demzufolge von der Messunsicherheit des Experimentiergaszählers ( $\Delta\dot{V}_{rel} = 2,0 \%$ ) dominiert.

Um den Fehler beim Erdgasverbrauch zu bestimmen, muss im nächsten Schritt der Heizwertfehler mitberücksichtigt werden:

$$\Delta P_{Erdgas,rel} = \sqrt{\Delta\dot{V}_{Erdgas,n,rel}^2 + \Delta H_{i,rel}^2} \quad (3.22)$$

Da das eingesetzte Erdgas an diesem Prüfstand nicht aus einer Gasflasche, sondern aus der Leitung kommt, treten im Laufe eines Jahres aufgrund der divergierenden Brennstoffzusammensetzung Abweichungen im Heizwert auf. Die Stadtwerke München veröffentlichen im Internet die Abrechnungsbrennwerte der letzten Monate [SWM 13-d]. Abbildung A-3 im Anhang gibt die aus den Brennwerten berechneten Heizwerte, deren Mittelwert und den von der Software verwendeten Wert wieder. Im relevanten Messzeitraum von Januar bis Oktober 2013 lag die maximale Fehlerdifferenz aus dem herangezogenen Wert und dem größten Ausreißer (April 13) bei 0,034 kWh/m<sup>3</sup>. Da die monatlichen Werte Mittelwerte darstellen, liegen die einzelnen Tageswerte sowohl über als auch unter dem Mittelwert. Nimmt man für die maximale Tagesabweichung einen Zuschlag von 100 % an, ergibt

sich ein maximaler Fehler von 0,067 kWh/m<sup>3</sup> bzw. 0,67 %. Der relative Fehler bei der Bestimmung der Erdgasbezugsleistung ist demzufolge 2,11 %.

Bei der Berechnung der Wirkungsgrade muss für die jeweiligen Fehler ebenfalls das Fehlerfortpflanzungsgesetz angewendet werden:

$$\Delta \eta_{el,rel} = \sqrt{\Delta P_{el,rel}^2 + \Delta P_{Erdgas,rel}^2} \quad (3.23)$$

$$\Delta \eta_{th,rel} = \sqrt{\dot{Q}_{th,rel}^2 + \Delta P_{Erdgas,rel}^2} \quad (3.24)$$

$$\Delta \eta_{ges,rel} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P_{el,abs}}{P_{el} + \dot{Q}_{th}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \dot{Q}_{th,abs}}{P_{el} + \dot{Q}_{th}}\right)^2 + \Delta P_{Erdgas,rel}^2} \quad (3.25)$$

Tabelle 3-5 zeigt die Ergebnisse der Genauigkeitsabschätzung für das Whispergen BHKW im Nennbetrieb. Die relativen Fehler liegen dabei in einer Spanne von 1,46 % bis 2,73 %, wobei der größte Fehler bei der Berechnung des thermischen Wirkungsgrads auftritt. Aufgrund der von Herstellerseite erfolgten Kalibrierung der Durchflussmesser ist der Fehler bei der Bestimmung des Volumenstroms im relevanten Messbereich deutlich kleiner. Um die Messgenauigkeit signifikant zu erhöhen, müsste ein Gaszähler mit einer kleineren Messungenauigkeit installiert werden. Zum Beispiel bietet die Herstellerfirma des Experimentiergaszählers Elster neben der trockenen auch Geräte in nasser Bauart mit einem maximalen Messfehler von ±1 % an [ELS 13-b].

**Tabelle 3-5: Relative und absolute Fehler bei der der Leistungs- und Wirkungsgradbestimmung des Whispergen Mikro-BHKW**

	$\Delta P_{el}$	$\Delta \dot{Q}_{th}$	$\Delta P_{Erdgas}$	$\Delta \eta_{el}$	$\Delta \eta_{th}$	$\Delta \eta_{ges}$
<b>rel. Fehler</b>	1,55 %	1,74 %	2,11 %	2,62 %	2,73 %	2,62 %
<b>abs. Fehler</b>	15,5 W	136 W	194 W	0,285 %	2,31 %	2,51 %

### 3.2.6 Datengrundlage: Gebäude und Wärmeverbräuche

Im Rahmen einer Diplomarbeit [KNE 11] wurde ein Gebäudemodell mit der Simulationssoftware TRNSYS [TRN 14] entwickelt, welches als Grundlage für die späteren Typtageversuche am Mikro-KWK-Prüfstand dient. Da die thermische Leistung des Whispergen Mikro-BHKW (8 kW<sub>th</sub>) im Vergleich zu anderen Mikro-BHKW relativ groß ist, wurde der Typ EFH 49 „nicht renoviertes Einfamilienhaus der Baualtersklasse 1949 bis 1969“ [IWU 06] herangezogen. Tabelle 3-6 zeigt die wichtigsten Gebäudedaten im Überblick.

Tabelle 3-6: Daten des simulierten Gebäudes

IWU Gebäude [IWU 06]	Standort	beheizte Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	Bewohner
EFH 49	München	118	4

Der Warmwasserbedarf wurde der VDI-Norm 4655 entnommen [VDI 4655]. Das Warmwasser soll über ein Zirkulationssystem im Gebäude verteilt werden. Die durchschnittlichen Zirkulationsverluste betragen 350 Watt (vgl. [CAN 12]). Abbildung 3-17 veranschaulicht das Warmwasserzapfprofil und die zu deckenden Zirkulationsverluste.

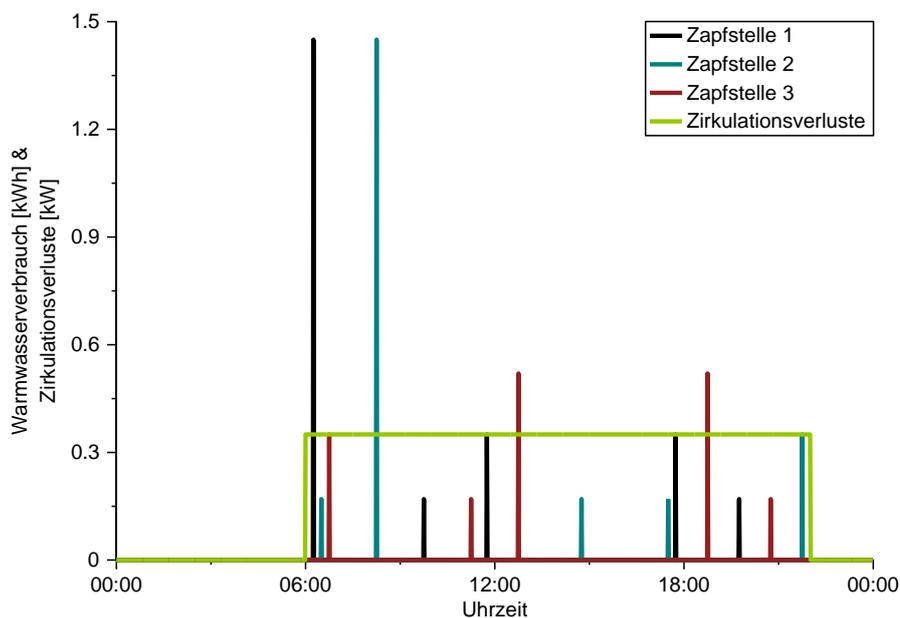


Abbildung 3-17: Warmwasserverbrauch und Zirkulationsverluste

Für die in Kapitel 3.4 durchzuführenden Typtagmessungen wurden fünf Gruppen definiert. Neben einer Gruppe „Sommer“, in der kein Heizkreisverbrauch auftritt, sind das die Gruppen: 0° C, 5° C, 10° C und 15° C. Für die bereits gruppierten Tage eines Jahres wurden die jeweiligen Heizkreisverbräuche aus dem sogenannten „20/18“-Szenario<sup>28</sup> nach Kneuer [KNE 11] entnommen. Für die vier letztgenannten Heizgruppen wurde angelehnt an das von Sänger [SÄN 13] beschriebene Verfahren je ein typischer Heizkreisverbrauchslastgang ermittelt. Diese werden in Abbildung 3-18 illustriert.

<sup>28</sup> Kneuer [KNE 11] untersucht den Einfluss der Nachtabsenkung auf den Betrieb von Mikro-BHKW. Für die folgenden Prüfstandsversuche wird das von ihm entwickelte Szenario „20/18“, also eine Raumsolltemperatur 20 °C inklusive einer Nachtabsenkung um 2 °C, ausgewählt.

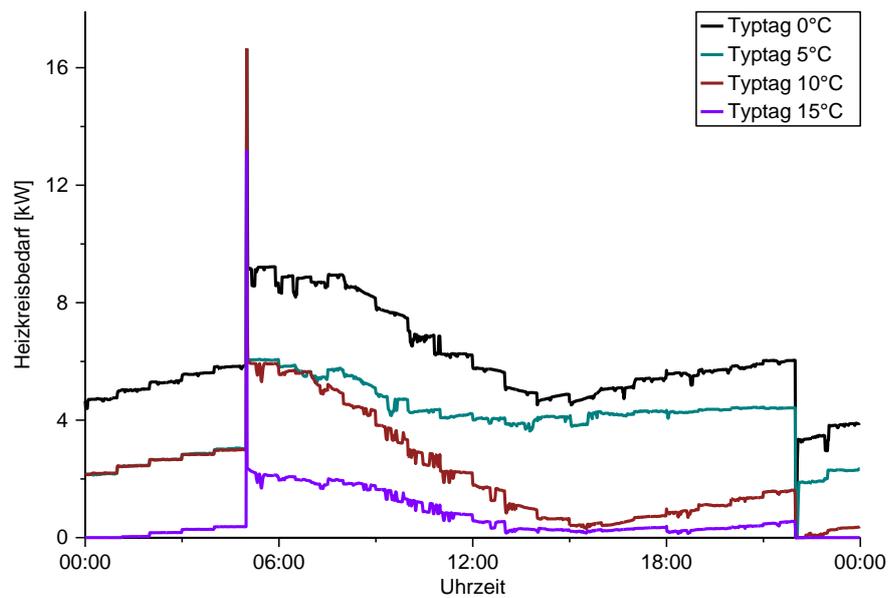


Abbildung 3-18: Heizkreisbedarf der Typtage

Wie die Abbildung verdeutlicht, haben alle vier Lastgänge geringere Leistungen während der Nachtabenkung und eine hohe morgendliche Spitze gemeinsam. Zusätzlich ist die Heizkreisleistung der Typtage 5 °C und 10 °C von 0.00 bis ca. 7.00 Uhr nahezu identisch. Erst danach fällt die thermische Leistung am Typtag 10 °C stark ab. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Außentemperaturverläufe<sup>29</sup> und Sonneneinstrahlungswerte. Die Nacht bei Typtag 10 °C ist vergleichsweise kalt, während tagsüber die Sonne scheint und folglich die Temperatur ansteigt, womit sich insbesondere nachmittags die notwendige Heizleistung reduziert.

Tabelle 3-7 fasst die kumulierten Verbrauchswerte des simulierten Gebäudes zusammen. Wegen des schlecht isolierten Gebäudes (EFH 49) ist der Quotient aus Heizwärme- und Warmwasserbedarf sehr hoch. Der Jahresgesamtwärmebedarf liegt bei 31.832 kWh.

Tabelle 3-7: Tages- und Jahreswärmeverbrauch des simulierten Gebäudes

Tageswärmeverbrauch		Jahreswärmeverbrauch	
max. Heizwärmebedarf <sub>bez.</sub> [kWh/m <sup>2</sup> *a]	232	Heizwärmebedarf [kWh/a]	27.361
Warmwasserbedarf <sub>bez.</sub> [kWh/d]	6,62	Warmwasserbedarf [kWh/a]	2.427
Zirkulationsverluste [kWh/d]	5,60	Zirkulationsverluste [kWh/a]	2.044
Wärmebedarf [kWh/d]	12,22 – 254,65	Wärmebedarf [kWh/a]	31.832

Warmwasser- und Heizungssystem wurden so eingestellt, dass es dem Standort Miesbach entspricht. Die Solltemperaturen für Heizung und Warmwasser werden zwischen 22.00 und 5.00 Uhr um 10 °C

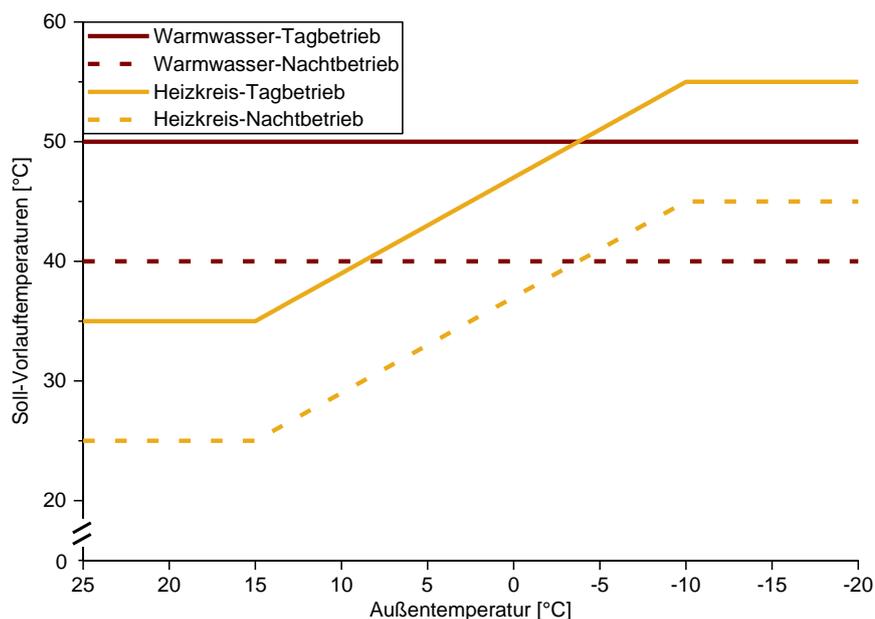
<sup>29</sup> Die Außentemperaturverläufe der Typtage finden sich im Anhang, Abbildung A-4.

abgesenkt. Im Gegensatz zum Feldtest besitzt das Warmwassersystem eine Zirkulationsleitung. Der Zirkulationsbetrieb erfolgt von 6.00 bis 22.00 Uhr, startet also kurz bevor die Bewohner erstmals Warmwasser zapfen (6.15 Uhr) und endet nach der letzten Entnahme. Die Nachtabsenkung endet um 5.00 Uhr. Das BHKW hat demnach eine Stunde Zeit den Speicher auf den Tagessollwert (Warmwasser oder Heizung) aufzuheizen. Obwohl eine Radiatorheizung simuliert wird, sind die Steigung der Heizkurve und damit auch die Heizkreisvorlauftemperatur eher moderat. Der vorgegebene Heizkreisdurchfluss variiert zwischen 0,13 l/s am Typtag 15 °C und 0,18 l/s am Typtag 0 °C. Tabelle 3-8 zeigt die gewählten Einstellungen für das Warmwasser- und Heizungssystem.

**Tabelle 3-8: Voreinstellungen des Heizungs- und Warmwassersystems**

Heizungssystem		Warmwassersystem	
Steigung der Heizkurve [-]	0,8	Warmwassersollwert [°C]	50
HK Vorlauftemperatur bei 0 °C [°C]	47	Zirkulationsbetrieb	6.00 – 22.00 Uhr
HK Vorlauftemperatur min / max [°C]	35 / 55	Nachtabsenkung [°C]	10
Durchfluss Heizkreis [l/s]	0,13 - 0,18		
Nachtabsenkung [°C]	10		

In Abbildung 3-19 sind die Heizkurven (Tagbetrieb und während der Nachtabsenkung) sowie die Warmwassersollwerte über der Außentemperatur aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass für die meisten Stunden des Jahres der Warmwassersollwert über dem Sollwert der Heizkurve liegt. Das hat zur Folge, dass die Regelung meist „warmwasserorientiert“ erfolgt und erst bei Temperaturen unter -3,75 °C auf Heizkreissollwert umschaltet.



**Abbildung 3-19: Heizkurven und Warmwassersollwerte**

### 3.2.7 Steuerung des Prüfstands

Die Software des Mikro-KWK-Prüfstands wurde in LabVIEW [NI 13-c] implementiert. Sie steuert und regelt den Prüfstand. Ferner zeichnet sie sekundlich die gemessenen und berechneten Daten auf. Der Prüfstand kann durch drei verschiedene Modi gesteuert werden:

- manuell
- automatisch
- externe Steuerung

Im manuellen Modus kann jeder Aktor punktuell ein- und ausgeschaltet, sowie Sollwerte manuell vorgegeben werden. Der automatische Modus zeichnet sich dadurch aus, dass der (Typtag-)Versuch eigenständig und selbstregulierend abläuft. Die in den obigen Unterkapiteln dargestellten Sollwerte liefern die Eingangsdaten für den automatischen Betrieb. Sie werden mit Hilfe einer Excel-Vorgabedatei in die Software geladen.

Die Prüfstandsregelung berechnet in beiden Modi anhand der eingelesenen oder der manuell vorgegebenen Sollwerte die Ausgangssignale (Tabelle 3-9) und übermittelt diese an den Prüfstand.

**Tabelle 3-9: Digitale und analoge Ausgangssignale des Mikro-KWK Prüfstands**

Digitale Ausgangssignale	Analoge Ausgangssignale
Heizkreispumpe EIN/AUS	Heizkreispumpe
Hauptbrenner BHKW EIN/AUS	Regelventil Kältekreis Heizkreis
Hilfsbrenner BHKW EIN/AUS	Regelventil Kältekreis Zirkulation
Mischer Heizkreis AUF	
Mischer Heizkreis ZU	
Kugelhähne der Zapfstellen 1,2,3	
Zirkulationspumpe	

Im Modus „externe Steuerung“ fungiert die Prüfstandssoftware hauptsächlich als Messaufzeichnungsprogramm. Die Steuerung des BHKW, des Heizkreises sowie der Zirkulation erfolgt durch die BHKW-Regelung. Lediglich die Verbrauchssteuerung erfolgt teilweise (Kühlkreise, Warmwasserzapfungen) durch die Prüfstandsregelung.

### 3.3 Betriebsverhalten des Whispergen BHKW

Die vom Hersteller angegebenen technischen Daten des Whispergen Mikro-BHKW zeigt Tabelle 3-3. Die Effizienz eines Mikro-BHKW lässt sich jedoch nicht nur anhand eines stationären Betriebspunkts analysieren. Viel entscheidender ist, wieviel Erdgas benötigt wird, um eine gewisse Menge Wärme und Strom zu erzeugen. Der Nutzungsgrad ( $g$ ) ist das Zeitintegral über den eingesetzten bzw. erzeugten Leistungen. Demzufolge beinhaltet der Nutzungsgrad auch das An- und Abfahren des BHKW inklusive der jeweils auftretenden Verluste. Bei Angabe des Nutzungsgrads muss klar sein, über welchen Zeitraum integriert wird. Sofern nicht anders ausgeführt, wird in dieser Arbeit das Zeitintegral über einen Messtag gebildet.

$$g_{th} = \frac{Q_{th}}{W_{Gas}} = \frac{\int_{t=0}^{t=24h} \dot{Q}_{th} dt}{\int_{t=0}^{t=24h} P_{Gas} dt} \quad (3.26)$$

$$g_{el} = \frac{W_{el}}{W_{Gas}} = \frac{\int_{t=0}^{t=24h} P_{el} dt}{\int_{t=0}^{t=24h} P_{Gas} dt} \quad (3.27)$$

$$g_{ges} = \frac{\int_{t=0}^{t=24h} \dot{Q}_{th} dt + \int_{t=0}^{t=24h} P_{el} dt}{\int_{t=0}^{t=24h} P_{Gas} dt} = g_{th} + g_{el} \quad (3.28)$$

Wie viele Zyklen und damit instationäre Betriebsbereiche auftreten, ist eine Frage der Steuerung bzw. Regelung. Ein Taktbetrieb, wie er in Abbildung 3-8 zu sehen ist, sollte aus Effizienzgründen unbedingt vermieden werden. Neben der Einsatzstrategie hängt der Nutzungsgrad, wie bei fast allen Wärmeerzeugern, vom Temperaturniveau (in diesem Fall von der BHKW-Rücklaufemperatur) ab.

Abbildung 3-20 illustriert einen am Mikro-KWK-Prüfstand gemessenen BHKW-Zyklus. Ein BHKW-Zyklus besteht aus dem Anfahren, dem stationären Betrieb und dem Abfahrvorgang. Das Anfahren beginnt mit dem Startsignal an das BHKW und endet, sobald alle Leistungen (thermisch, elektrisch und Gasbezug) stationär sind. Der Abfahrprozess startet mit dem Ausschaltsignal und wird mit dem Abschalten der BHKW-Pumpe beschlossen. Alle KWK-Technologien wie auch jedes Gerät der Kraft-Wärme-Kopplung haben ein spezifisches Anfahr- und Abschaltverhalten. Generell kann festgehalten werden, dass ein Stirlingmotor erst auf die benötigte Temperatur aufgeheizt werden muss und daher, im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor, deutlich mehr Zeit benötigt, um die maximale elektrische Leistung abgeben zu können. Nach dem Ausschaltsignal läuft das BHKW noch kurze Zeit nach, bis der Stirlingmotor ausreichend abgekühlt ist. In der sogenannten BHKW-Nachlaufzeit wird (anfangs) weiter Strom produziert und Wärme an den Speicher abgegeben.

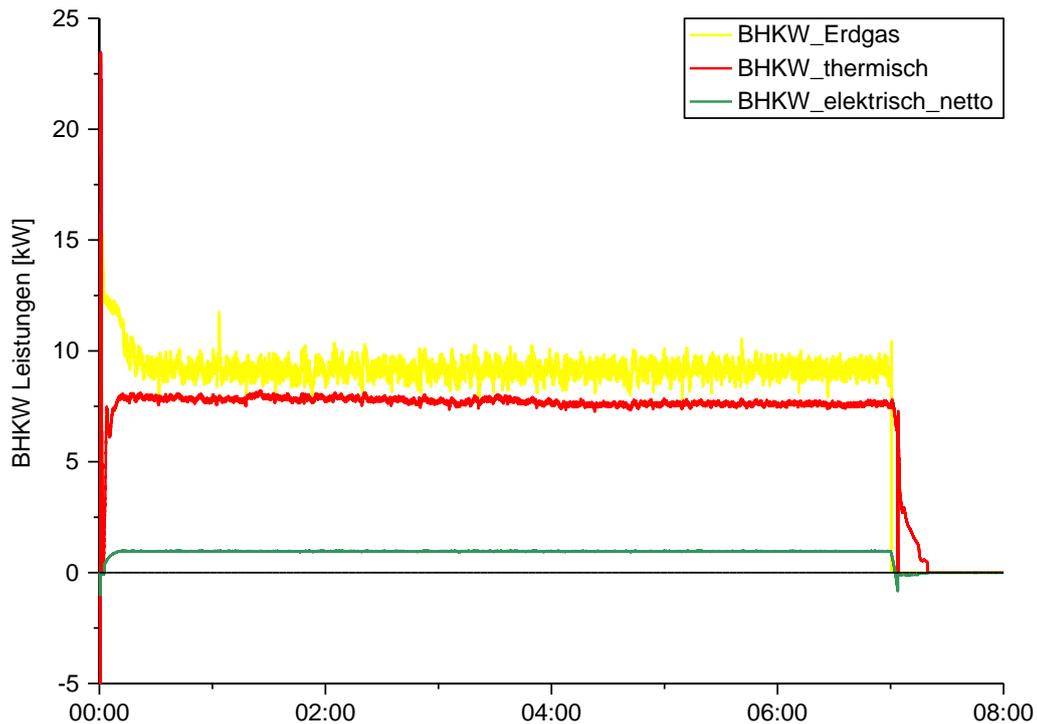


Abbildung 3-20: Leistungen des Whispergen Mikro-BHKW

### 3.3.1 Dynamisches Verhalten des Whispergen BHKW

#### Anfahrvorgang

Betrachtet man den Anfahrvorgang eines BHKW, so muss unterschieden werden, ob es sich um einen Kalt- oder Warmstart handelt. Mühlbacher [MÜH 07] spricht dann von einem Kaltstart, wenn die Stillstandszeit sehr lang oder das KWK-Modul auf Raumtemperatur abgekühlt ist. Im Gegensatz dazu ist bei einem Warmstart noch thermische Restenergie aus dem vorangegangenen Zyklus vorhanden. In der Praxis tritt ein „echter“ Kaltstart also nur sehr selten ein, etwa wenn das Gebäude kurzzeitig nicht bewohnt war (z.B. Urlaub). Warmstarts dagegen treten insbesondere in der Übergangszeit und bei schlechter Speicherausnutzung (siehe Abbildung 3-8) auf. Da in der Literatur Warm- und Kaltstart nicht exakt definiert werden, eine Festlegung im Rahmen der vorliegenden Arbeit aber notwendig ist, wird für die weiteren Untersuchungen die Pausenzeit eines Warmstarts auf weniger als zwei Stunden und die Mindestpausendauer für einen Kaltstart auf acht Stunden festgelegt.

Abbildung 3-21 zeigt zwei typische Anfahrvorgänge (links: Kaltstart, rechts: Warmstart). Das prinzipielle Einschaltverhalten ist für beide Starts identisch: Ca. 24 Sekunden nach dem Startsignal beginnt der BHKW-Systemcheck. Als erstes wird die Funktionalität des Lastwiderstands getestet, der im Fehlerfall (z.B. Trennung vom elektrischen Netz) die elektrische Leistung in Wärme umwandelt. Dafür bezieht das BHKW Leistung aus dem Netz, wandelt diese in Wärme um, die ihrerseits von der gestarteten BHKW-Umwälzpumpe abgeführt wird. Eine kurzzeitige Unterbrechung des Systemchecks nach ca. 33 Sekunden führt zu einem Einbrechen der elektrischen Leistungsaufnahme und zu einer Reduzierung des BHKW-Durchflusses. Nach dem Ende der Systemprüfung läuft die BHKW-Pumpe weiter und je nach BHKW bzw. Speichertemperaturzustand kommt es zu thermischen Spitzen. Eine minimal höhere Temperatur im

BHKW als in der Leitung führt beim Kaltstart dazu, dass kurz nach dem Start der Umwälzpumpe die Vorlauftemperatur größer ist als die Rücklauftemperatur und demzufolge eine positive thermische Leistung gemessen wird. Nach ca. 50 Sekunden kommt das wärmere Wasser aus dem Speicher am Rücklauffühler an und erwärmt langsam das BHKW. Die thermische Leistung ist negativ. Im Falle des Warmstarts sind zu Beginn die Temperaturen deutlich höher als die Umgebungstemperaturen. Aufgrund der internen Wasserführung ist die Rücklauftemperatur (50 °C) größer als die Vorlauftemperatur (35 °C). Deshalb kommt es auch beim Warmstart zu einer kurzen negativen Spitze. Danach sinkt jedoch die Rücklauftemperatur auf die Temperatur des „ausgekühlten“ Rücklaufs bzw. der unteren Speichertemperatur ab, während die im BHKW gespeicherte Restwärme den Vorlauf auf über 60 °C erwärmt und folglich eine thermische Leistungsspitze größer 20 kW<sub>th</sub> erzeugt. Ist die Restwärme entnommen, startet der Hauptbrenner.

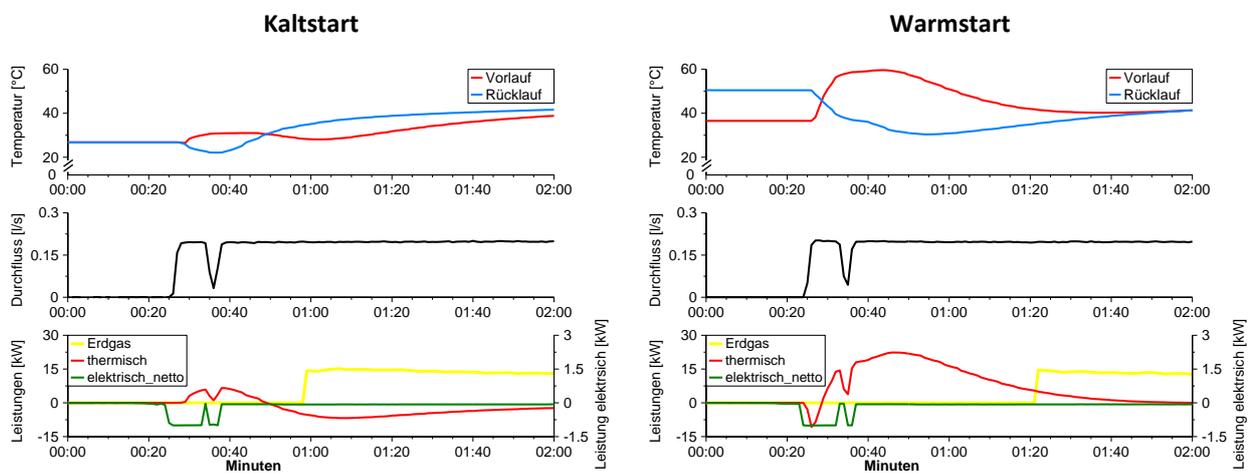


Abbildung 3-21: Kalt- und Warmstart des Whispergen-BHKW

Nach den anfänglichen thermischen Leistungsschwankungen steigt die abgegebene Leistung steil an (Abbildung 3-22) und nähert sich dem stationären Zustand. Die zugeführte BHKW-Gasleistung sinkt nach dem Einschalten kontinuierlich ab und verharrt schließlich bei ca. 9 kW. Die Stromerzeugung startet, wenn die Starttemperatur erreicht ist (ca. 2,5 min) und nähert sich exponentiell der Nennleistung an.

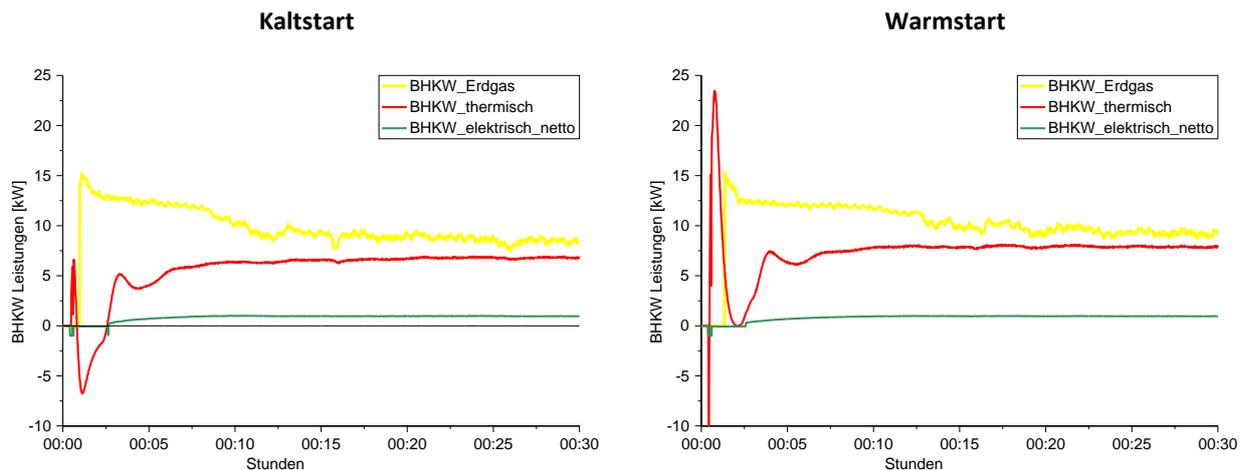


Abbildung 3-22: Anfahrvorgang Whispergen BHKW

Betrachtet man die Zeiten vom Startsignal bis zum Startbeginn (Tabelle 3-10), dann wird deutlich, dass die Startroutine anfangs unabhängig vom Zustand des BHKW ist. Der Hauptbrennerstart ist beim Warmstart jedoch verzögert, da das BHKW erst hochfährt, wenn es ausreichend abgekühlt ist. Bis die stationäre elektrische Nennleistung erreicht ist, dauert es in beiden Fällen mindestens sieben Minuten. Bei einem Kaltstart vergehen 17 Minuten, bei einem Warmstart 7,5 Minuten bis das BHKW soweit aufgeheizt ist, dass die abgegebene thermische Leistung als stationär bezeichnet werden kann.

Tabelle 3-10: Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustands

	Kaltstart			Warmstart		
	$P_{\text{Gas}}$	$\dot{Q}_{\text{th}}$	$P_{\text{el}}$	$P_{\text{Gas}}$	$\dot{Q}_{\text{th}}$	$P_{\text{el}}$
<b>Startbeginn<sup>30</sup> [s]</b>	59	29	19	82	27	18
<b>stationär <math>\pm 5\%</math> [s]</b>	690	1.037	445	914	457	538

### Ausschaltvorgang

Beim Ausschaltvorgang (Abbildung 3-23) fällt die Gaszufuhr nach durchschnittlich acht Sekunden abrupt ab. Aufgrund der gespeicherten Restwärme im Motor produziert das Stirling BHKW weiterhin Strom (Abbildung 3-23, ①). Um zu große thermische Spannungen in der Motorkeramik zu vermeiden, geht das BHKW, wenn die fallende Stromproduktion null erreicht (156 s), in einen motorischen Zustand über ②. Der Motor wird solange angetrieben bis die Stirlingtemperatur auf 250 °C abkühlt (in diesem Fall nach 249 s). Nun werden zur Schonung der Elektronik alle elektrischen Verbraucher, also auch die BHKW-Umwälzpumpe, kurze Zeit vom Netz getrennt. Nach dem erfolgten Motorstopp kühlen der Lüfter und das zirkulierende Wasser den Motor weiter ab ③. Nach ca. 13 Minuten schaltet dann der Lüfter ab,

<sup>30</sup> Als „Startbeginn“ wird diejenige Zeitspanne definiert, die zwischen Startsignal und der jeweiligen Leistungsänderung vergangen ist.

die bezogene elektrische Leistung sinkt und die BHKW-Umwälzpumpe läuft noch einige Minuten bei relativ kleiner thermischer Leistung weiter ④. Der komplette Abschaltvorgang dauert in diesem Beispiel insgesamt knapp 19 Minuten. Zu einem vergleichbaren Resultat kommt auch Wild [WILD 12], der den Zusammenhang der Nachlaufzeiten des Lüfters und der Pumpe von der BHKW-Vorlauftemperatur detailliert beschreibt und für die Ausschaltdauer des gesamten BHKW-Systems einen Bereich zwischen 15 und 20 Minuten ermittelt.

Die im Nachlauf ① erzeugte elektrische Energie beträgt 23,6 Wh. Demnach werden für den motorischen Betrieb, Lüfter und BHKW-Pumpe (② - ④) insgesamt 28,9 Wh verbraucht. Die elektrische Bilanz im Nachlauf ist entsprechend negativ.

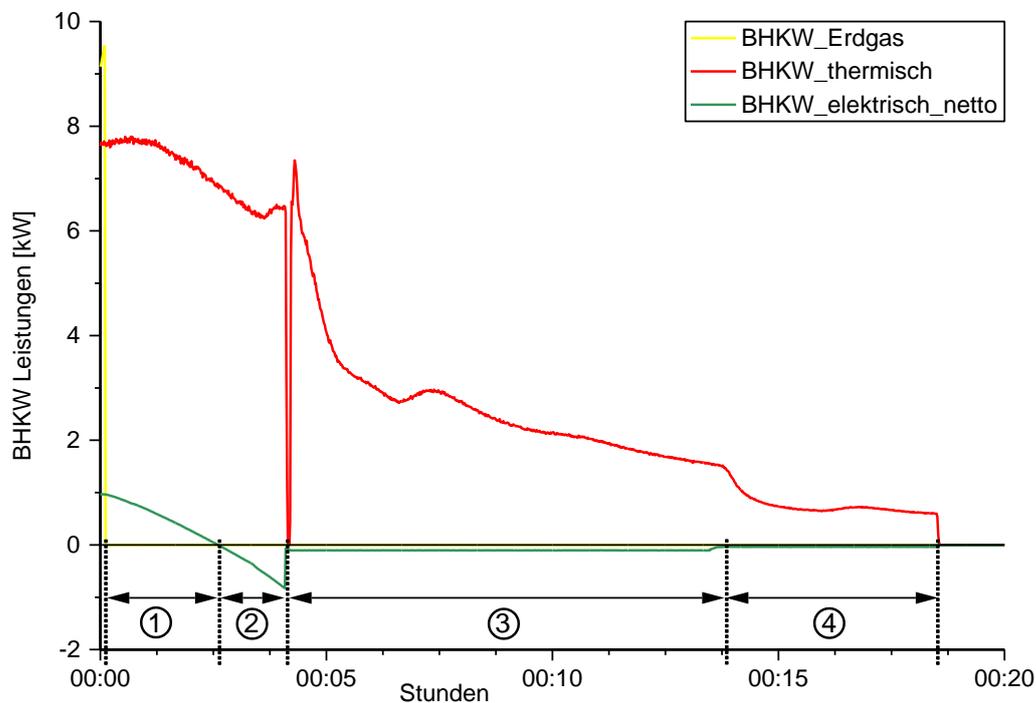


Abbildung 3-23: Leistungen des Whispergen Mikro-BHKW beim Ausschalten

### Stationärer Zustand

Nach dem Anfahrvorgang befindet sich das BHKW im stationären Zustand. Die BHKW-Leistungen sind in diesem augenscheinlich konstant, abgesehen vom Rauschen der Gasleistung (vgl. Abbildung 3-20). Untersucht man jedoch das Betriebsverhalten bei verschiedenen Rücklauftemperaturen (Abbildung 3-24) wird erkennbar, dass insbesondere die thermische Leistung und die Gaszufuhr stark von der Rücklauftemperatur abhängen.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Da es mit dem Prüfstands Aufbau nicht möglich ist dem BHKW eine konstante Rücklauftemperatur zu gewährleisten, wurde vor dem Versuch zu Abbildung 3-24 das BHKW aufgeheizt und der Speicher komplett entleert. Anschließend wurde dem Speicher keine Wärme mehr entnommen, wodurch sich der Speicher auflud und die BHKW-Rücklauftemperatur anstieg. Die in Abbildung 3-24 dargestellten Messwerte entsprechen dem Mittelwert aus den 200 Werten vor und nach der Temperaturüberschreitung.

Zwischen 45 °C und 70 °C steigt die gemessene Gasleistung von 9,02 kW auf 9,38 kW. Die dabei vom BHKW erzeugte Wärme fällt um 350 Watt von knapp 7,93 kW<sub>th</sub> auf 7,58 kW<sub>th</sub>. Die elektrische Nettoleistung bleibt hingegen (nahezu) konstant zwischen 960 Watt und 970 Watt. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass der Whispergen Hauptbrenner so geregelt ist, dass die elektrische (Brutto-)Leistung genau 1.000 W beträgt. Da mit wärmerem Rücklaufwasser der untere Teil des Stirlingmotors nicht mehr so gut gekühlt werden kann, muss die Kopftemperatur ansteigen und folglich der Gasverbrauch des Hauptbrenners zunehmen. Weil sich aber mit steigender Temperatur die BHKW-Verluste (Strahlungs-, Konvektions- und Abgasverluste) vergrößern und die Wärmeabgabe an das Kühlwasser schlechter wird, fällt die thermische Leistung bei höheren Rücklauftemperaturen. Auch der elektrische Wirkungsgrad sinkt von 10,6 % auf 10,3 %, da der Wirkungsgrad auf den Gasverbrauch bezogen ist. Aufgrund der fallenden thermischen Leistung werden der thermische und der Gesamtwirkungsgrad deutlich kleiner.

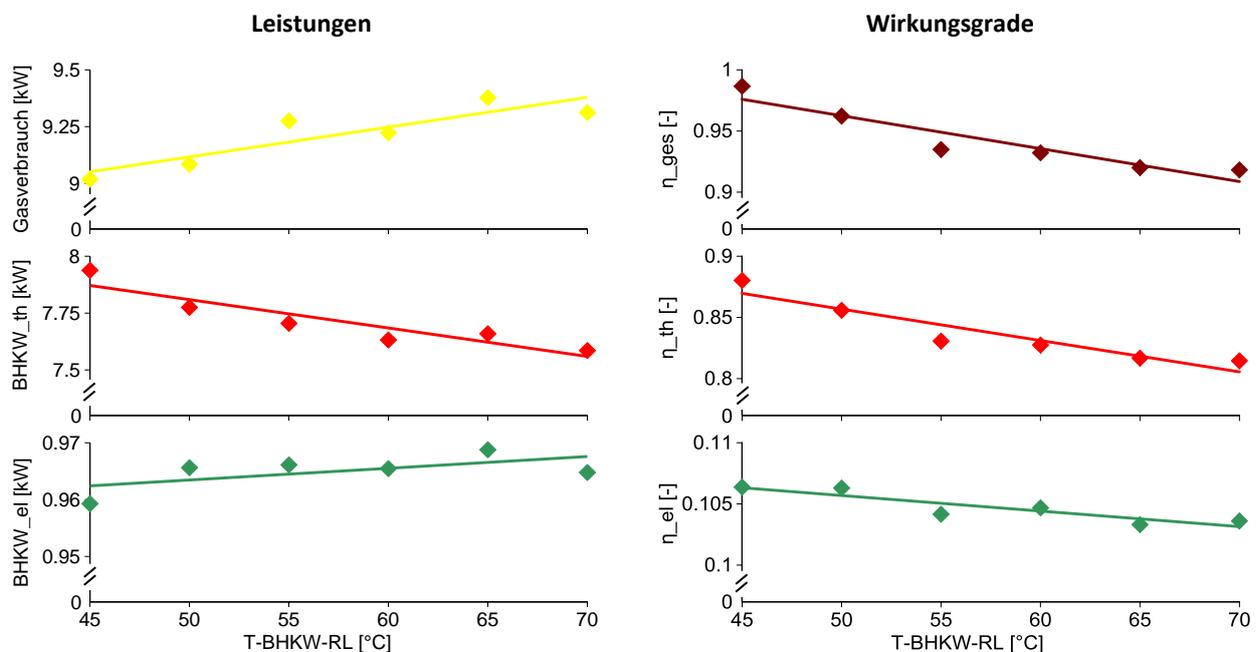


Abbildung 3-24: Leistungen und Wirkungsgrade des Whispergen Mikro-BHKW bei verschiedenen Rücklauftemperaturen, Messung am 12.08.2013

Die ermittelten thermischen Leistungen liegen somit in dem Bereich, der im Datenblatt (siehe Kapitel 3.2.2) angegeben wird. Während die Mindestleistung auch bei hohen Rücklauftemperaturen erreicht wird, gilt dies im gemessenen Temperaturbereich nicht gleichermaßen für die maximale Leistung. Die im Datenblatt angegebene elektrische (Brutto-)Leistung entspricht der gemessenen Leistung plus der BHKW-Eigenversorgung. Ebenso kann der gegebene elektrische Wirkungsgrad von 10 bis 11 % bestätigt werden.

## Degradation

Degradation, also die Verminderung der abgegebenen Leistung, ist insbesondere bei Brennstoffzellen ein Thema. Ceramic Fuel Cells [CFC 13] spricht in Bezug auf ihre SOFC Brennstoffzelle von einer anfänglichen Degression von 2,3 % / 1000 Bh. Auch bei verbrennungsmotorischen BHKW wurde sowohl im Mini-BHKW-Projekt als auch bei weiteren Prüfstandsversuchen eine Absenkung der maximalen elektrischen Leistung bis ca. 10 % festgestellt. Bei wandhängenden Stirling BHKW kommt es bei nicht exakt horizontal installierten Anlagen wegen der Reibung zwischen Zylinder und Motorwand im Laufe der Zeit ebenfalls zu Leistungsreduktionen.

Das am IfE eingesetzte Whispergen BHKW erreicht, wie oben gezeigt, die im Datenblatt angegebenen Leistungen und Wirkungsgrade. Jedoch hat sich die elektrische Effizienz seit der Inbetriebnahme verschlechtert. Als mögliche Ursache kommen entweder erhöhte Reibungsverluste oder ein Absinken des Arbeitsdrucks in Betracht. Abbildung 3-25 zeigt die Leistungen und Wirkungsgrade des BHKW bei den ersten Versuchen Ende 2012. Während die elektrische Leistung gleich geblieben ist, war die eingesetzte Gasleistung im Mittel 800 Watt geringer als bei den Prüfstandsmessungen im August 2013. Diese 800 Watt sind jedoch nicht verloren, sondern werden größtenteils in Wärme umgesetzt. Dies hat zur Folge, dass sich der Gesamtwirkungsgrad im Mittel nicht verändert, der elektrische Wirkungsgrad jedoch einen Prozentpunkt eingebüßt hat.

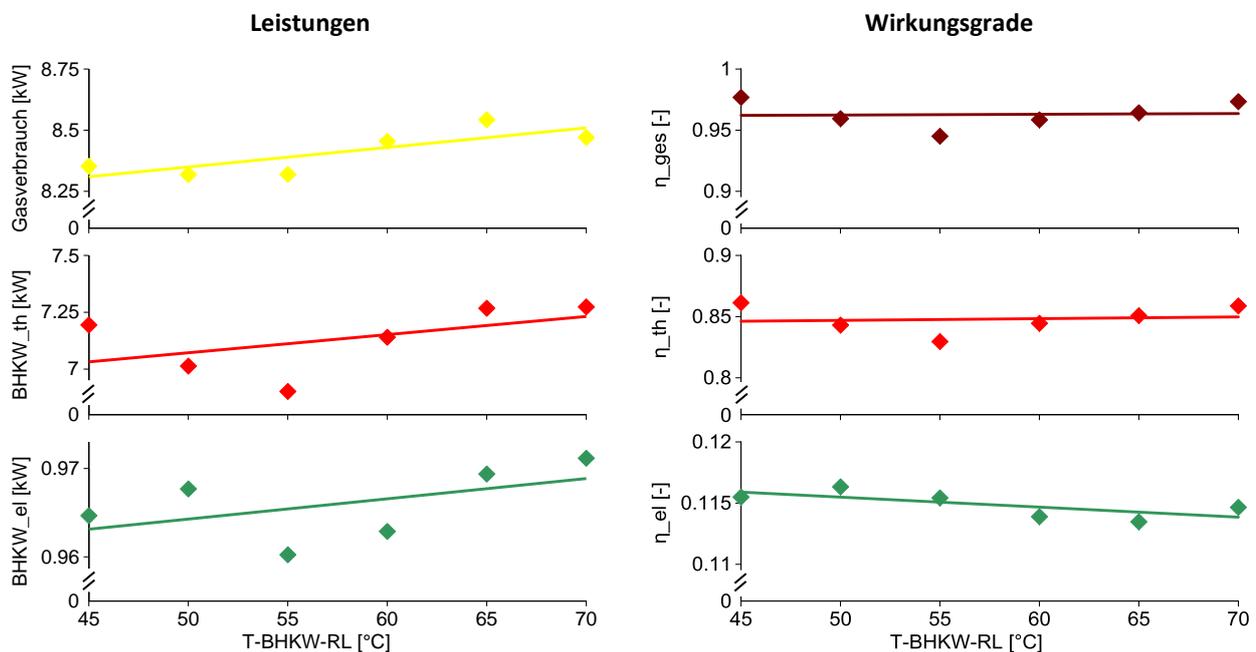


Abbildung 3-25: Leistungen und Wirkungsgrade des Whispergen Mikro-BHKW bei verschiedenen Rücklauftemperaturen, Messung am 15.11.2012

## Taktverhalten

Neben dem benötigten Temperaturniveau hängt die BHKW-Effizienz auch vom Betrieb ab. Die oben beschriebenen instationären Verluste treten bei häufigem Takten öfter auf und verringern den Nutzungsgrad. Um den Einfluss des Taktverhaltens zu bewerten, wurde die in Abbildung 3-26

dargestellte BHKW-Versuchsreihe entwickelt und getestet. Das BHKW läuft in jedem der fünf Versuche insgesamt zwölf Stunden. Im ersten Versuch (1-h) beträgt die BHKW-Betriebs- und Pausendauer jeweils eine Stunde; demzufolge sind es zwölf Zyklen. In den weiteren Versuchen steigen die Betriebs- und Pausenzeit bei fallender Zyklenzahl.

Damit der Einfluss der BHKW-Rücklaufemperatur minimal ist, wird dem Speicher eine konstante Leistung ( $\dot{Q}_{\text{HK,nM}} = 3,8 \text{ kW}$ ) bei einer festen Vorlaufemperatur ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) entnommen. Beim fünften Versuch (6-h) würde das BHKW wegen Übertemperatur abschalten, weshalb die Heizleistung auf  $1,9 \text{ kW}_{\text{th}}$  während der BHKW-Pausen und auf  $5,7 \text{ kW}_{\text{th}}$  während der BHKW-Zyklen angepasst wurde. Die Speichertemperaturen zu Beginn des Versuches sind für alle Messungen nahezu gleich.

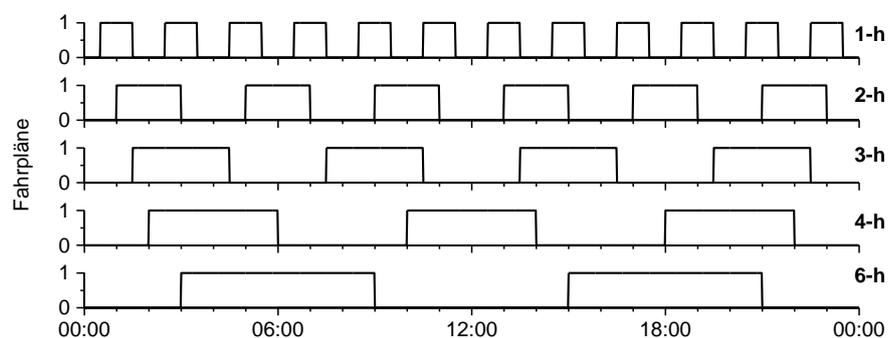


Abbildung 3-26: BHKW Versuchsreihe zur Analyse des Taktverhaltens

Die Messergebnisse sind der Abbildung 3-27 zu entnehmen. Es zeigt sich, dass längere BHKW-Intervalle den Gaseinsatz reduzieren. Trotz (leicht) sinkender Wärmeerzeugung steigt der thermische Nutzungsgrad an. Mit längeren Laufzeiten wird zusätzlich auch mehr Strom erzeugt, da bei jedem Anlauf die volle Leistung erst nach wenigen Minuten zur Verfügung steht. Die Nettostromerzeugung nimmt ab einer Zyklendauer größer drei Stunden um über  $0,5 \text{ kWh}_{\text{el}}$  im Vergleich zum Versuch „1-h“ zu. Durch die höhere Stromerzeugung steigt auch der elektrische Nutzungsgrad. Zusammen mit dem verringerten Gasverbrauch steigt dieser von  $9,5 \%$  auf  $10,3 \%$  überproportional stark an.

Bisher nicht betrachtet wurde der BHKW-Eigenverbrauch. Dieser beträgt im Ruhezustand ca.  $7 \text{ Watt}$  und ist daher fast vernachlässigbar. Taktet das BHKW jedoch sehr häufig, verbraucht die KWK-Anlage während des An- und Abfahrens relativ viel Strom. Im Versuch „1-h“ addiert sich der Strombezug auf fast  $0,5 \text{ kWh}$  und damit auf mehr als das Dreifache von Versuch „6-h“. Der sogenannte bilanzielle elektrische Nutzungsgrad  $g_{\text{el}}^*$  bestimmt sich aus der Differenz von erzeugter ( $W_{\text{el,netto}}$ ) und verbrauchter elektrischer Energie ( $W_{\text{el,Bezug}}$ ), dividiert durch den Gaseinsatz:

$$g_{\text{el}}^* = \frac{W_{\text{el,netto}} - W_{\text{el,Bezug}}}{W_{\text{Gas}}} \quad (3.29)$$

Der bilanzielle Nutzungsgrad steigt mit ansteigender Zykluszeit. Aufgrund des hohen Eigenverbrauchs bei kurzen Laufzeiten ist der Anstieg nochmals höher als beim elektrischen Nutzungsgrad (Abbildung 3-27, rechts unten).

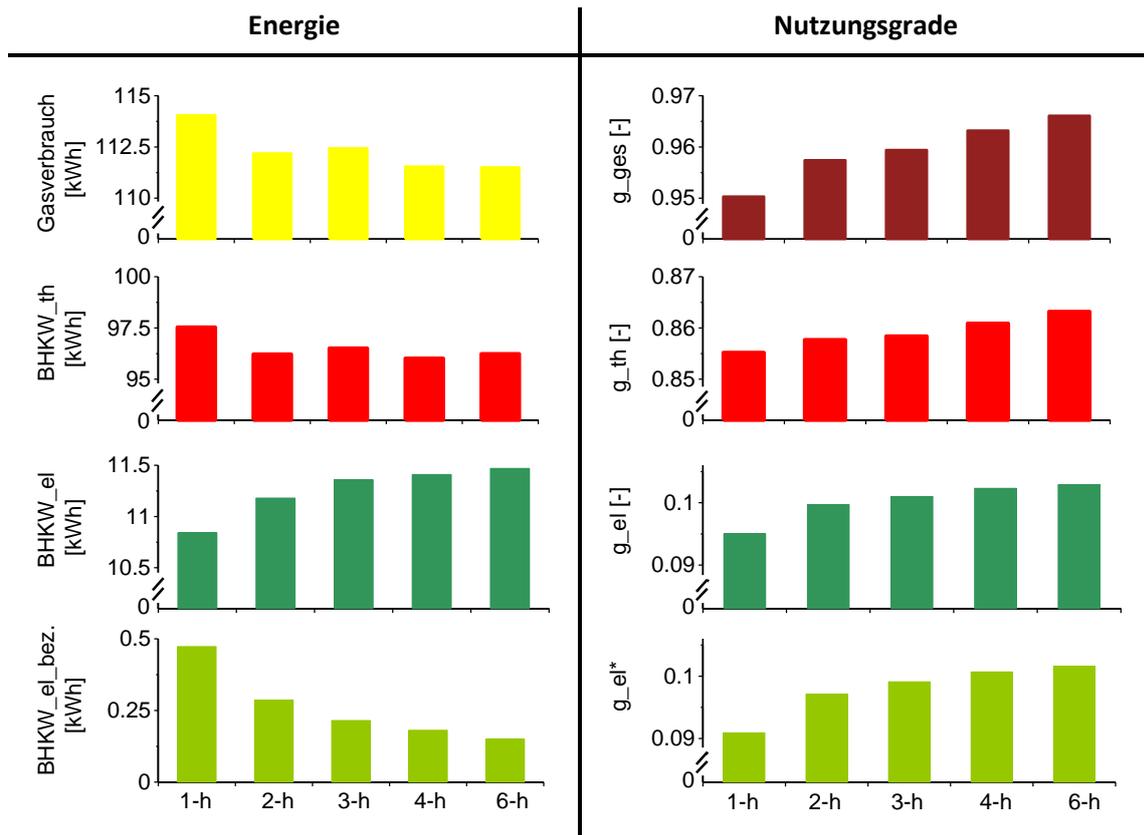


Abbildung 3-27: Effizienz des Whispergen BHKW bei verschiedenen Zykluszeiten

Die Vorteile von langen Zyklen und geringem Takten lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- weniger Gaseinsatz
- höhere Stromerzeugung
- geringerer Stromverbrauch
- höhere Nutzungsgrade

Anzumerken ist, dass mit der Entscheidung für ein Stromerzeugungskriterium (in dieser Arbeit: EEX-Preis) auch Fälle eintreten können, in denen eine flexible Stromproduktion nach Effizienzgesichtspunkten schlechter abschneidet als ein herkömmlicher, wärmegeführter Betrieb.

### Wiedereinschaltvorgang

Ein für eine stromorientierte Regelung wichtiges Kriterium ist das Wiedereinschaltverhalten von KWK-Anlagen. Sollte die BHKW-Steuerung ein Stopp-Signal ausgeben oder das BHKW aufgrund überhöhter Temperaturen automatisch abgeschaltet werden, dauert es eine gewisse Zeit, bis das BHKW die geplante Leistung wieder erbringen kann.

Abbildung 3-28 veranschaulicht einen gemessenen Wiedereinschaltvorgang nach einer thermischen BHKW-Überlastung. Beim Whispergen BHKW kann der Ausschaltvorgang ① über 20 Minuten dauern. Danach muss eine Mindestpausenzeit ② von ca. 30 Minuten eingehalten werden, bevor der erneute BHKW-Start eingeleitet werden kann. Bis zum Erreichen der maximalen elektrischen Nennleistung

vergehen wiederum einige Minuten ③).

Das Zeitfenster, in dem die maximale Leistung nicht geliefert werden kann, macht in diesem Fall 65 Minuten aus. 53 Minuten davon nimmt das BHKW Leistung auf. Wegen der eingeplanten elektrischen Erzeugung sollte demnach ein Notabschalten aufgrund einer thermischen Überhitzung oder einem falschen Steuersignal möglichst nicht (ungeplant) vorkommen.

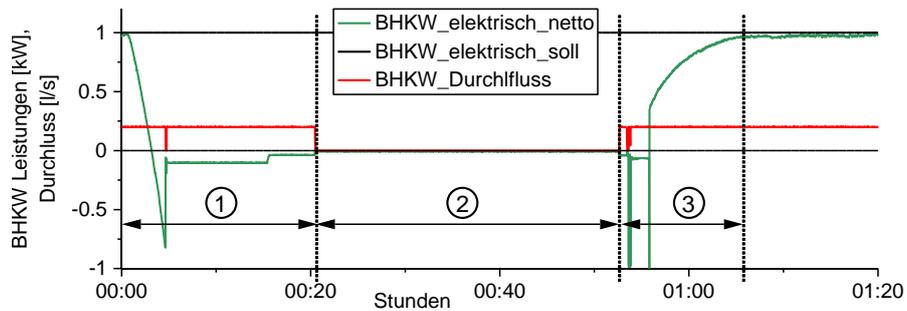


Abbildung 3-28: Wiedereinschaltvorgang des Whispergen BHKW

### 3.3.2 Whispergen BHKW-Regelung

Nachfolgende Tabelle 3-11 zeigt die für die Analyse der Whispergen BHKW-Regelung eingestellten Sollwerte für Heizung und Warmwasser. Die Sollwerte und die Zeitdauer des Tagbetriebs entsprechen den Werten, die für die TRNSYS Gebäudesimulation verwendet wurden. Die Nachtabsenkung wurde identisch zum Viessmann Feldtest gewählt.

Tabelle 3-11: Voreinstellung bei der Typtaganalyse

	Sollwert [°C]	Nachtabsenkung [°C]	Tagbetrieb
<b>Warmwasser</b>	50	10	5.00 – 22.00 Uhr
<b>Heizung</b>	$T_{HK,VL} = 1,3 \times (20^{\circ}\text{C} - T_A) + 20^{\circ}\text{C}$	10	5.00 – 22.00 Uhr

Alle Werte aus Tabelle 3-11 kann der BHKW-Betreiber jederzeit manuell verändern. Der Betreiber verfolgt mit den Einstellmöglichkeiten drei Ziele:

- thermische Behaglichkeit
- möglichst geringe Laufzeit des Spitzenlastkessels
- geringe Stromeinspeisung

Das für den Betreiber wichtigste Kriterium ist die thermische Behaglichkeit. Da die thermische Anlagenleistung deutlich kleiner als die Normheizlast ist, muss der Speicher, insbesondere während des Tagbetriebs, mit ausreichend Wärme gefüllt sein. Ebenso soll ein „voller“ Speicher verhindern, dass der SLK bei kurzzeitig hoher Wärmenachfrage zuschaltet. Drittens soll das BHKW Strom zur Eigennutzung,

ergo tagsüber, erzeugen. Folglich programmieren die meisten BHKW-Betreiber eine extreme Nachtabsenkung, welche deutlich vor dem Aufstehen der Bewohner endet.

Nicht verstellen kann der Whispergen BHKW-Betreiber hingegen die Parameter für das Stoppen des BHKW und das Starten des Zusatzheizgeräts. Diese Parameter können nur bei der Inbetriebnahme oder bei einer Wartung vom zuständigen Servicetechniker vorgenommen werden. Standardmäßig startet das Whispergen ZHG bei: „10 Minuten / 3 °C“. Das bedeutet, dass die Regelung zehn Minuten nach dem Start des BHKW überprüft, ob die Sollwertunterschreitung kleiner 3 °C ist. Der BHKW-Stopp wird durch Temperaturüberschreitung an einem der drei Whispergen Fühler ausgelöst. Da die untere Speichertemperatur in etwa der BHKW-Rücklauftemperatur entspricht, wird am Prüfstand der untere Speicherfühler verwendet. Die gewählte und standardmäßig voreingestellte Temperatur beträgt 60 °C.

Testet man die Whispergen Regelung am Typtag 10 °C, ergibt sich der in Abbildung 3-29 dargestellte Verlauf. Das BHKW startet um exakt 5.00 Uhr. Kurze Zeit später wird das ZHG für fast eine Stunde zugeschaltet. Das BHKW läuft bis kurz vor Mittag, bevor es abends ein zweites Mal für ca. drei Stunden in Betrieb ist.

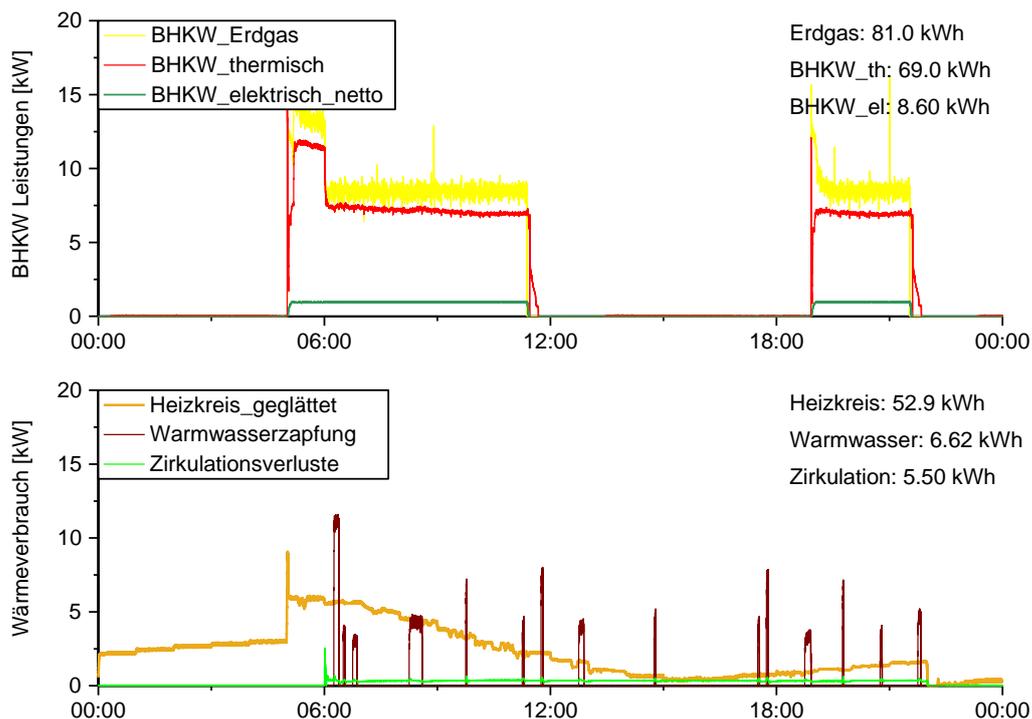


Abbildung 3-29: Whispergen Standardregelung („10 Minuten / 3 °C“), Typtag 10 °C

Nachdem, abgesehen von der kurzen Morgenspitze, die maximale Heizleistung jederzeit kleiner als die BHKW-Nennleistung ist, erscheint das Zuschalten des Zusatzheizgeräts an diesem relativ milden Tag nicht notwendig zu sein. Der erste BHKW-Zyklus würde andernfalls länger dauern oder das BHKW könnte früher starten und so den Einsatz des ZHG verhindern.

### Ein- und Ausschaltursache des Stirlingmotors

Abbildung 3-30 zeigt die am Speicher gemessenen Temperaturen während der Starts und Stopps der beiden BHKW-Zyklen. Die beiden Temperaturverläufe zum Ausschaltzeitpunkt sind nahezu identisch, was nicht gleichermaßen auf die BHKW-Startbedingungen zutrifft.

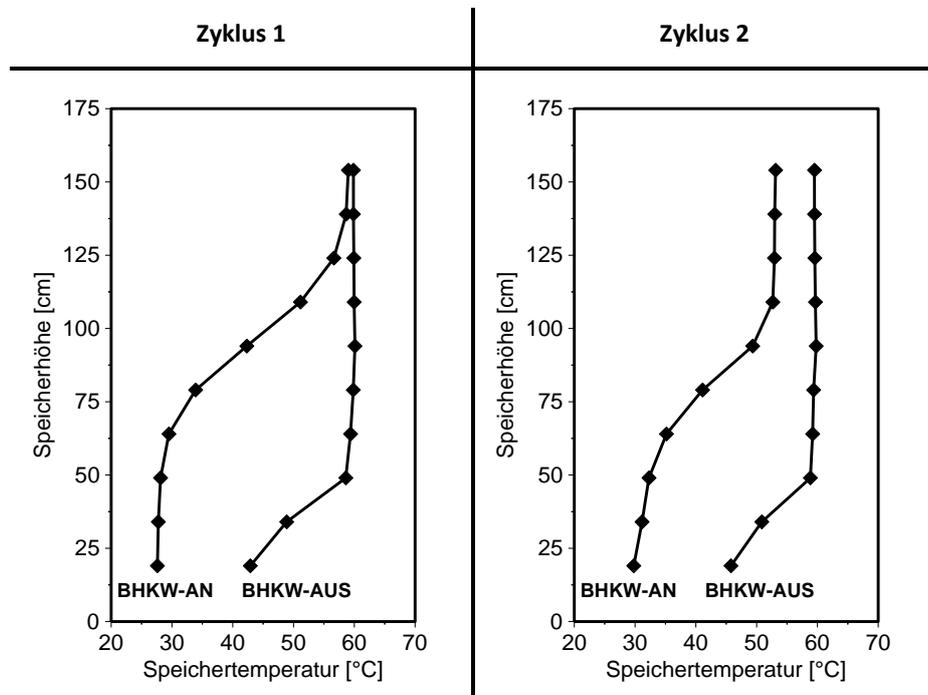


Abbildung 3-30: Speichertemperaturen beim An- und Ausschalten des BHKW, Whispergen Standardregelung

Betrachtet man die für die WG-Regelung entscheidenden Temperaturen (Tabelle 3-12, berechnet mit ((3.14) – (3.16))), so wird deutlich, dass das BHKW bei  $T_{Sp,unten} = 60\text{ °C}$  abschaltet. Die BHKW-Startbedingung (d.h. Unterschreitung der Solltemperatur) wird erst bei genauer Betrachtung ersichtlich. Beim zweiten BHKW-Start unterschreitet  $T_{Sp,mitte}$  den Warmwassersollwert ( $50\text{ °C}$ ), beim ersten ist die Speichertemperatur wesentlich niedriger als  $T_{WW,soll}$ . Ein weiterer Blick auf Abbildung 3-29 zeigt, dass der erste BHKW-Zyklus um 5.00 Uhr startet, genau in dem Augenblick, in dem der Sollwert von der Nachtabsenkung ( $40\text{ °C}$ ) auf den Normalwert wechselt.

Tabelle 3-12: Berechnete WG-Speichertemperaturen (Fehler:  $\pm 0,3\text{ °C}$ ) beim An- und Ausschalten, Typtag  $10\text{ °C}$

	BHKW-AN-1	BHKW-AUS-1	BHKW-AN-2	BHKW-AUS-2
$T_{Sp,oben}\text{ [°C]}$	59,2	60,4	53,4	60,1
$T_{Sp,mitte}\text{ [°C]}$	42,4	60,6	49,7	60,3
$T_{Sp,unten}\text{ [°C]}$	29,1	59,9	35,0	59,8

### Ein- und Ausschaltursache des Zusatzheizgeräts

Zehn Minuten nach dem BHKW startet im ersten Zyklus auch das Zusatzheizgerät (Abbildung 3-31). In diesem Moment liegt die mittlere Speichertemperatur deutlich unter 47° C, dem um 3 °C reduzierten Sollwert. Das ZHG läuft ca. 50 Minuten bis der Sollwert (ohne ZHG-Temperaturdifferenz) erreicht wird.

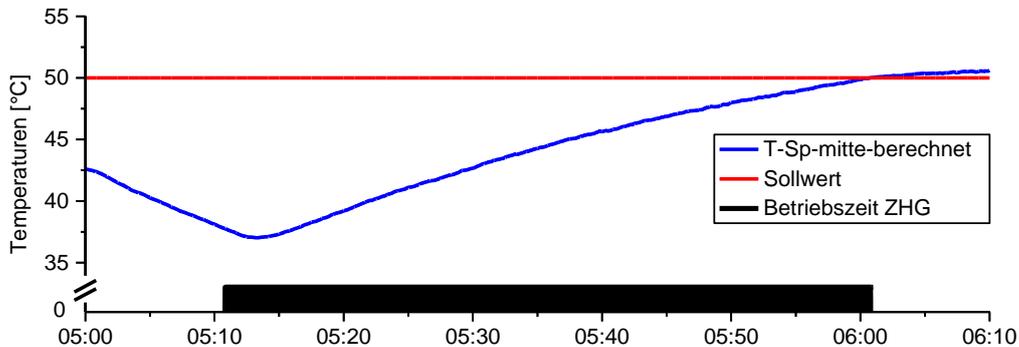


Abbildung 3-31: Soll- und Ist-Temperaturen während des ZHG-Zyklus

Da der ZHG-Einsatz an allen Typtagen bei der WG-Standardregelung zu beobachten ist, werden für die folgende Typtaganalyse die voreingestellten ZHG-Einstellungen so verändert, dass ein möglichst effizienter (hier: maximale Stromproduktion und folglich minimale ZHG-Laufzeit) BHKW-Standardbetrieb als Referenz verwendet werden kann. Demzufolge wird, mit Ausnahme des Typtags 0 °C, die Einstellung des ZHG auf „60 Minuten/10 °C“ abgeändert.

## 3.4 Typtaganalyse

Im Folgenden wird das BHKW-Verhalten mit Hilfe sogenannter Typtage analysiert. In Kapitel 3.2.6 wurden für alle Außentemperaturbereiche typisch auftretende Lastprofile entwickelt, welche für die folgenden Messungen hinterlegt sind. Damit der Speicherfüllstand zu Beginn eines Messtages keinen Einfluss auf das Ergebnis hat, beträgt die Messdauer für alle Versuchsreihen mehrere Tage, wobei der erste Tag aufgrund des notwendigen Einschwingverhaltens nicht berücksichtigt wird. Zeigt sich nach den ersten vier Messtagen, dass das BHKW jeden Tag zur gleichen Zeit gleich lang läuft, ist das Betriebsverhalten an jedem dieser Tage „typisch“, weshalb einer als repräsentativ herausgegriffen und die Messreihe beendet werden kann. Stellt sich hingegen in dieser Zeit kein stabiles Verhalten ein, wird so lange weitergemessen, bis ein typisches Muster aufeinanderfolgender Tage identifiziert werden kann.

### Sommertyptag

Abbildung 3-32 zeigt die Ergebnisse des Sommertyptags. Das untere Diagramm stellt die thermischen Verbraucher dar: Warmwasser und Zirkulation. Im oberen Diagramm wird das an diesem Typtag auftretende BHKW-Verhalten veranschaulicht. Aufgrund des Anstiegs der Warmwassersolltemperatur startet das BHKW exakt um 5.00 Uhr morgens. Da am Sommertag kein Heizverbrauch auftritt, läuft das

BHKW lediglich zwei Stunden und 25 Minuten. In dieser Zeit verbraucht das BHKW 20,5 kWh Erdgas und erzeugt damit 16,9 kWh Wärme und 2,29 kWh Strom.

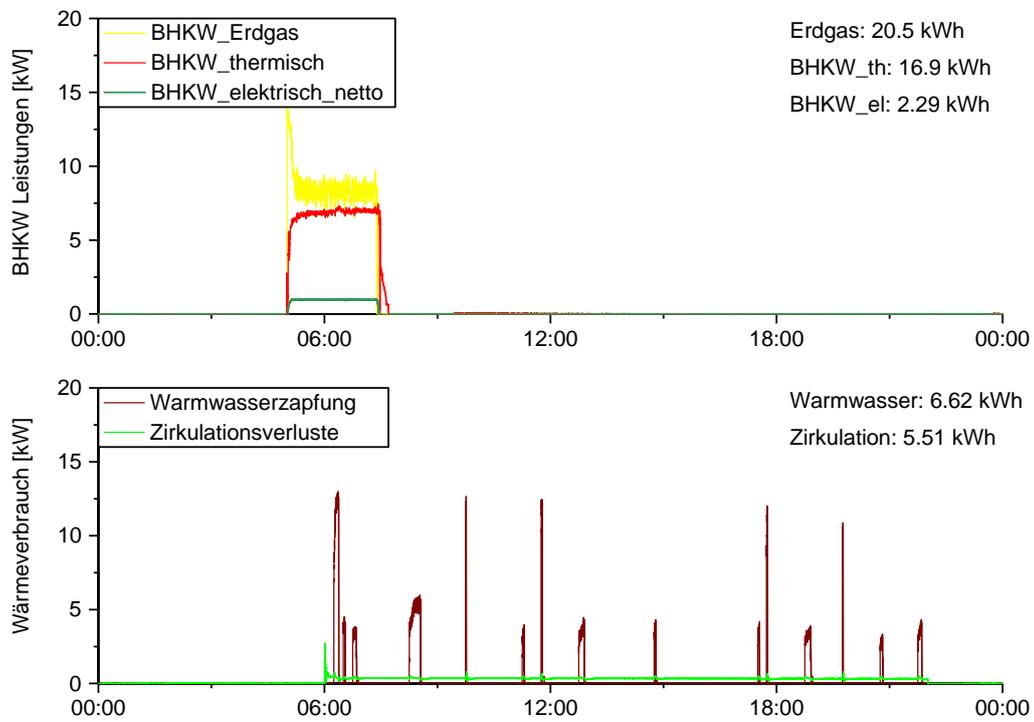


Abbildung 3-32: Whispergen Regelung, Sommertyp tag

### Typtag 15 °C

Im Gegensatz zum Sommertag ist es am Typtag 15 °C morgens relativ kalt (12 °C, siehe Anhang, Abbildung A-4), weshalb es von 5.00 bis ca. 12.00 Uhr zu einem nennenswerten Verbrauch an Heizenergie (15,3 kWh) kommt (Abbildung 3-33, unten).

Am Typtag 15 °C-a läuft das BHKW erstmals zwischen 6.00 und 9.00 Uhr. Aufgrund des höheren Wärmeverbrauchs kommt es abends (ca. 19.00 Uhr) zu einem zweiten, gut zweistündigen Zyklus. Dieser füllt den Speicher so sehr, dass der erste BHKW-Zyklus am Typtag 15 °C-b erst um 7.37 Uhr beginnt, was dazu führt, dass der erste Zyklus später endet und der zweite zeitlich nach hinten verschoben wird. Folglich startet am dritten Tag das BHKW noch später (8.20 Uhr) und stoppt erst als die Heizleistung unter 1 kW gesunken ist. Da der Rest des Tages dem Sommertyp tag ähnelt, springt das BHKW an diesem Tag nicht mehr an. Im Gegenteil: Der Speicher ist sogar so voll, dass das BHKW am darauffolgenden Tag erst nach dem Sollsprung läuft und sich der dreitägige Verlauf wiederholt.

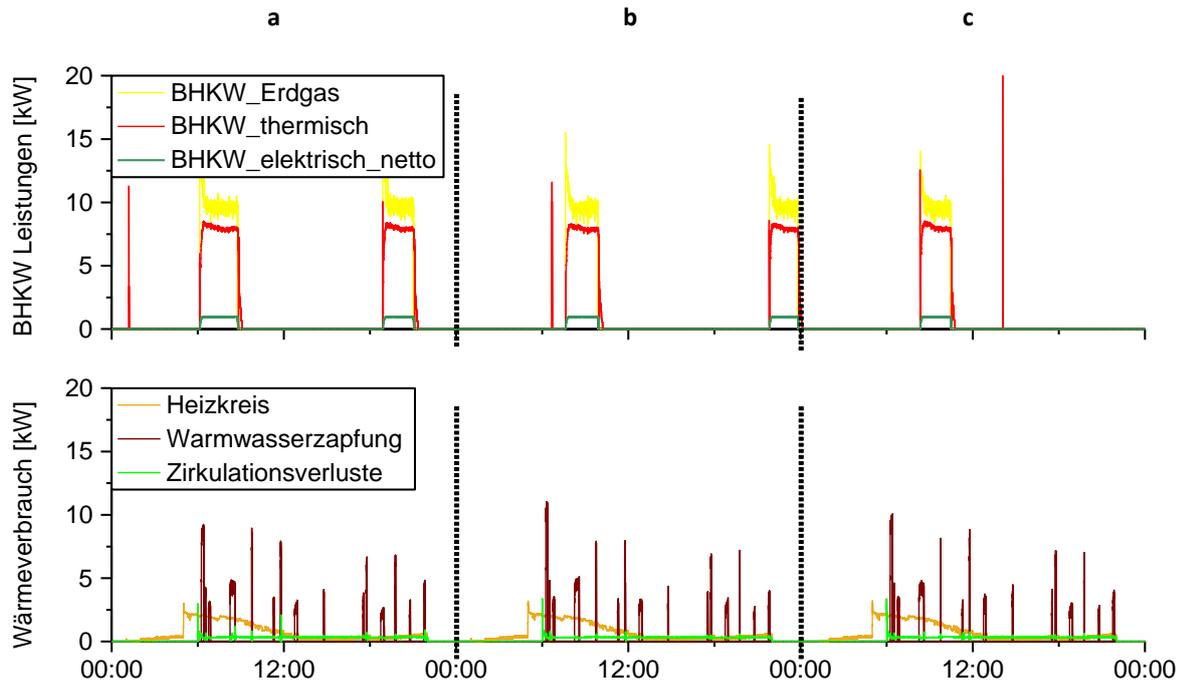


Abbildung 3-33: Whispergen Regelung, Typtag 15 °C

Aufgrund des ungleichen Speicherfüllstands zu Beginn der Messtage kommt es am Typtag 15 °C trotz gleichem Wärmeverbrauch zu ganz unterschiedlicher Stromerzeugung. Sowohl die erzeugte Strommenge (2,01 kWh bis 4,54 kWh) als auch die Zeitpunkte der Stromerzeugung variieren bei den einzelnen Messungen sehr stark (Tabelle 3-13).

Tabelle 3-13: Erzeugte und verbrauchte Energien am Typtag 15 °C, Whispergen Regelung

Typtag 15 °C	a	b	c	Arithmetischer Mittelwert
Erdgas [kWh]	47,1	41,7	20,7	36,5
BHKW thermisch [kWh]	39,3	35,0	18,0	30,8
BHKW elektrisch [kWh]	4,54	4,03	2,01	3,53
Heizkreis [kWh]	15,3	15,3	15,3	15,3
Warmwasser [kWh]	6,64	6,64	6,64	6,64
Zirkulation [kWh]	5,61	5,41	5,57	5,53

### Typtag 10 °C

Beim nächstkälteren Typtag 10 °C ist die Stromerzeugung ebenfalls uneinheitlich (Abbildung 3-34). Am Typtag 10 °C-a startet das BHKW erstmals vor 3.00 Uhr und läuft über sechs Stunden. Da der Heizverbrauch jedoch weiterhin hoch ist, kommt es gegen 12.00 Uhr schon zum zweiten Zyklus, welcher wegen dem geringer gewordenen Heizverbrauch deutlich kürzer ist. Mit dem Ansteigen der

Heizkreisleistung ab 18.00 Uhr leert sich der Speicher wieder, weshalb es zwischen 21.20 Uhr und 23.30 Uhr zu einem dritten Zyklus kommt. Der gefüllte Speicher kann am darauffolgenden Tag (Typtag 10 °C-b) bis zum Ende der Nachtabsenkung das Gebäude versorgen. Die Abschaltung erfolgt erst kurz vor 11.00 Uhr. Demzufolge kommt das BHKW an diesem Tag mit nur einem weiteren Start aus.

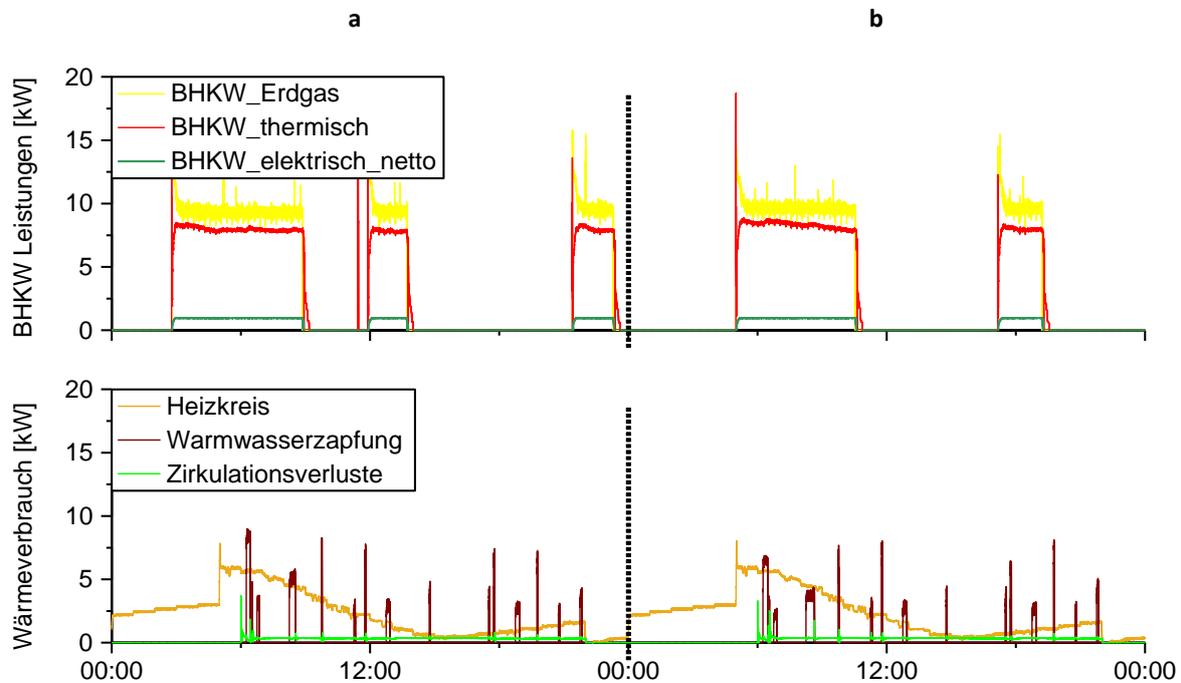


Abbildung 3-34: Whispergen Regelung, Typtag 10 °C

Das verbrauchte Erdgas und die erzeugten Energiemengen (Wärme und Strom) sind für die beiden Tage sehr unterschiedlich (Tabelle 3-14). Zeitlich gesehen überschneidet sich die BHKW-Betriebszeit nur zwischen 5.00 und 9.00 Uhr.

Tabelle 3-14: Erzeugte und verbrauchte Energien am Typtag 10 °C, Whispergen Regelung

Typtag 10 °C	a	b	Arithmetischer Mittelwert
Erdgas [kWh]	93,0	73,9	83,5
BHKW thermisch [kWh]	80,2	64,1	72,1
BHKW elektrisch, netto [kWh]	9,32	7,27	8,30
Heizkreis [kWh]	52,8	52,8	52,8
Warmwasser [kWh]	6,65	6,65	6,65
Zirkulation [kWh]	5,64	5,76	5,70

### Typtag 5 °C

Ein ähnliches Betriebsverhalten weist das BHKW am Typtag 5 °C auf, wie Abbildung 3-35 verdeutlicht. Wiederum gibt es bei anfangs „leerem“ Speicher drei, und bei anfangs „vollem“ Speicher zwei Zyklen. Die Differenz zwischen der minimal und maximal erzeugten elektrischen Energie beträgt 2,1 kWh (Tabelle 3-15) und ist somit ähnlich groß wie an den beiden vorangehend betrachteten Typtagen.

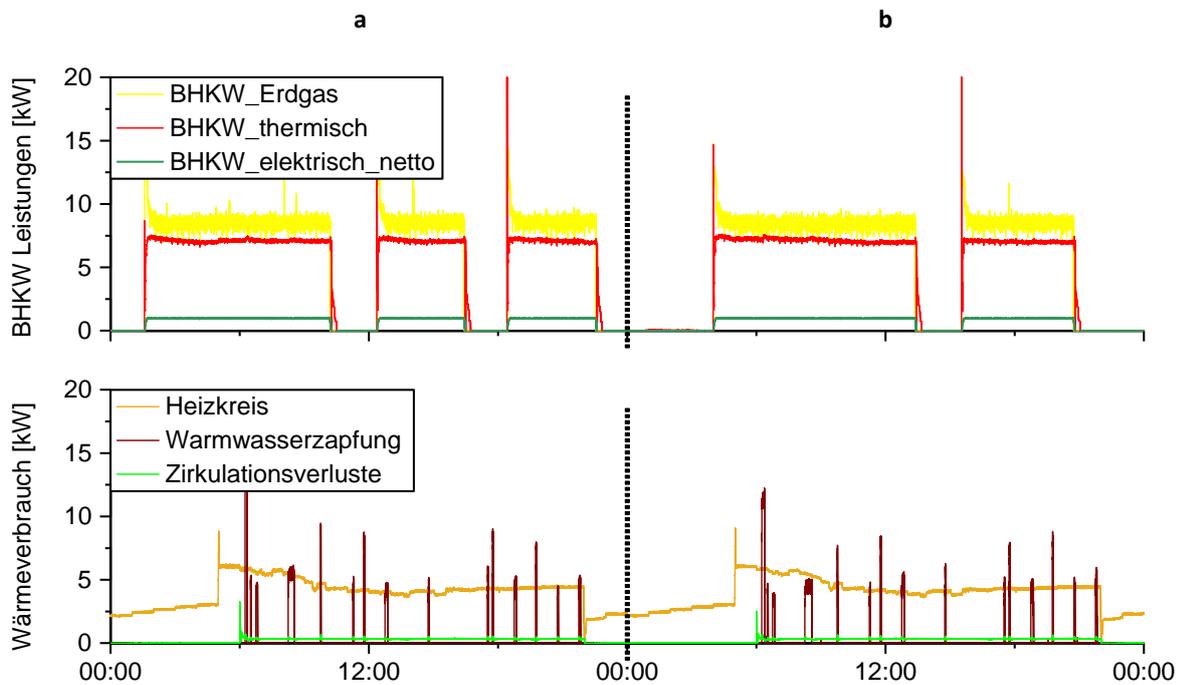


Abbildung 3-35: Whispergen Regelung, Typtag 5 °C

Tabelle 3-15: Erzeugte und verbrauchte Energien am Typtag 5 °C, Whispergen Regelung

Typtag 5 °C	a	b	Arithmetischer Mittelwert
Erdgas [kWh]	144	124	134
BHKW thermisch [kWh]	122	105	114
BHKW elektrisch, netto [kWh]	16,1	14,0	15,1
Heizkreis [kWh]	95,1	95,1	95,1
Warmwasser [kWh]	6,64	6,63	6,64
Zirkulation [kWh]	5,53	5,49	5,51

Da das Zusatzheizgerät nur am Typtag 0 °C aktiviert ist, könnte es sein, dass die notwendigen Solltemperaturen am Typtag 5 °C nicht erreicht werden. Abbildung 3-36 zeigt beispielhaft an Typtag 5 °C-b die gemessenen Vorlauftemperaturen für den Heizkreis am Speicher und nach dem Mischer, den Heizkreissollwert sowie die Zapftemperatur. Letztere nähert sich nach dem Ende der

Zirkulationszeit exponentiell der Raumtemperatur an. Während des Zirkulationsbetriebs ist  $T_{\text{WW,Zst}}$  jederzeit größer  $46\text{ °C}$ , also ausreichend warm. Für den Heizkreis gilt: Die vom Mischer eingestellte Temperatur  $T_{\text{HK,nM,VL}}$  entspricht dem von der Heizkurve vorgegebenen Sollwert. Diese ist jederzeit kleiner als die dem Heizkreis zur Verfügung stehende Temperatur  $T_{\text{HK,Sp,VL}}$ . Folglich wird der Heizkreis während der ganzen Messung mit ausreichend heißem Wasser versorgt.

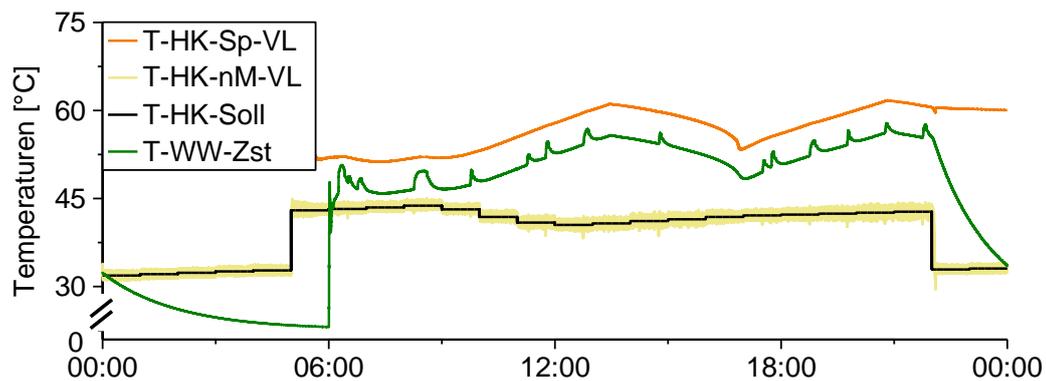


Abbildung 3-36: Einhaltung der Solltemperaturen, Whispergen Regelung, Typtag  $5\text{ °C}$

### Typtag $0\text{ °C}$

Für den Typtag  $0\text{ °C}$  (Abbildung 3-37) gibt es nur ein charakteristisches Betriebsverhalten: Das BHKW startet vor 2.00 Uhr und läuft bis nach 22.00 Uhr. Zwischendurch startet das Zusatzheizgerät zweimal und läuft insgesamt ca. zwei Stunden. Noch mehr als am Typtag  $5\text{ °C}$  stellt sich hier die Frage, ob die notwendigen Temperaturen für Heizung und Warmwasser erreicht werden (Abbildung 3-37, Diagramm unten). Von 6.30 bis 10.00 Uhr ist der Mischer komplett offen und die Heizkreisvorlauftemperatur fällt unter  $T_{\text{HK,soll}}$ . Das ZHG startet zwar kurz nach der Temperaturunterschreitung, schaltet jedoch ab, noch bevor  $T_{\text{HK,Sp,VL}}$  entscheidend angestiegen ist. Erst mit dem zweiten ZHG-Zyklus und einer fallenden Solltemperatur ab 10.00 Uhr ist der Mischer nicht mehr ganz geöffnet. Die Zapftemperatur liegt während des Zirkulationsbetriebs nur knapp über  $42\text{ °C}$ , steigt aber bei Zapfungen auf über  $44\text{ °C}$ .

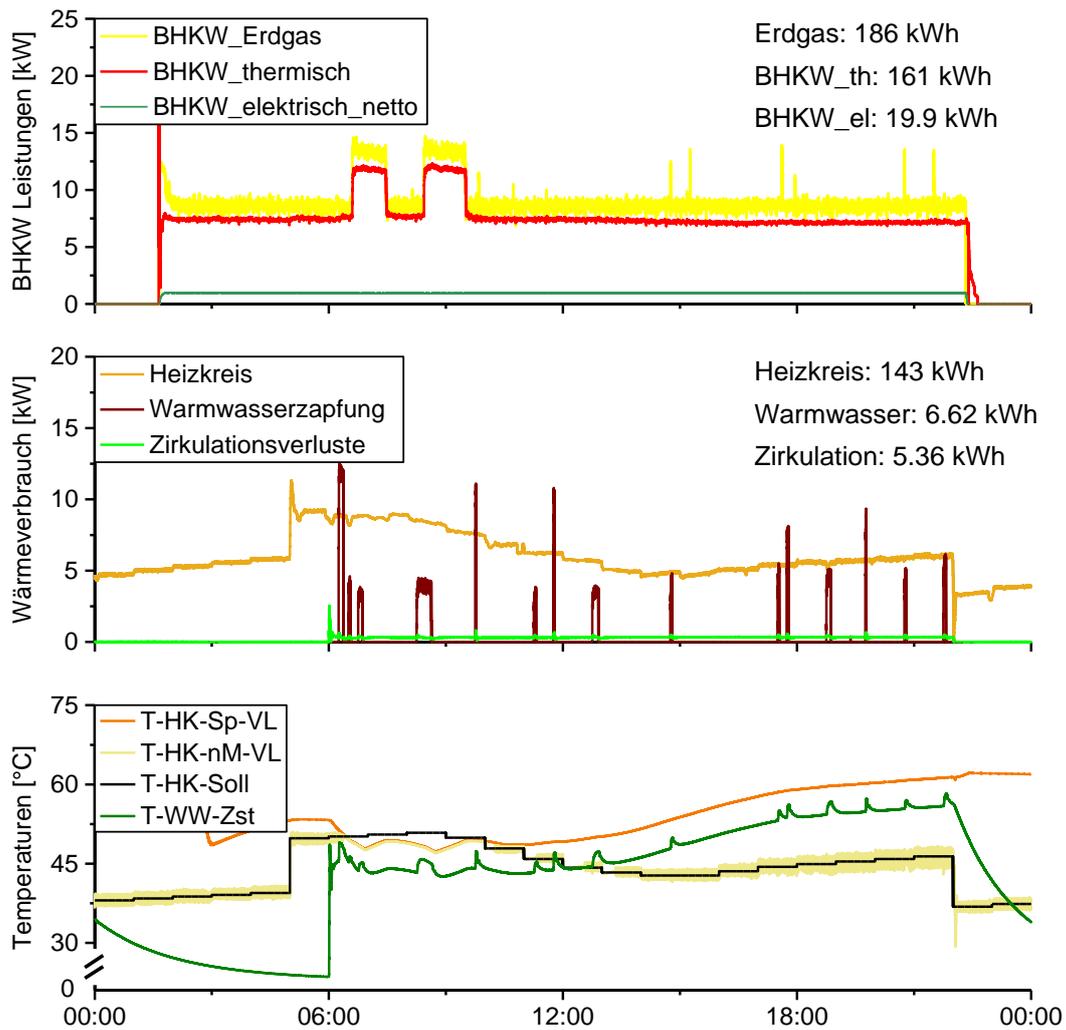


Abbildung 3-37: Whispergen Regelung, Typtag 0 °C

Betrachtet man die Speichertemperaturen während der beiden ZHG-Zyklen (Abbildung 3-38), so wird ersichtlich, dass der Speicher am Ende der Zyklen nur unwesentlich voller ist als zu Beginn. Dies spricht für eine kurze ZHG-Laufzeit. Versucht man die Kriterien für das Ein- und Ausschalten zu eruieren, wird klar, dass das ZHG bei Unterschreitung der mittleren Speichertemperatur von 47 °C einschaltet und beim Erreichen von 50 °C ausschaltet („10 Minuten / 3 °C“).

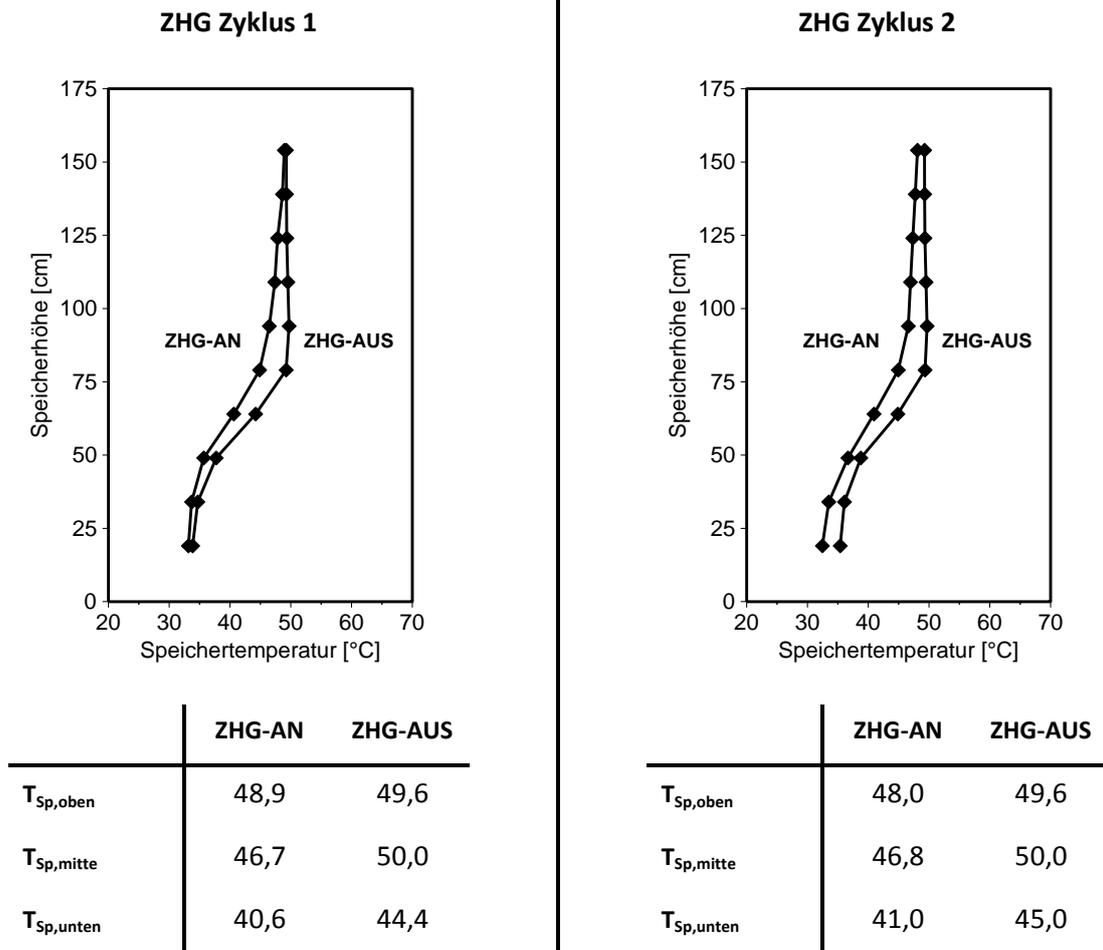


Abbildung 3-38: Speichertemperaturen während der ZHG-Zyklen, Whispergen Regelung, Typtag 0 °C

### Zusammenfassung der Typtaganalyse

Mit der Typtaganalyse kann das wärmegeführte Whispergen BHKW-Betriebsverhalten an unterschiedlichen, jedoch repräsentativen Tagen untersucht werden. Die BHKW-Regelung übernimmt die Sollwerte inklusive der Nachtabsenkung für die Heizkreis- und Warmwasserregelung. Wird nach einer eingestellten Zeit auch der reduzierte Sollwert unterschritten, startet das Zusatzheizgerät und läuft so lange, bis der Sollwert erreicht wird. Mit geschickten Einstellungen kann ein vorzeitiges Zuschalten des ZHG vermieden werden. Während die Einschaltbedingungen entweder von der Außentemperatur über der Heizkurve abhängen, oder durch den Warmwassersollwert verbindlich vorgegeben sind, stoppt das Whispergen BHKW immer bei Überschreitung einer festgelegten Speichertemperatur (hier:  $T_{Sp,unten} = 60 \text{ °C}$ ).

Weiterhin kann festgehalten werden, dass auf den Einsatz des Zusatzheizgeräts an den meisten Tagen verzichtet werden kann. Falls der Betreiber die Möglichkeit hat, sollte er das ZHG nur im Winter (manuell) aktivieren.

Tabelle 3-16 fasst die gemessenen Daten an den Typtagen zusammen. Logischerweise steigen die Laufzeit und die verbrauchten bzw. erzeugten Energiemengen mit fallender Außentemperatur. Die Anzahl der BHKW-Zyklen schwankt zwischen eins und drei. Ein regelmäßiges Takten tritt an keinem der Typtage auf.

Tabelle 3-16: BHKW Betriebsverhalten an den Typtagen

	Sommertag	15 °C*	10 °C*	5 °C*	0 °C
<b>BHKW Zyklen</b>	1	1 oder 2	2 oder 3	2 oder 3	1
<b>BHKW Laufzeit [h]</b>	2,40	3,74	8,73	15,7	20,7
<b>Erdgasverbrauch [kWh]</b>	20,5	36,5	83,5	134	186
<b>BHKW thermisch [kWh]</b>	16,9	30,8	72,1	114	161
<b>BHKW elektrisch, netto [kWh]</b>	2,29	3,53	8,30	15,1	19,9
<b>Nutzungsgrad thermisch [%]</b>	82,4	84,7	86,5	84,7	86,4
<b>Nutzungsgrad elektrisch [%]</b>	11,2	9,67	9,93	11,2	10,7
<b>Nutzungsgrad gesamt [%]</b>	93,5	94,4	96,4	96,0	97,0
<b>Stromkennzahl [-]</b>	0,135	0,114	0,115	0,133	0,123

\* Mittelwert aus den jeweiligen Versuchen

Die Ergebnisse der Typtaganalyse mit der betreiberoptimalen Betriebsführung bilden die Basis für die Verbesserung der optimierten BHKW Steuerung und Speicherausnutzung.

### 3.5 Kriterien für ein verbessertes Betriebsverhalten von Mikro-KWK-Systemen

Eine Mikro-KWK-Anlage sollte immer möglichst effizient und wirtschaftlich betrieben werden und das unabhängig von dem gewählten Steuerungsmodus. Dafür ist zu beachten, dass die Anlageneffizienz bei langen BHKW-Zyklen steigt bzw. im Taktbetrieb fällt. Zudem sinkt der Wirkungsgrad bei höheren Rücklauftemperaturen. Um einen effizienten KWK-Betrieb zu ermöglichen, sind lange Laufzeiten bei niedrigen Temperaturniveaus erforderlich. Ein (unnötiger) Betrieb des Spitzenlastkessels reduziert die BHKW-Laufzeit und verringert beides: Effizienz und Wirtschaftlichkeit.

Ein BHKW-Anlagenbetreiber versucht in der Regel ein Optimum aus thermischer Behaglichkeit und optimalem BHKW-Betrieb für sich zu finden. Nachdem die Behaglichkeit sichergestellt ist, kann er versuchen die Laufzeit des BHKW zu verlängern bzw. die Laufzeit des zusätzlichen Wärmeerzeugers (SLK oder ZHG) zu reduzieren. Weiterhin sollte er bemüht sein, ineffizienten Taktbetrieb zu vermeiden und die Stromeigennutzungsquote zu maximieren. All dies kann er durch manuelle Eingriffe verfolgen (Tabelle 3-17).

Tabelle 3-17: Verbesserungspotenziale von Mikro-KWK-Anlagen im Wärmeführungsmodus, „betreiberoptimal“

Normaler Wärmeführungsmodus		Betreiberlösung
Verlängerung der BHKW-Laufzeit/ Reduzierung der SLK/ZHG-Laufzeit	→	BHKW-Betrieb an den Wärmebedarf anpassen Deaktivieren des SLK/ZHG an milden Tagen Speicher „möglichst voll“
Vermeidung von Taktbetrieb	→	regelmäßige Aktualisierung der Sollwerte
Maximierung der Stromeigennutzungsquote	→	Nachtabsenkung programmierte Betriebszeiten gezieltes Verbraucherzuschalten

Trotz dieser Anstrengungen läuft das Mikro-KWK-System immer noch nicht optimal. Die programmierte Nachtabsenkung führt zwar zu einer geringeren Stromproduktion in der Nacht; sie erhöht aber auch die Wahrscheinlichkeit einer ungewollten Stromproduktion am Ende der Nachtabsenkung (vgl. Abbildung 3-9 und Abbildung 3-32). Bei fest programmierten Betriebszeiten reduziert sich die Stromeinspeisung. Jedoch kann die Anlage keinen Strom produzieren, wenn der Speicher „voll“ bzw. die Ausschalttemperatur erreicht ist. Ein flexibler BHKW-Stopp würde dazu beitragen, dass bei Bedarf länger Strom erzeugt werden kann.

Die herkömmlichen BHKW-Regelungen betrachten weder den aktuellen Speicherinhalt noch die verfügbare Speicherkapazität. Ebenso spielt der aktuelle oder der vergangene Wärmeverbrauch keine Rolle. Ein optimales BHKW-Betriebsverhalten, insbesondere hinsichtlich flexibler Stromerzeugung, kann nur erreicht werden, wenn der thermische Speicher zur Entkopplung von Wärmeerzeugung und -verbrauch eingesetzt wird. Weiterhin sollte der Speicher flexibel einsetzbar sein, d.h. flexible Ein- und Ausschaltbedingungen haben. Bei hohem thermischem Verbrauch könnte das BHKW früher eingeschaltet werden und auch länger laufen als bei geringer Nachfrage. Die aktuelle oder die vergangene Nachfrage sollte die BHKW-Regelung ebenfalls nutzen. Dafür müsste die Regelung den aktuellen Verbrauch bestimmen und daraus eine Wärmebedarfsprognose erstellen können.

Realisieren lässt sich eine flexible Stromerzeugung also nur, wenn der Speicher in den Mittelpunkt rückt. Eine Flexibilisierung kann erreicht werden, wenn die BHKW-Regelung den Füllstand des Speichers anstatt fest eingestellter Solltemperaturen nutzt. Unabdingbar für den Übergang von einer Sollwert- hin zu einer Speicherfüllstandsregelung ist detailliertes Wissen über den Speicher selbst, die hydraulische Einbindung des KWK-Systems sowie den Wärmeverbraucher. Weiterhin ist es essentiell, dass die Regelung das für jeden Speicher spezifische Verhalten bei Be- und Entladung kennt und den aktuellen Füllstand bestimmen kann (Tabelle 3-18).

Tabelle 3-18: Kriterien für ein verbessertes Miko-BHKW-Betriebsverhalten

<b>herkömmliche BHKW Regelung</b>		<b>BHKW mit flexibler Stromerzeugung</b>
Start beim Sollwertsprung	→	Start flexibilisieren
Stopp beim Erreichen einer vorgegebenen Speichertemperatur	→	Stopp flexibilisieren
Wärmeverbrauch und -bedarf unbekannt	→	Wärmeverbrauch bestimmen Bedarfsprognose erstellen
Temperaturfühler als Regelkriterium	→	Wärmebedarf- und stromoptimale Betriebsführung mit Hilfe des Speicherfüllstands

## 4. Speicher in Mikro-KWK-Systemen

Wie angesprochen sind der thermische Speicher und sein Betriebsverhalten für eine Flexibilisierung der Stromerzeugung von entscheidender Bedeutung. Dementsprechend steht das Speicherverhalten bei verschiedenen Betriebsbedingungen im Mittelpunkt des folgenden Kapitels.

Im ersten Abschnitt wird erläutert, wie sich der Temperaturverlauf im Speicher beim Laden und Entladen verändert (Kap. 4.1). Darauf aufbauend wird eine Definition des nutzbaren Speicherinhalts und der Speicherkapazität abgeleitet (Kap. 4.2). Im Anschluss wird der Speicherinhalt während des Betriebs (Kap. 4.3), im Feldtest (Kap. 4.4) und für die in Kapitel 3.4 betrachteten Typtage (Kap. 4.5) analysiert.

### 4.1 Temperaturverlauf im Speicher

Allgemein gesprochen bieten thermische Speicher in KWK-Systemen die Möglichkeit, die Stromerzeugung vom Wärmebedarf zu entkoppeln. Die meisten Arbeiten, die sich mit flexiblen KWK-Anlagen und Speichern auseinandersetzen, nehmen für die Speicherkapazität entweder einen konstanten Wert an oder gehen davon aus, dass die Kapazität von sensiblen Speichern nur von der Temperaturdifferenz des Vor- und Rücklaufs der KWK-Anlage sowie der Größe des Speichers abhängt.

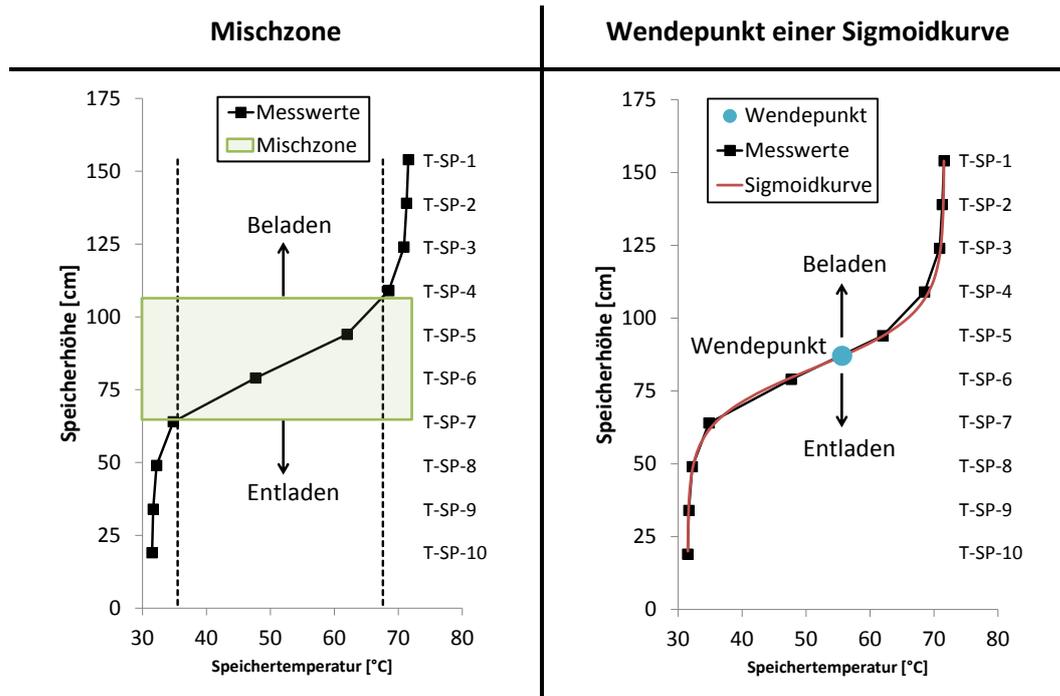
Huhn untersucht und bewertet demgegenüber in seiner Dissertation [HUHN 07] Wasserwärmespeicher in Energieumwandlungsketten. Unter anderem analysiert er den Einfluss von Einströmung und Einbauten auf die Mischung und thermische Schichtung im Speicher. Er definiert dabei die thermische Schichtung als das „Auftreten von zeitlich stabilen vertikal übereinander angeordneten Bereichen in einem Wasserwärmespeicher mit unterschiedlicher Temperatur“ ([HUHN 07], S. X). Darauf aufbauend entwickelt er Methoden zur Bestimmung der Mischzone, die den „Übergangsbereich in einem Wasserwärmespeicher zwischen einer warmen Speicherschicht und einer darunter befindlichen kälteren Schicht“ (ebenda) darstellt. Mit anderen Worten ist die Mischzone der Bereich im Speicher, in dem sich das kalte Rücklaufwasser von den Verbrauchern und das warme Wasser von den Erzeugern vermischt.

Huhn geht von einem gut geschichteten Speicher aus, weshalb ein Großteil des Temperaturabfalls innerhalb einer schmalen Mischzone anfällt. Bei der von Huhn mitunter entwickelten 90/10 %-Methode befinden sich 80 % des Temperaturgradienten im Bereich der Mischzone. In Bezug auf die maximale ( $T_{Sp,max}$ ) und minimale Speichertemperatur ( $T_{Sp,min}$ ) wird die Mischzone als der Speichervolumenanteil definiert, in dem für die Speichertemperaturen ( $T_{Sp}$ ) folgender Zusammenhang gilt:

$$0,9 \times T_{Sp,min} + 0,1 \times T_{Sp,max} < T_{Sp} < 0,1 \times T_{Sp,min} + 0,9 \times T_{Sp,max} \quad (4.1)$$

Durch Zuführung warmen Wassers wandert bei einer Speicherbeladung die Mischzone nach unten, bei einer Speicherentladung hingegen nach oben. Über die Richtung, in die sich die Mischzone bewegt, kann ohne zusätzliche Messtechnik bestimmt werden, ob der Speicher aktuell geladen oder entladen wird.

Die Geschwindigkeit der Mischzonenwanderung lässt zudem Rückschlüsse auf die Ausprägung der Lade- bzw. Entladeleistung zu (Abbildung 4-1, linkes Diagramm). Wehmhörner [WEH 12] baut in seiner Dissertationsschrift auf die Arbeit von Huhn auf, verwendet jedoch nicht die Mischzone, sondern adaptiert an die gemessenen Temperaturwerte eine Sigmoidkurve. Durch die Bestimmung des Wendepunktes dieser Kurve und dessen „Wanderung“ bestimmt er die „thermische Bilanz“ (Speicherbe- oder Speicherentladeleistung) am Speicher (rechtes Diagramm in Abbildung 4-1).



**Abbildung 4-1:** Bestimmung der thermischen Bilanz am Speicher durch die Verlagerung der Mischzone bzw. die Wanderung des Wendepunkts einer an die Speichertemperaturen adaptierten Sigmoidkurve, nach [HUHN 07] und [WEH 12]

Abbildung 4-2 illustriert beispielhaft drei für Kombispeicher typische Speichertemperaturverläufe, für die versucht wurde, die Verfahren von Huhn und Wehmhörner anzuwenden. Im linken Diagramm befindet sich die Mischzone in der Mitte des Speichers und hat eine Ausdehnung von ca. 40 cm. Der Wendepunkt der Speichertemperaturkurve befindet sich innerhalb der Mischzone. Dieser Speichertemperaturverlauf zeigt eine schmale Mischzone und folglich eine gute thermische Schichtung. Im mittleren Diagramm ist die Mischzone wegen der nahezu konstanten Speichertemperatur noch schmaler. Eine Sigmoidkurvenadaptation und die Bestimmung eines Wendepunkts sind nicht möglich. Das dritte Diagramm weist einen annähernd linear ansteigenden Temperaturverlauf auf. Eine Temperaturschichtung tritt hier überhaupt nicht ein. Folglich erstreckt sich die Mischzone über einen sehr großen Bereich des Speichers. Sowohl die Sigmoidadaptation als auch die Suche nach dem Wendepunkt erübrigen sich in diesem Fall. Es lässt sich für die vorliegende Arbeit schlussfolgern, dass die thermische Bilanz anders bestimmt werden muss.

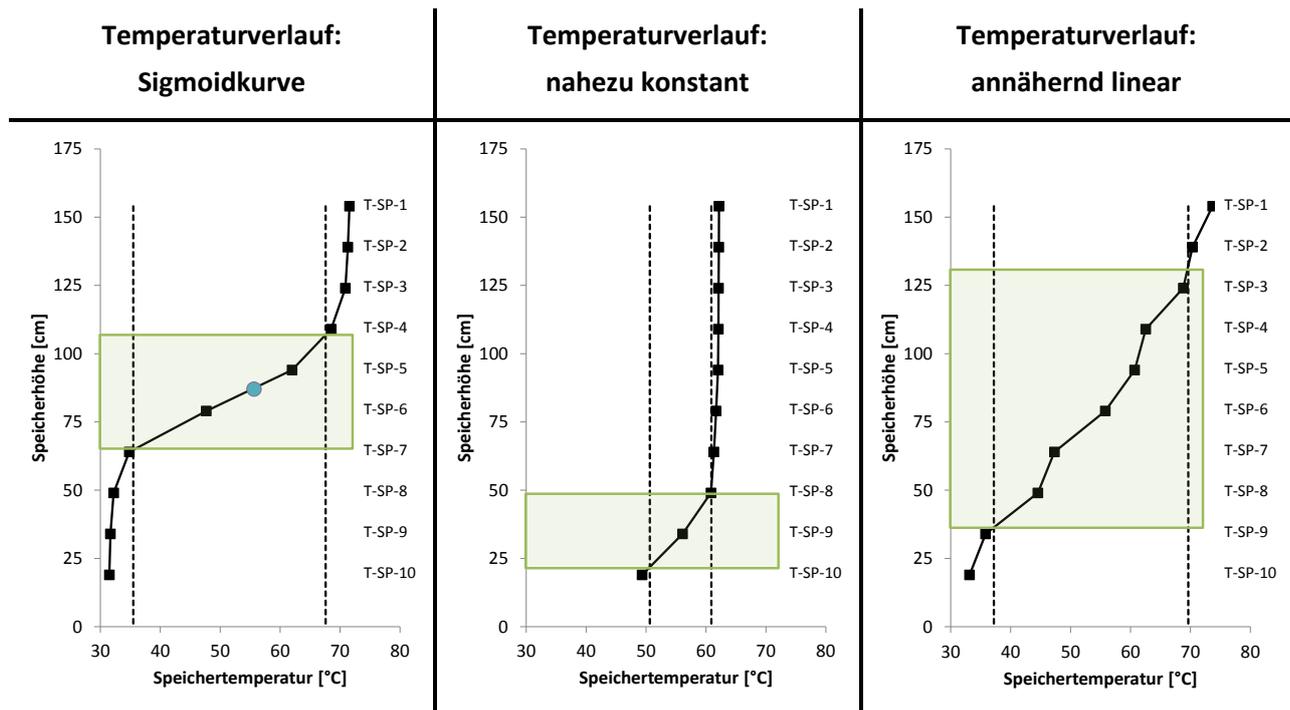


Abbildung 4-2: Mischzonen nach der 90/10 % Methode für drei typische Temperaturverläufe im Kombispeicher

Der Grund dafür, dass die Verfahren nicht übernommen werden können, liegt in der betrachteten Speicherart: Wehnhörner verwendet in seiner Arbeit einen Pufferspeicher mit externem Warmwasserspeicher (vgl. Kapitel 2.4.2). Durch den direkten Wasseraustausch ergibt sich bei der Speicherladung (bzw. -entladung) eine gute thermische Schichtung, mit Hilfe derer eine Mischzone definiert und eine Sigmoidkurve mit Wendepunkt adaptiert werden kann.

Für die in kleineren Wohngebäuden eingesetzten Kombispeicher trifft dies alles wegen der indirekten Beladung im unteren Bereich des Speichers jedoch nicht zu. Daher wurden exemplarische Temperaturverläufe für diese Speicherart aufgezeichnet, um darauf aufbauend ein alternatives Modell zu entwickeln.

#### 4.1.1 Speicherbeladung

In Abbildung 4-3 wird der zeitliche Verlauf der Speichertemperaturen beim Laden mit dem Whispergen BHKW dargestellt. Zu Beginn der Messung (rote Kurve<sup>32</sup>) ist der Speicher komplett ausgekühlt, die Speichertemperaturen entsprechen der Raumtemperatur.<sup>33</sup> Der Speicher wird so lange geladen, bis die interne BHKW-Steuerung das BHKW wegen Übertemperatur (Fehlercode E 20 [EHE 10]) ausschaltet.

Bei der Betrachtung von Abbildung 4-3 wird ersichtlich, dass sich erstens keine Temperaturschichtung

<sup>32</sup> Zur besseren Orientierung für den Leser und die Leserin werden für die folgenden Lade- und Entlademessungen die Starttemperaturen immer in rot dargestellt. Zugleich werden die vorletzte und letzte Temperaturkurve in hellblauer bzw. hellgrüner Farbe dargestellt. Durch die Farbmarkierung ist die Richtung, in die sich die Temperaturen verschieben (Laden oder Entladen), besser ersichtlich.

<sup>33</sup> Im realen Betrieb sollte sich ein thermischer Speicher niemals auf diesem Temperaturniveau befinden, da bei diesen Temperaturen der Wärmeverbrauch nicht gedeckt werden kann.

einstellt und zweitens die Temperaturen oberhalb des achten Speicherfühlers ( $T_{Sp,8}$ ) nahezu identisch sind. Die sich bildende Isotherme bewegt sich nach rechts in Richtung der höheren Temperaturen. Aufgrund der von unten erfolgenden indirekten Speicherbeladung bildet sich keine Mischzone, im Gegenteil: Das warme Wasser, welches wegen des Dichteunterschieds von unten nach oben wandert, gleicht die Temperaturunterschiede aus. Nur der untere Teil des Speichers bleibt über die gesamte Messreihe etwas kälter. Der Grund hierfür ist, dass sich das Speicherwasser unterhalb des BHKW-Rücklaufs (Wasseraustrittshöhe: 50 cm) nur zeitlich leicht verzögert erwärmen kann.

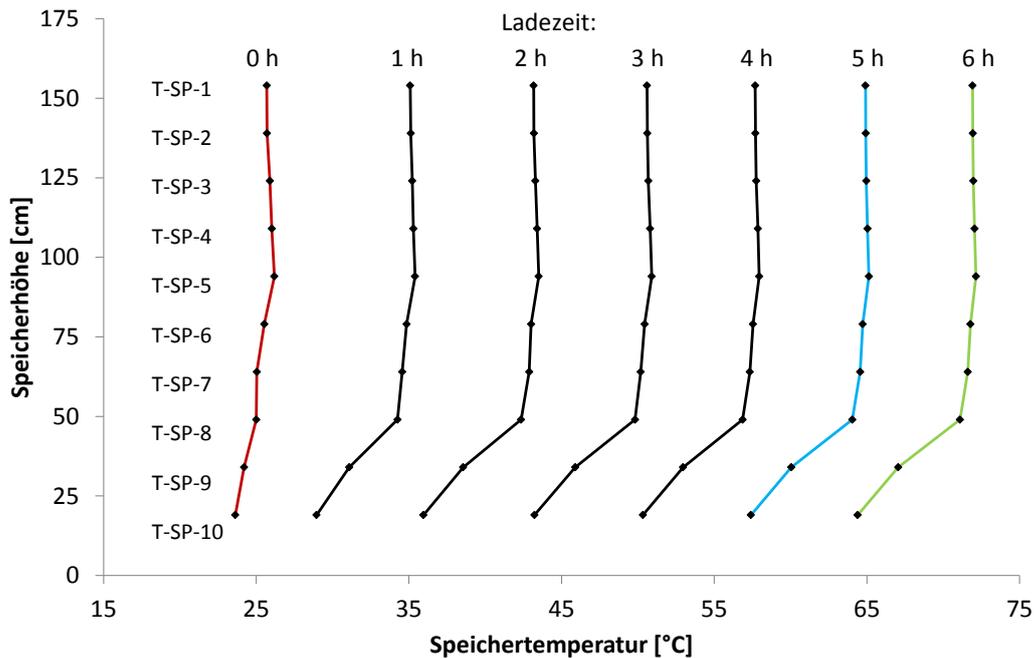


Abbildung 4-3: Speichertemperaturen während der Speicherladung

Nach über sechs Stunden ist der Speicher komplett geladen und das BHKW schaltet sich automatisch ab. Die zu diesem Zeitpunkt gemessenen Temperaturen gibt Tabelle 4-1 wieder. Die Temperaturen  $T_{Sp,1}$  bis  $T_{Sp,8}$  liegen zwischen 71,1 °C und 72,1 °C, also in einem Spektrum von nur einem Grad. Die beiden unteren Speichertemperaturen sind etwas niedriger (67,1 °C bzw. 64,4 °C). Die zum Abschaltzeitpunkt gemessene BHKW-Temperaturen beträgt 73,6 °C (Vorlauf) bzw. 70,0 °C (Rücklauf). Das Erreichen einer Rücklaufftemperatur von 70,0 °C entspricht dem Whispergen Abschaltkriterium (Übertemperatur).

Tabelle 4-1: Speicher- und BHKW-Temperaturen beim Abschalten wegen Übertemperatur

Fühler	$T_{Sp,1}$	$T_{Sp,2}$	$T_{Sp,3}$	$T_{Sp,4}$	$T_{Sp,5}$	$T_{Sp,6}$
Temperatur [°C]	71,9	71,9	72,0	72,1	72,1	71,8
Fühler	$T_{Sp,7}$	$T_{Sp,8}$	$T_{Sp,9}$	$T_{Sp,10}$	$T_{BHKW,VL}$	$T_{BHKW,RL}$
Temperatur [°C]	71,6	71,1	67,1	64,4	73,6	70,0

### 4.1.2 Speicharentladung

Der thermische Speicher kann sowohl durch den Heizkreis als auch durch das Warmwassersystem (Zapfgenerator und/oder Zirkulationsverluste) entladen werden. Da für den Heizkreis im oberen Bereich kontinuierlich warmes Wasser entnommen und im unteren Bereich kälteres Wasser wieder zugeführt wird, kann sich eine thermische Schicht ausbilden. Demgegenüber wird bei einer Warmwasserzapfung das unten im Speicher kalt eintretende Wasser über den internen Wärmetauscher erwärmt. Es findet dann kein Wasseraustausch statt. Der Zirkulationsrücklauf ist über die Lanze direkt in den oberen Warmwasserteil des Speichers eingebunden. Ein Wasseraustausch erfolgt auch hier nicht.

#### Warmwasserzapfen

Zapft man zwei Stunden Warmwasser (Zapfdurchfluss: 0,10 l/s) aus dem vollgeladenen Speicher,<sup>34</sup> ergibt sich der in Abbildung 4-4 dargestellte Temperaturverlauf. Die anfangs konstanten Temperaturen wandern nach links. Da das Kaltwasser am unteren Ende des Speichers eintritt, sinken die unteren Temperaturen anfangs sehr viel schneller. Mit der Zeit ergibt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen den Speichertemperaturen und der Speicherhöhe. Eine thermische Schichtung erfolgt nicht.

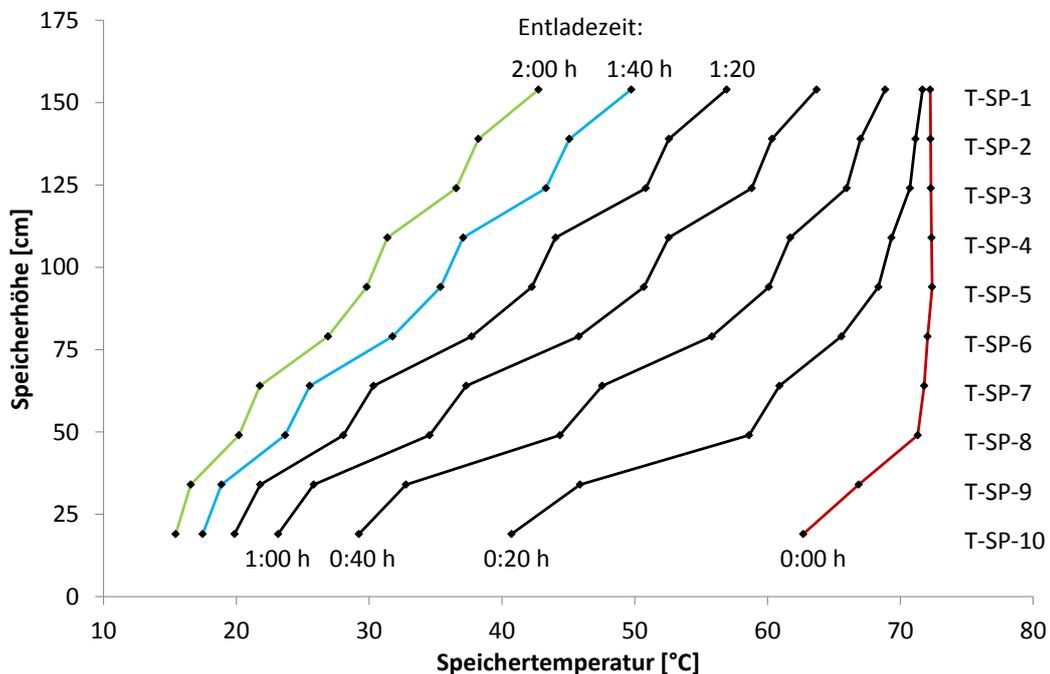


Abbildung 4-4: Speichertemperaturen während einer Warmwasserzapfung

Durch die fallenden Speichertemperaturen sinkt die Zapftemperatur und folglich auch die Zapfleistung (siehe Abbildung 4-5). Für das Komfortbedürfnis der Bewohner ist die Temperatur an der Zapfstelle

<sup>34</sup> In Wirklichkeit sind Zapfvorgänge deutlich kürzer, selbst das Einlassen eines Vollbades dauert nur ca. 15 Minuten und stellt die Obergrenze dar. Der untersuchte Fall (2 h) soll zeigen, ob es bei langen Zapfungen oder evtl. mehreren aufeinanderfolgenden Zapfungen zu einer thermischen Schichtung kommt.

( $T_{WW,Zst}$ ) entscheidend. Diese beträgt am Ende der Messung 35,2 °C und ist damit für die meisten Anwendungen (Vollbad, Dusche etc.) zu gering. Je nach Einrichtung und Komfortwunsch der Bewohner sollte eine Mindesttemperatur festgelegt werden. Laut der Norm 6003 des Vereins Deutscher Ingenieure [VDI 6003] sind 42 °C für Waschtische und Duschen ausreichend. Zum Handspülen oder in Gebäuden mit Badewannen oder Whirlpools werden höhere Temperaturen benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird im Folgenden entsprechend eine Mindestzapftemperatur von 42,0 °C vorausgesetzt.

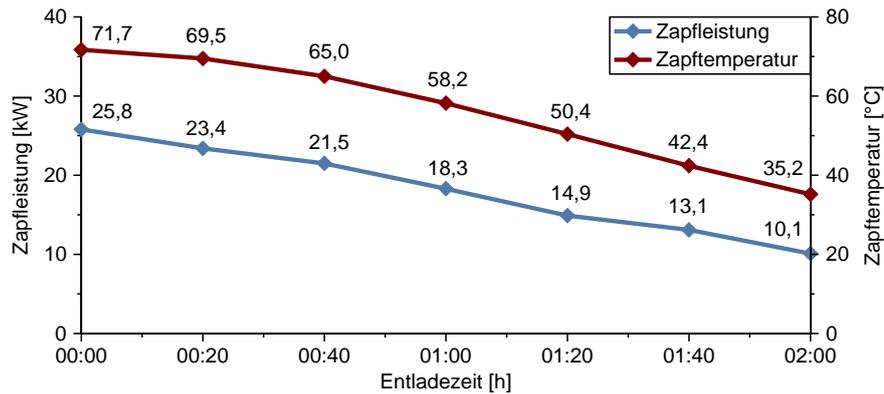


Abbildung 4-5: Zapftellentemperatur und Zapfleistung während einer Warmwasserzapfung

Wegen des installierten Zirkulationsbetriebs gibt es nahezu keinen Temperaturabfall zwischen der Austrittstemperatur des Warmwassers am Speicher ( $T_{WW,sp}$ ) und der Zapftemperatur  $T_{WW,Zst}$ . Folglich beträgt die Mindesttemperatur am Speicherausgang ebenfalls 42,0 °C. Tabelle 4-2 zeigt die Speichertemperaturen aus der Messung von Abbildung 4-5 zu dem Zeitpunkt, an dem die Zapftemperatur unter 42,0 °C fällt. Es wird deutlich, dass der Speicher zumindest teilweise wärmer als 42 °C sein muss, damit die Austrittstemperatur 42,0 °C betragen kann.

Tabelle 4-2: Speichertemperaturen bei  $T_{WW-Zst} = 42,0$  °C

Fühler	$T_{Sp,1}$	$T_{Sp,2}$	$T_{Sp,3}$	$T_{Sp,4}$	$T_{Sp,5}$	$T_{Sp,6}$
Temperatur [°C]	49,4	44,7	42,9	36,8	35,1	31,5
Fühler	$T_{Sp,7}$	$T_{Sp,8}$	$T_{Sp,9}$	$T_{Sp,10}$	$T_{WW,sp}$	$T_{WW,Zst}$
Temperatur [°C]	25,3	23,5	18,7	17,4	42,0	42,0

### Heizkreis

Wenn der Speicher durch den Heizkreis entladen wird, fließt warmes Wasser aus dem oberen Bereich des Speichers zum Wärmetauscher, wird dort abgekühlt und dem unteren Bereich des Speichers zurückgeführt. Dies entspricht dem Entladeverhalten eines konventionellen Pufferspeichers. Wird ein Kombispeicher durch den Heizkreis entladen, bildet sich eine thermische Schicht. Abbildung 4-6 verdeutlicht anhand von drei unterschiedlichen Heizkreisverbräuchen (10 kW, 5 kW und 2 kW), wie die

Speichertemperaturen von rechts (rote Kurve,  $t = 0$ ) nach links, von den hohen zu den kalten Temperaturen, wandern. Nach insgesamt 13 Zeitschritten (13 x 15 Minuten: 3,25 h) ist der Speicher im linken Beispiel von Abbildung 4-6 (hellgrüne Kurve) komplett entleert. Die sich bildende Isotherme entspricht der Heizkreisrücklauf­temperatur. In den beiden anderen Messungen wurde der Zeitschritt der Entladeleistung angepasst. Das prinzipielle Schichtungsverhalten bleibt zwar erhalten, bei niedrigen Leistungen ist es jedoch nicht mehr so stark ausgeprägt.

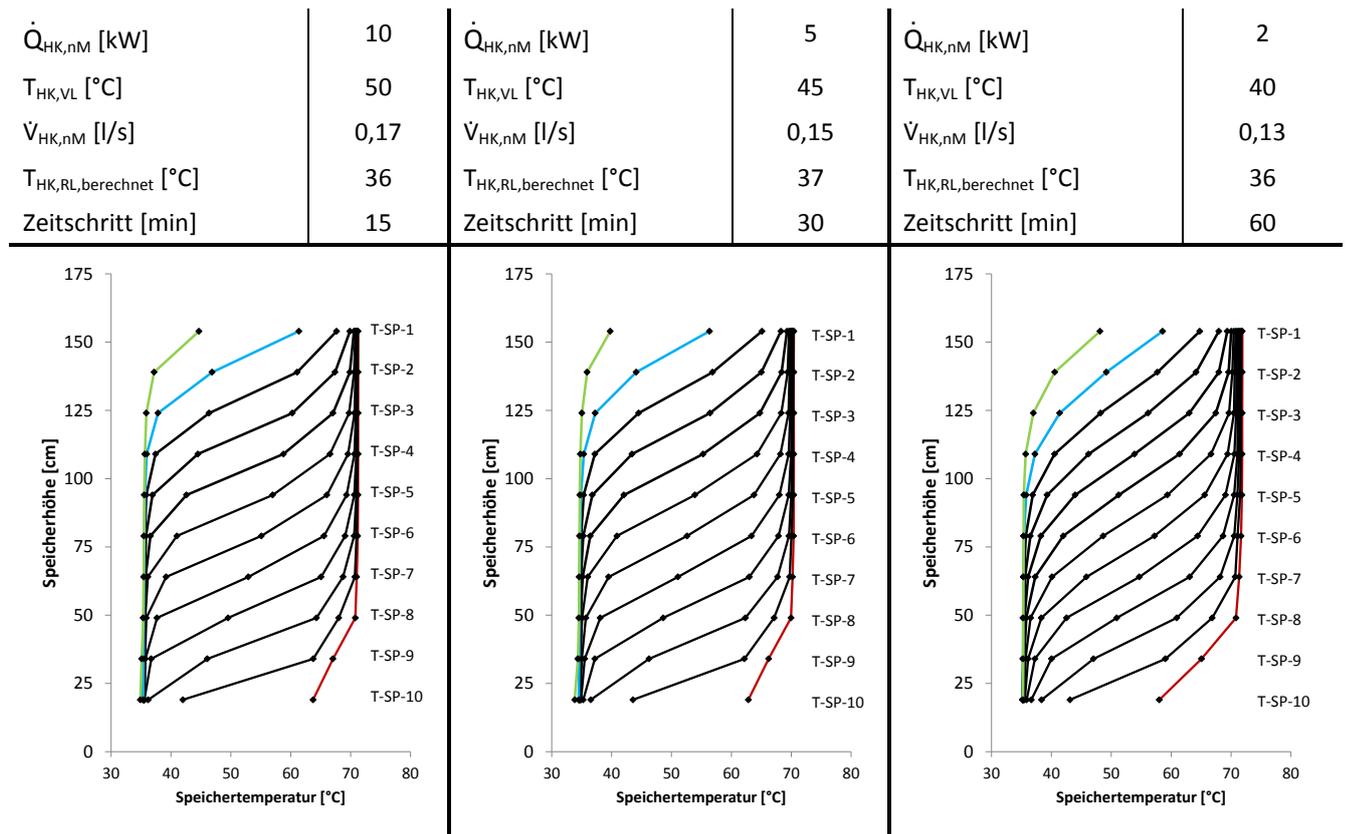


Abbildung 4-6: Speichertemperaturverläufe, Heizkreisentladung

### Zirkulation

Für den Fall, dass nur die Zirkulationspumpe läuft, ergibt sich der in Abbildung 4-7 dargestellte Speichertemperaturverlauf. Die in den Warmwasserausgang integrierte Zirkulationslanze verhält sich wie ein interner Wärmetauscher im oberen Teil des Speichers. Da die Entladeleistung (0,8 kW) im Vergleich zu einer Zapfung sehr klein ist, können sich die Temperaturen im Speicher angleichen. Im Verlauf der Messung nimmt die Temperatur der Isothermen kontinuierlich ab.

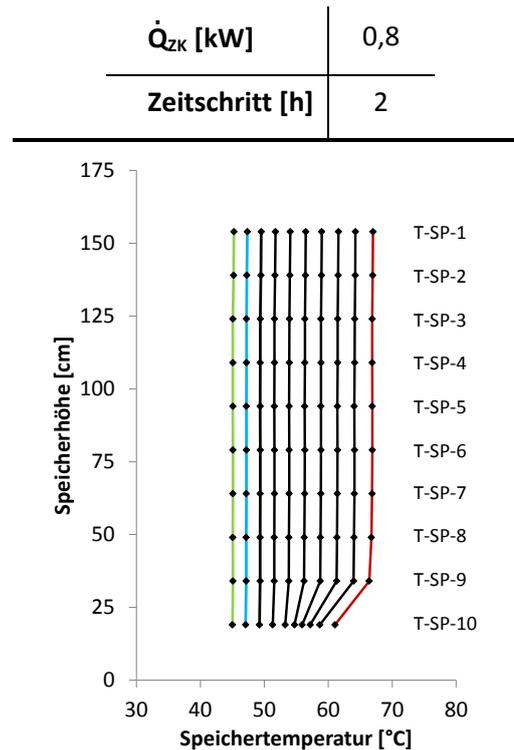


Abbildung 4-7: Speichertemperaturverläufe, Zirkulationsentladung

### Speicherabkühlkurven

Das Abkühlen der Speichertemperaturen ohne Be- oder Entladung zeigen Abbildung 4-8 und Abbildung A-5 im Anhang. Die Messung konnte nach knapp 13 Tagen abgebrochen werden. Die Umgebungstemperatur betrug im Mittel 19 °C.

Beide Abbildungen zeigen, dass der Speicher im unteren Bereich schneller auskühlt als im oberen. Die oberen Speichertemperaturen ( $T_{Sp,1}$  einschließlich  $T_{Sp,4}$ ) sind nahezu konstant und fallen sehr langsam und gleichmäßig. Im unteren Teil des Speichers sind die Temperaturen etwas niedriger und fallen ein wenig schneller. Auch nach einer Woche sind die oberen vier Speichertemperaturen noch wärmer als 44 °C.

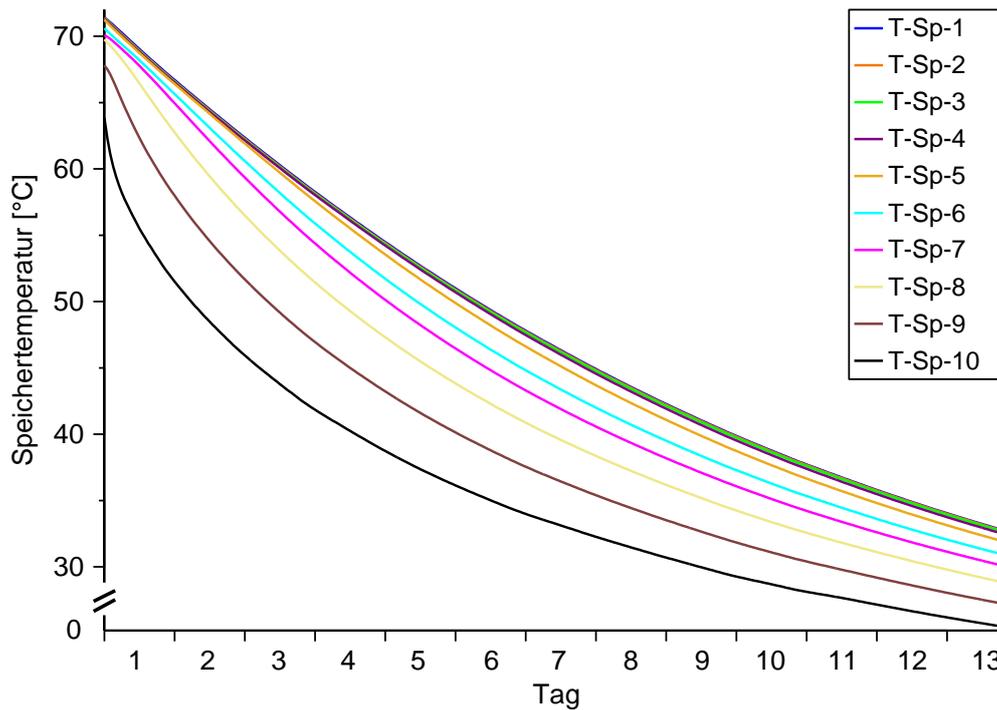


Abbildung 4-8: Speicherabkühlkurven I

Für die Beschreibung des Abkühlverhaltens können die Zeitkonstanten ( $\tau$ ) der Speichertemperaturen bestimmt werden. Sie sagen aus, nach welcher Zeit die Temperaturdifferenz zur Umgebung um ca. 63,2 % gefallen ist. In Rudolph [RUD 08] findet sich eine Näherungsformel, die für die Berechnung der Zeitkonstanten verwendet werden kann. Die Formel beinhaltet zwei gemessene Temperaturen ( $T(t_1)$ ,  $T(t_2)$ ), die Umgebungstemperatur ( $T_U$ ) und die dazugehörigen Messzeitpunkte ( $t_1$  und  $t_2$ ):

$$\tau \approx \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{T(t_1) - T_U}{T(t_2) - T_U}\right)} \quad (4.2)$$

- gilt für:
- $t_1 \geq 24 \text{ h}$
  - $t_2 - t_1 \geq 48 \text{ h}$
  - $T(t_1) \gg T_U \wedge T(t_2) \gg T_U$

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Zeitkonstanten der oberen vier Speicherfühler fast identisch und jeweils größer 230 Stunden (entspricht knapp 10 Tage) sind. Die Zeitkonstanten sinken mit fallender Speicherhöhe. Im unteren Bereich des Speichers fallen sie auf weniger als 180 Stunden (Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: Zeitkonstanten der Speichertemperaturen

	$T_{Sp,1}$	$T_{Sp,2}$	$T_{Sp,3}$	$T_{Sp,4}$	$T_{Sp,5}$	$T_{Sp,6}$	$T_{Sp,7}$	$T_{Sp,8}$	$T_{Sp,9}$	$T_{Sp,10}$
$\tau$ [h]	236	236	235	232	220	203	190	177	167	162

### 4.1.3 Zeitgleiches Laden und Entladen

Im realen Betrieb wird der Speicher äußerst selten über längere Zeiträume ausschließlich geladen oder entladen. Im wärmegeführten Betrieb sollte das BHKW immer dann laufen, wenn Wärme dem Speicher entnommen wird. Im Heizbetrieb läuft das BHKW bis der Speicher „voll“ ist, schaltet sich dann aus und läuft noch bevor der Speicher „leer“ ist wieder an. Im Sommer hingegen, wenn die Heizkreispumpe das Speicherwasser nicht umschichtet, gibt es lange Zeiträume, zu denen nur Zirkulationsbetrieb herrscht oder der Speicher auskühlt (z.B. nachts). Der Speicher hat also prinzipiell die Möglichkeit, eine thermische Schichtung aufzubauen. Dieser Vorgang wird jedoch durch die einzelnen Zapfungen unterbrochen.

#### Heizkreis

Aufgrund der relativ großen thermischen BHKW-Leistung ist auch während der Heizperiode die thermische Bilanz am Speicher (Speicherladung abzüglich Wärmeverbrauch) meist positiv. Abbildung 4-9 zeigt den Verlauf der Speichertemperaturen für drei Fälle:

- $\dot{Q}_{th,BHKW} \gg \dot{Q}_{th,HK,nM} = 2 \text{ kW}_{th}$
- $\dot{Q}_{th,BHKW} > \dot{Q}_{th,HK,nM} = 5 \text{ kW}_{th}$
- $\dot{Q}_{th,BHKW} < \dot{Q}_{th,HK,nM} = 10 \text{ kW}_{th}$

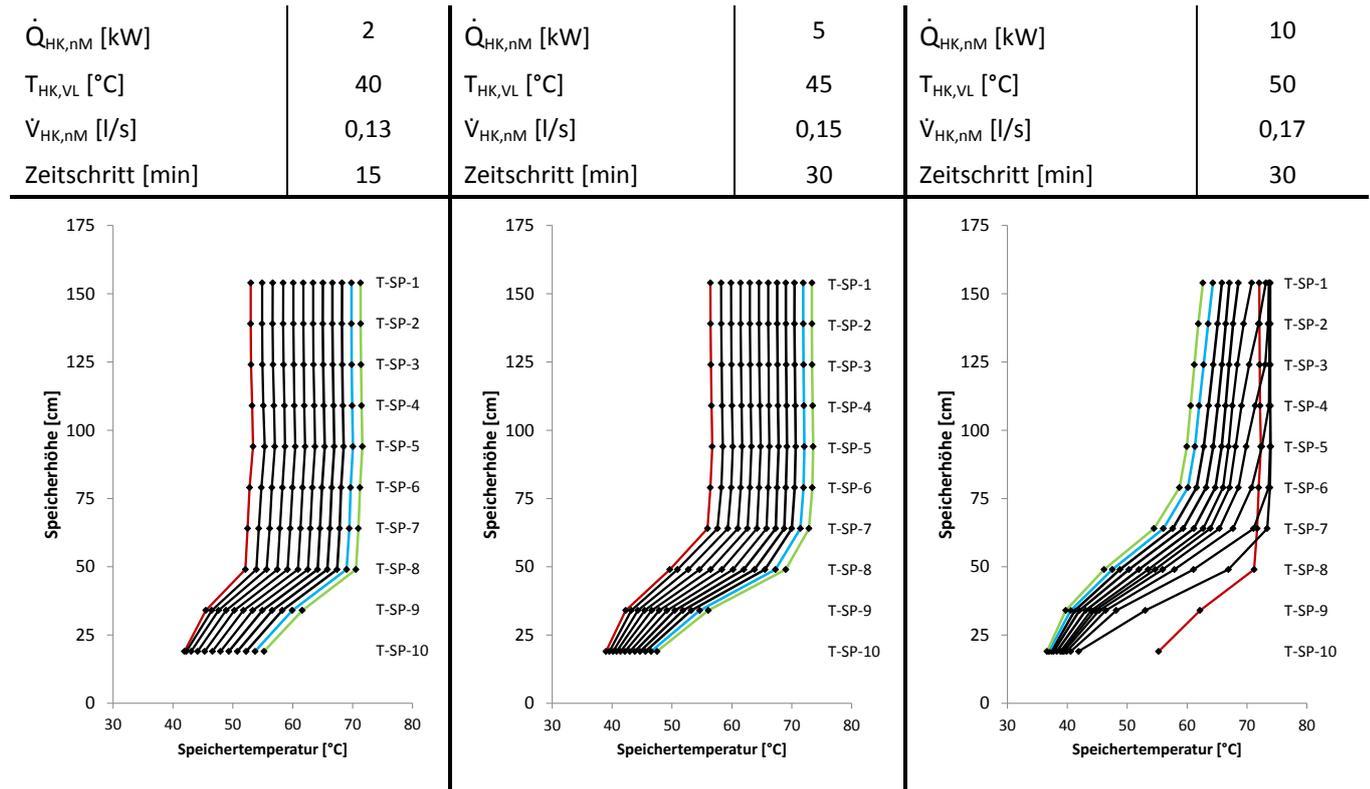


Abbildung 4-9: Gleichzeitiges Laden und Entladen: Heizkreis

Deutlich wird, dass in den beiden linken Fällen ( $\dot{Q}_{\text{th,BHKW}} > \dot{Q}_{\text{th,HK,nM}}$ ) die gemessenen Temperaturen gleichförmig nach rechts hin zu den höheren Temperaturen wandern. Der einzige Unterschied besteht in der Geschwindigkeit, mit der sich die Kurven nach rechts bewegen. Im linken Diagramm von Abbildung 4-9 umfasst der gewählte Zeitschritt 15, im mittleren 30 Minuten. Ist die BHKW-Leistung wie im dritten Fall kleiner als der Heizkreisverbrauch, dann ergibt sich, dass die Temperaturen über dem BHKW-Wärmetauscher anfangs leicht ansteigen, während  $T_{\text{Sp,8}}$  bis  $T_{\text{Sp,10}}$  fallen. Kurze Zeit später wandert das kalte Heizkreisrücklaufwasser trotz BHKW-Ladung langsam nach oben. Anschließend stellt sich ein stabiler Verlauf ein, welcher sich in Richtung der kalten Temperaturen verschiebt.<sup>35</sup>

Im Vergleich zum reinen Heizkreisentladen verhindert das gleichzeitige Laden den Aufbau einer Mischzone sowie eine thermische Schichtung.

### Warmwasserzapfen

Zapft man Warmwasser, während das BHKW läuft, wird der Verlauf der Speichertemperaturen vom gewählten Warmwasserdurchfluss bestimmt. Bei hohem Durchfluss (Abbildung 4-10, links) fallen anfangs aufgrund des kalt einströmenden Wassers die unteren Speichertemperaturen schneller als die

<sup>35</sup> Im Anhang (Abbildung A-6) findet sich zusätzlich der Fall, dass die BHKW-Leistung gleich der entnommenen Heizleistung ist. Ähnlich wie in den anderen Beispielen fallen die unteren Speichertemperaturen, während die oberen ansteigen. Nach ca. einer Stunde hat sich ein stabiler Zustand ausgebildet, in dem die Speichertemperaturen konstant bleiben. Abbildung A-6 zeigt 14 Zeitschritte in 6 1/2 Stunden. Danach wurde die Messung abgebrochen.

oberen. Da mit der Zeit der Temperaturunterschied zwischen dem internen Wärmetauscher und dem Speicherwasser im unteren Bereich abnimmt, wird mehr Energie aus dem mittleren und oberen Speicherschichten auf das Warmwasser übertragen, weshalb diese Temperaturschichten ebenfalls abkühlen. Das rechte Diagramm von Abbildung 4-10 illustriert den Speichertemperaturverlauf bei Minimaldurchfluss: die Zapfleistung ist deutlich kleiner als die thermische BHKW-Leistung. Vom Startzeitpunkt (rote Kurve) aus gesehen wandern alle Temperaturen kontinuierlich nach rechts in Richtung der höheren Temperaturen. Im mittleren Diagramm sind die Lade- und Entladeleistung nahezu gleich. Der anfangs mit der Speicherhöhe ansteigende Temperaturverlauf verändert sich: Durch das Laden steigen die unteren Speichertemperaturen an, während die oberen Speichertemperaturen aufgrund des aufsteigenden kalten Wassers fallen. Im Verlauf der Messung fällt die Temperaturspreizung im Speicher stark ab, so dass am Ende der Messung die Temperaturen  $T_{Sp,2}$  bis  $T_{Sp,7}$  fast identisch sind. Für die drei gewählten Kombinationen ergibt sich in keinem Fall eine thermische Schichtung, eine Mischzone oder ein Wendepunkt einer adaptieren Sigmoidkurve.

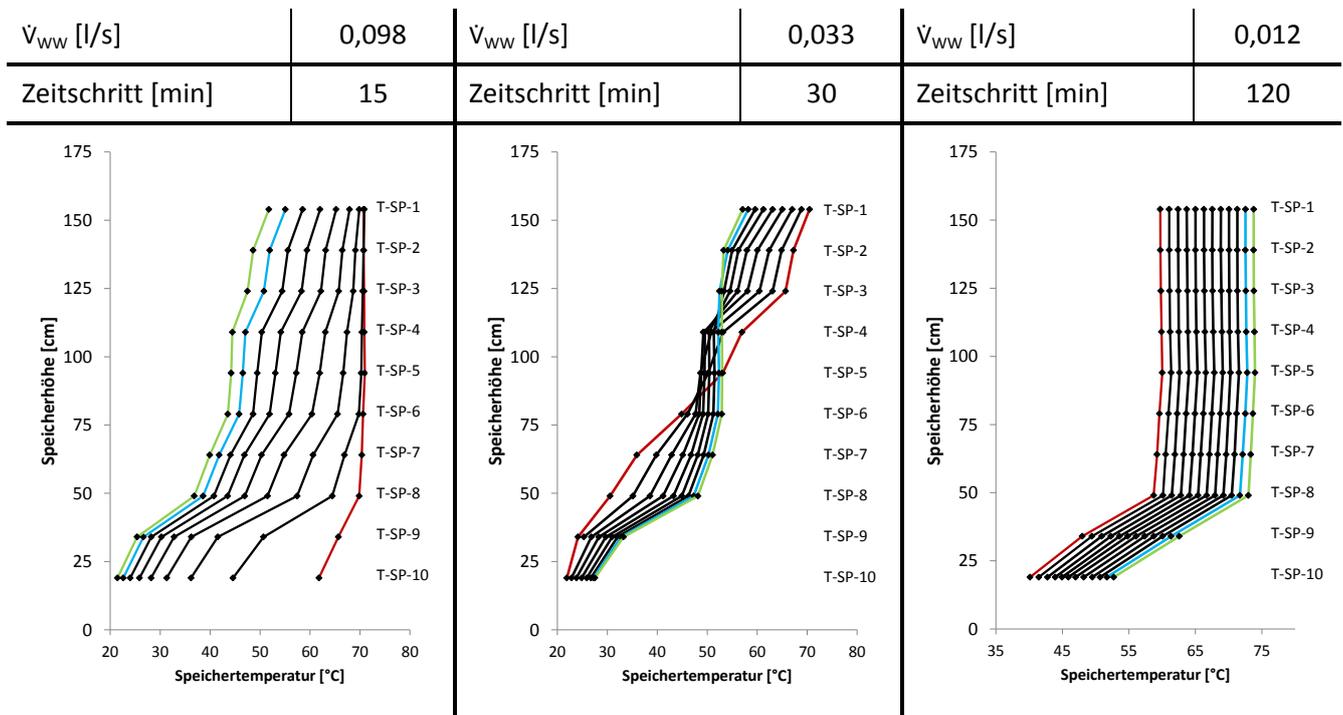


Abbildung 4-10: Gleichzeitiges Laden und Entladen: Warmwasser

Die durchgeführten Messungen verweisen darauf, dass sich ein Kombispeicher mit indirekter Speicherbeladung anders verhält als ein Pufferspeicher. In den meisten vorgestellten Lade- und/oder Entladekombinationen (Ausnahme: Heizkreisentladung) stellt sich eine gleichförmige Temperatur (Isotherme) im oberen Teil des Speichers ein.

## 4.2 Speicherinhalt und Speicherkapazität

Die gespeicherte Energie ( $E_{Sp}$ ) eines sensiblen Speichers berechnet sich aus der gespeicherten (Wasser-)Masse  $m_{H_2O}$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_{H_2O}$  des Speichermediums sowie dem Temperaturunterschied  $\Delta T$ . Äquivalent zur Masse ist das Produkt aus Volumen  $V_{H_2O}$  und Dichte  $\rho_{H_2O}$ . Das gespeicherte Volumen wiederum berechnet sich bei zylinderförmigen Speichern aus dem Zylinderquerschnitt mal der Speicherhöhe:

$$E_{Sp} = m_{H_2O} \times c_{H_2O} \times \Delta T = V_{H_2O} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times \Delta T = A_{Sp} \times h_{Sp} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times \Delta T \quad (4.3)$$

Während Masse, Wärmekapazität, Volumen und Dichte eindeutig definiert sind, gibt es für die Temperaturdifferenz keine solche Festlegung. Kurscheid [KUR 09] setzt für die Bereitstellung positiver Minutenreserven Klein-KWK-Anlagen mit Speicher ein. In seiner Arbeit hat ein 2.000 Liter-Speicher eine thermische Kapazität von 116 kWh, woraus sich rechnerisch eine (konstante) Temperaturdifferenz von 50 °C ergibt. Pielke [PIE 10] verwendet in seiner Dissertation eine Vorlauftemperatur von 83 °C und eine Rücklauftemperatur von 50 °C ( $\Delta T = 33$  °C). Groß [GROß 12] wiederum betrachtet die Einbindung von thermischen Speichern in Fernwärmenetzen und rechnet dabei mit einem Temperaturunterschied von 55 °C. An diesen Beispielen wird deutlich, dass für verschiedene Anwendungen unterschiedliche Temperaturdifferenzen vorauszusetzen sind. Koros [KOR 12] beispielsweise dimensioniert in seiner Semesterarbeit wie auch Groß thermische Speicher für ein Fernwärmenetz, zieht allerdings reale Messdaten heran und kann damit zeigen, dass die Grädigkeit (Differenz aus Vorlauf- und Rücklauftemperatur) in den wärmeren Monaten deutlich kleiner ist als im Winter. Während Kurscheid, Pielke und Groß also die Grundannahme einer über das Jahr konstanten Speicherkapazität teilen, verweist die Untersuchung von Koros darauf, dass keine konstante Temperaturdifferenz anzunehmen ist.

Insbesondere für kleine Speicher hat dies zur Folge, dass zuerst die Frage nach der Wärmeanforderung geklärt werden muss, ist es doch die Aufgabe eines Speichers die Wärmenachfrage jederzeit decken zu können. Im Wohngebäudebereich besteht diese nicht nur aus einer thermischen Leistung, sondern auch aus einer Mindesttemperatur  $T_{Sp,min}$ , welche zwangsläufig mit dem Einsatzzweck zusammenhängt. In Kap. 4.1.2 wurde für diese Arbeit eine Warmwassermindstemperatur von 42 °C angenommen. In anderen Einsatzgebieten, beispielsweise im Gewerbe, müsste die Warmwassertemperatur hingegen deutlich höher gewählt werden. Im Heizbetrieb ist die Mindesttemperatur durch die Heizkreisvorlauftemperatur  $T_{HK,VL}$  bestimmt und folglich saisonal schwankend.

Neben dem Verwendungszweck ist auch die hydraulische Verschaltung für die Mindestspeichertemperatur entscheidend. Bei der indirekten Warmwasserspeicherbeladung muss die Speichertemperatur größer als die Warmwasserspeichersolltemperatur sein, während bei Frischwasserladestationen oder Kombispeichern die Temperatur nur marginal größer sein muss als die benötigte Zapftemperatur. Bei diesen Speicherarten ist die Mindesttemperatur im Jahresverlauf nicht konstant. Im Winter dominiert im Regelfall die Heizkreissolltemperatur und im Sommer das

Warmwassersystem. Um die thermische Nachfrage bedienen zu können, muss die Temperatur im Speicher sowohl die benötigte Warmwassertemperatur als auch die Heizkreisvorlauftemperatur übertreffen:

$$T_{Sp,min} > T_{Zst} \text{ bzw. } T_{WWSp,soll} \wedge T_{Sp,min} > T_{HK,VL} \quad (4.4)$$

Temperaturschichten im Speicher unter der Mindesttemperatur können die Nachfrage nicht decken. Für den nutzbaren Speicherinhalt kann demzufolge nur der Anteil im Speicher herangezogen werden, dessen Temperatur größer als die Mindesttemperatur ist.

Mit Hilfe der zehn installierten Temperaturfühler kann der Temperaturverlauf innerhalb des Speichers bestimmt werden. In den oben dargestellten Messungen wurde ersichtlich, dass die jeweiligen Temperaturverläufe kein eindeutiges Schema aufweisen. Deshalb wird der Verlauf durch lineare Interpolation angenähert. Der Speicherenergieinhalt berechnet sich aus den Temperaturschichten, die wärmer als die Mindesttemperatur sind, und deren Temperaturdifferenz zu  $T_{Sp,min}$  (vgl. hierzu auch [WEH 12]):

$$E_{Sp,Inhalt} = A_{Sp} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times \int_0^{H_{Sp}} (T_{Sp}(h) - T_{Sp,min}) dh \quad \text{für } T_{Sp}(h) \geq T_{Sp,min} \quad (4.5)$$

$$E_{Sp,42^\circ C} = A_{Sp} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times \int_0^{H_{Sp}} (T_{Sp}(h) - 42^\circ C) dh \quad \text{für } T_{Sp}(h) \geq 42^\circ C \quad (4.6)$$

Die Speicherkapazität ist die Energie, die der thermische Speicher maximal aufnehmen bzw. abgeben kann. Sie entspricht also der Differenz aus maximalem und minimalem Speicherinhalt:

$$E_{Sp,Kap} = E_{Sp,Inhalt,max} - E_{Sp,Inhalt,min} \quad (4.7)$$

Die zur Berechnung der Speicherkapazität notwendige maximale Speichertemperatur  $T_{Sp,max}$  wird durch das KWK-System begrenzt. Je nach Technologie (vgl. Kap. 2.2) variiert die maximale Vorlauf- und folglich die maximale Speichertemperatur. Der minimale Speicherinhalt korreliert mit der Mindestspeichertemperatur. Die Speicherkapazität eines thermischen Speichers ist demzufolge nicht nur eine Funktion des Speichermediums und des Volumens, sondern insbesondere auch des BHKW-Typs, des Einsatzzwecks und der Außentemperatur.

Setzt man die Temperaturen aus Tabelle 4-2 in Gleichung (4.6) ein, dann lässt sich der theoretisch minimale Speicherinhalt  $E_{Sp,Inhalt,min,theo}$  mit 1,0 kWh bestimmen. Für die obere Speichergrenze werden die Temperaturen aus Tabelle 4-1 herangezogen. Der theoretisch maximale Speicherinhalt ( $E_{Sp,Inhalt,max,theo}$ ) erreicht demzufolge 26,4 kWh. Um eine BHKW-Überhitzung bzw. Fehlermeldungen zu vermeiden, wird der maximale Speicherinhalt  $E_{Sp,Inhalt,max}$  auf 25 kWh begrenzt.

### 4.3 Speicherinhalt während verschiedener Betriebszustände

Für die folgenden Speicherbetrachtungen wird zwischen dem nutzbaren Speicherinhalt ( $E_{Sp,42^\circ C}$ ), der eine Mindesttemperatur von  $42^\circ C$  voraussetzt, und einem Speicherinhalt mit Basis  $20^\circ C$  ( $E_{Sp,20^\circ C}$ ) unterschieden, der für Speicherbetrachtungen hinsichtlich Lade- und Entladevorgänge oder im Hinblick auf Speicherverluste verwendet werden kann.

$$E_{Sp,20^\circ C} = A_{Sp} \times \rho_{H_2O} \times c_{H_2O} \times \int_0^{H_{Sp}} (T_{Sp}(h) - 20^\circ C) dh \quad \text{für } T_{Sp}(h) \geq 20^\circ C \quad (4.8)$$

Will man den Speicherinhalt dafür heranziehen, um die aktuelle Leistung am Speicher zu bestimmen, muss die Speicherinhaltsänderung, sprich die zeitliche Ableitung, der Lade- bzw. Entladeleistung (inklusive der Speicherverluste) entsprechen:

$$\dot{E}_{Sp,Inhalt} = \frac{d E_{Sp}}{d t} \stackrel{!}{=} \dot{Q}_{BHKW,Sp} - (\dot{Q}_{HK} + \dot{Q}_{WW} + \dot{Q}_{ZK} + \dot{Q}_{Sp,V}) \quad (4.9)$$

#### BHKW-Ladung

Abbildung 4-11 zeigt die beiden Speicherinhalte  $E_{Sp,42^\circ C}$  (blaue Kurve) und  $E_{Sp,20^\circ C}$  (hellblaue Kurve), deren zeitliche Ableitung<sup>36</sup> (dunkelgrüne bzw. hellgrüne Kurve) und die am Speicher ankommende BHKW-Leistung (rote Kurve) des Ladevorgangs aus Abbildung 4-3.

Zu Beginn sind die Temperaturen im Speicher knapp über  $20^\circ C$ , weshalb  $E_{Sp,42^\circ C}$  und die Ableitung null sind. Dass die Energiebilanz trotzdem stimmt, zeigt die hellblaue bzw. die hellgrüne Kurve. Der Speicherinhalt<sub>20°C</sub> steigt kontinuierlich an und dessen Ableitung entspricht nahezu der vom Speicher aufgenommenen thermischen BHKW-Leistung. Nur ganz am Anfang der Messung tritt eine kleine zeitliche Verzögerung auf, da das warme Wasser erst an den Speicherrand diffundieren und die an der Außenwand liegenden Temperaturfühler erreichen muss. Erst nach über zwei Stunden befindet sich der Speicher in dem in der Praxis relevanten Bereich über  $40^\circ C$ , worauf  $E_{Sp,42^\circ C}$  ansteigt und sich die Ableitung der BHKW-Leistung annähert. Nach ca. drei Stunden sind alle Speichertemperaturen größer  $42^\circ C$ , was zur Folge hat, dass die hellgrüne auf der dunkelgrünen Kurve liegt. Erst gegen Ende der Messung, also bei sehr hohen Temperaturen, ist ein Unterschied der beiden Kurven zur thermischen BHKW-Leistung zu erkennen. Infolge der höheren Speicherverluste ist die Zunahme der Speicherenergie geringer als die vom BHKW zur Verfügung gestellte Energie.

<sup>36</sup> Die Kurve wurde geglättet. Auch bei Abbildung 4-12 und Abbildung 4-14 wurde die Ableitung des Speicherinhalts geglättet. Die jeweilige Glättungsbreite variiert zwischen 12 und 25.

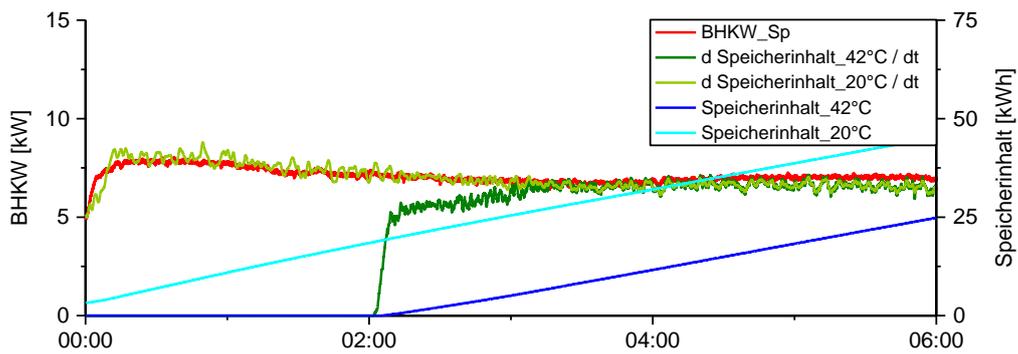


Abbildung 4-11: Vergleich der Speicherinhaltsänderung und der BHKW Leistung

### Entladung Warmwasser

Bei kontinuierlicher Zapfung (Daten vgl. Abbildung 4-4) entspricht die Ableitung des Speicherinhalts (Abbildung 4-12, dunkelgrün) nicht der Zapfleistung. Die Speicheränderung tritt anfangs zeitlich verzögert auf und bleibt dann kontinuierlich unterhalb der am Speicher gemessenen Zapfleistung (braune Kurve).

Da wegen des einströmenden Kaltwassers ( $T_{KW} \approx 12^\circ\text{C}$ ) die Temperaturen im unteren Teil des Speichers kleiner  $42^\circ\text{C}$  sind, kann die Energiebilanzierung nach Gleichung (4.6) nicht mehr stimmen. Dass die dem Speicher entnommene Wärme der Zapfleistung entspricht, verdeutlicht die hellgrüne Kurve. Da die Temperaturänderung zeitlich verzögert am Speicherrand ankommt, steigt bei Entladung die Kurve zeitverzögert an und liegt im Anschluss stets über der gemessenen Zapfleistung. Am Ende der Messreihe fällt die gemessene Zapfleistung schlagartig auf null, während der Speicherinhalt $_{20^\circ\text{C}}$  aufgrund der Zeitverzögerung und der Ausgleichseffekte im Speicher langsam sinkt.

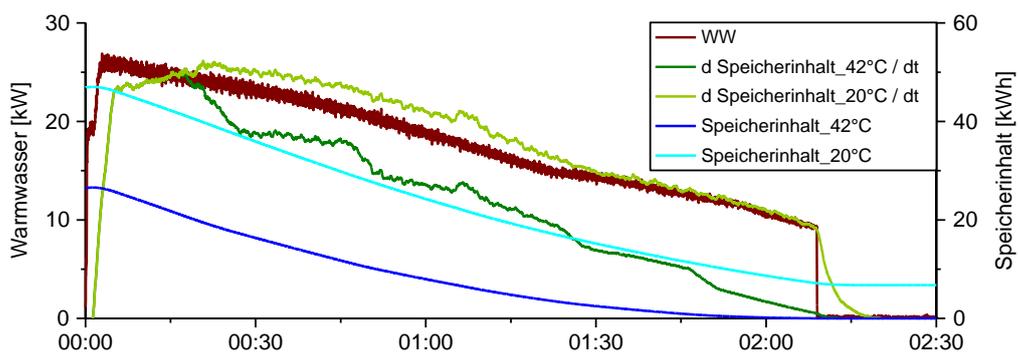


Abbildung 4-12: Vergleich der Speicherinhaltsänderung und der Zapfleistung

Betrachtet man praxisrelevante und damit kurze Zapfungen, wird in der Regel der Bereich, in dem der größte Teil des Speichers kälter als  $42^\circ\text{C}$  ist, nicht erreicht. Abbildung 4-12 bildet einen Zapfvorgang (entnommene Zapfenergie: 1,5 kWh) ab, wie er an den Typtagen zweimal vorkommt. Im linken Beispiel ist der Speicher anfangs „relativ voll“ ( $E_{Sp} \approx 20\text{ kWh}$ ), im rechten Diagramm „relativ leer“ ( $E_{Sp} \approx 10\text{ kWh}$ ). Ähnlich wie im oben gezeigten Beispiel steigt die Ableitung des Speicherinhalts in beiden Fällen zeitlich

verzögert und fällt nach Zapfende ab. Im linken Diagramm, also beim volleren Speicher, erreicht die berechnete Warmwasserkurve den gemessenen Wert, während im rechten Bild die gemessene Zapfleistung nicht erreicht wird.

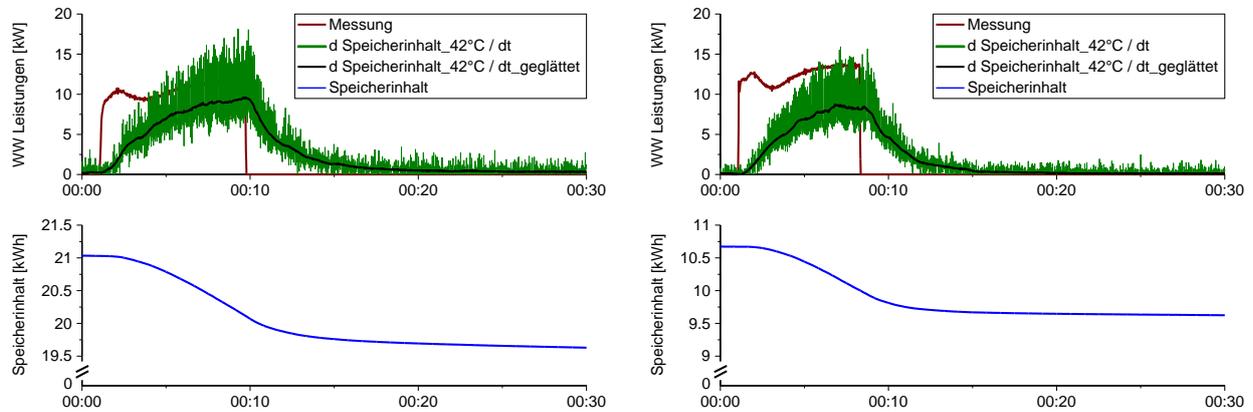


Abbildung 4-13: Speicherinhalt und WW-Leistungen während und anschließend eines Zapfvorgangs

Subtrahiert man die jeweiligen Speicherinhalte nach den Ausgleichseffekten ( $t = 30 \text{ min}$ ) von den Inhalten zu Beginn ( $t = 0 \text{ min}$ ), dann wird ersichtlich, dass die Speicherinhaltsänderung bei vollem Speicher sehr viel näher (1,41 kWh) an der gemessenen Zapfenergie (1,50 kWh) ist als im Fall des leereren Speichers (1,05 kWh). Grund hierfür sind die hohen Speichertemperaturen im ersten Beispiel, welche nach dem Einströmen des Kaltwassers nur knapp unter  $42 \text{ °C}$  fallen. Im zweiten Fall ist der Speicher, insbesondere im unteren Teil, nur knapp über  $42 \text{ °C}$ , weshalb dieser Bereich stärker auskühlt und von der Speicherenergiebilanzierung „falsch“ bewertet wird.

Tabelle 4-4: Kumulierte Zapfenergie gemessen und berechnet

	Speicherinhalt 20 kWh		Speicherinhalt 10 kWh	
	Messung	$E_{Sp}(0) - E_{Sp}(1800)$	Messung	$E_{Sp}(0) - E_{Sp}(1800)$
kumulierte Zapfenergie [kWh]	1,51	1,41	1,50	1,05

### Entladung Heizkreis

Für die Heizkreisentladung (Daten aus Abbildung 4-6) gilt ähnliches wie beim Zapfversuch. Da das Rücklaufwasser ( $37 \text{ °C}$ ) kälter als die Mindesttemperatur ist, liegt die berechnete Speicherinhaltsänderung unter der vom Speicher abgegebenen Leistung. Des Weiteren ist auch für die Entladung über den Heizkreis eine zeitliche Verzögerung festzustellen. Die hellgrüne Kurve liegt dauerhaft über der Entladeleistung, welche neben dem Heizkreisverbrauch auch die äußeren und inneren Verluste umfasst. Letztere treten bei Heizkreisentladungen aufgrund des Wasseraustausches besonders deutlich zutage.

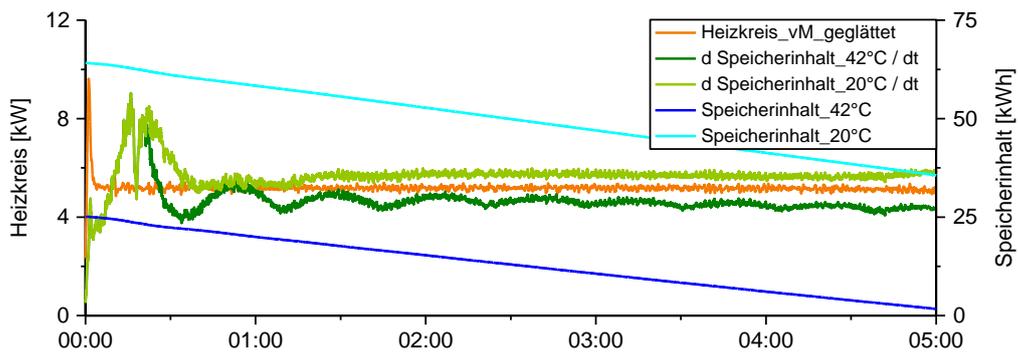


Abbildung 4-14: Vergleich der Speicherinhaltsänderung und der Heizkreisleistung

### Speicherverluste

Nimmt man die Daten aus der Speicherabkühlkurve (Abbildung 4-8), berechnet die realen Speicherverluste (Basis: 20 °C) aus den jeweiligen Speicherinhalten und trägt diese über dem Speicherenergieinhalt<sub>42°C</sub> auf, ergibt sich über weite Strecken eine lineare Abhängigkeit zwischen den Speicherverlusten und dem Speicherenergieinhalt (Abbildung 4-15). Da die äußeren Verluste proportional zur Differenz von Speicher- und Umgebungstemperatur sind, war dies nicht anders zu erwarten. Am Beginn der Messung gibt es Ausgleichseffekte (innere Verluste), die bei hohen Energieinhalten zu höheren Speicherverlusten führen. Wegen der Darstellungsart (x-Achse nach Gleichung(4.6)) betragen die Speicherverluste bei einem Energieinhalt von 0 kWh bis zu 0,8 kWh.

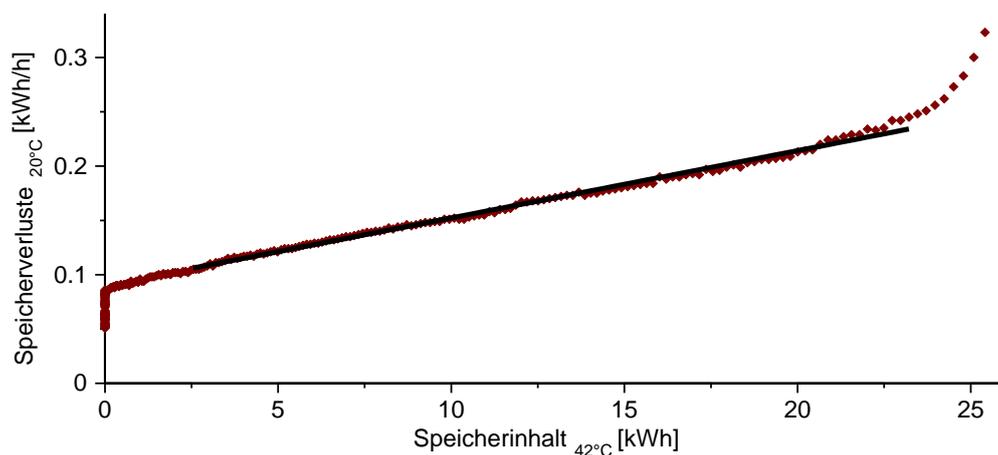


Abbildung 4-15: Speicherverluste in Abhängigkeit des Energieinhalts

Linearisiert man die Speicherverluste im relevanten (vgl. Kapitel 5.3) Bereich zwischen 2,5 und 23 kWh in Abhängigkeit von  $E_{Sp,42°C}$ , ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\dot{E}_{Sp,V,20^{\circ}C} = 0,0065 * \frac{E_{Sp,42^{\circ}C}}{1 h} + 0,088 \frac{kWh}{h} \quad (4.10)$$

Für einen durchschnittlichen Speicherinhalt von 8 kWh ergibt sich nach Formel (4.10) innerhalb eines Tages ein Verlust von 3,4 kWh, also 60 % mehr als im Datenblatt angegeben (2,1 kWh/24h; [SAN 11-a]) ist. Die „realen“ Speicherverluste (mit Basis 20 °C) zeigt Abbildung A-7 im Anhang. Es kann festgestellt werden, dass die Verluste im gesamten Bereich linear abfallen und die Ausgleichsgerade (fast) den Nullpunkt erreicht (vgl. Formel (A.1)).

#### 4.4 Speicheranalyse im Feldtest

Lipp und Sängler haben den Speicherinhalt zu Beginn und am Ende aller im Jahr 2012 auftretenden BHKW-Zyklen im Feldtest Miesbach analysiert [LIPP 13-b] und festgestellt, dass der Speicherinhalt nur in einem Prozent aller Fälle um mehr als 10 kWh gestiegen ist. In mehr als 50 % der BHKW-Zyklen stieg der Speicherinhalt sogar um weniger als drei Kilowattstunden. In einigen (seltenen) Fällen war der Speicherinhalt am Ende des Zyklus sogar kleiner als zu Beginn. Diese geringen Energiezunahmen lassen sich durch kurze BHKW-Laufzeiten (vgl. Abbildung 3-8) und die Speichersolltemperaturregelung erklären.

Eine weiterführende Speicheranalyse des Miesbach-Feldtests illustriert Abbildung 4-16. Mit Hilfe von Gleichung (4.5) wurde der minimale und maximale Tagesspeicherinhalt für das Jahr 2012 berechnet. Die ermittelten Werte wurden anschließend in fünf Temperaturzonen analog zu den in dieser Arbeit verwendeten Typtagen geclustert und in sogenannte Boxplots<sup>37</sup> aufgetragen. Es zeigt sich, dass der minimale Speicherinhalt im Falle der drei wärmeren Typtage im Durchschnitt leicht abfällt und erst bei mittleren Außentemperaturen um 5 °C ansteigt. Nahezu den gleichen Verlauf weisen die maximalen Speicherinhalte auf. Die Differenz aus Speicherinhaltsmaximum und -minimum ist demzufolge für den gesamten Temperaturbereich sehr ähnlich (ca. 7 kWh). Nur an den sehr kalten Tagen ist die Differenz mit 8,6 kWh etwas größer. Weiterhin ist ersichtlich, dass der Speicher, insbesondere in den Sommermonaten und in der Übergangszeit, oft sehr leer ist. Dies lässt sich auf die extreme Nachtabenkung (Komfortwert 14 °C, WW-Sollwert: 40 °C) zurückführen, welche das BHKW nachts im Regelfall stillstehen lässt (siehe Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9). Da der BHKW-Betreiber nicht über Komforteinbußen klagt, kann geschlussfolgert werden, dass der Speicher hinsichtlich des minimalen Energieinhalts sehr gut eingesetzt wird. Strebt man jedoch lange BHKW-Laufzeiten und eine hohe BHKW-Flexibilität an, sollte auch die Annäherung an die obere Speichergrenze immer wieder veranlasst werden. Dies ist bislang jedoch äußerst selten der Fall. Ein maximaler Speicherinhalt über 15 kWh wird im Grunde nur an Tagen kälter 2,5 °C erreicht. Speicherinhalte größer 20 kWh kamen in Miesbach nur im äußerst kalten Februar 2012 (siehe Kapitel 3.1.1) vor.

<sup>37</sup> Soweit nicht anders gekennzeichnet zeigen die in dieser Arbeit verwendeten Boxplots den Median, die jeweiligen Quartile sowie den Minimal- und Maximalwert.

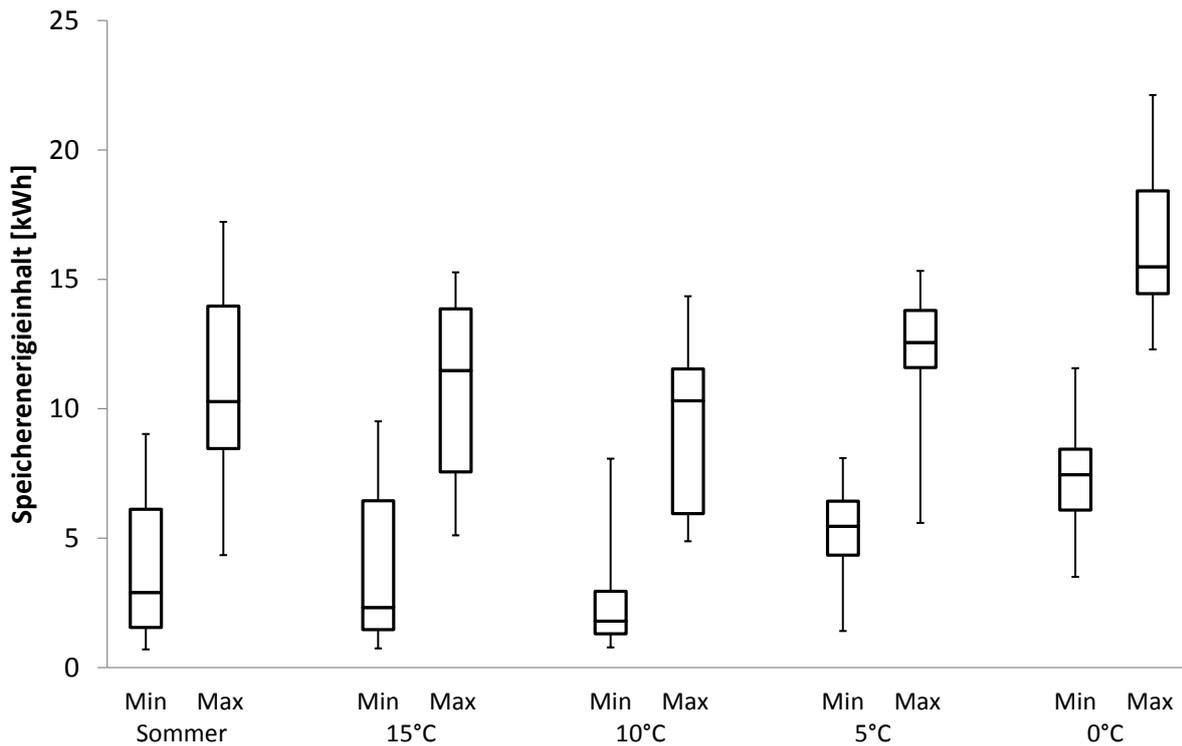


Abbildung 4-16: Tagesminima und -maxima des Speicherenergieinhalts, Miesbach

Abbildung 4-17 zeigt die fünf aufgenommenen Speichertemperaturen (oben), den daraus berechneten Speicherinhalt (mittleres Diagramm) sowie die Speicherbe- und Speicherentladeleistungen (unten) vom 11.11.2012 des Miesbach-Feldtests (vgl. Abbildung 3-6 und Abbildung 3-8). Dieser Tag steht exemplarisch für viele Übergangstage, an denen das Viessmann BHKW sehr oft taktet. An diesem Tag startet das BHKW insgesamt neun Mal bei einer mittleren Laufzeit von 42 Minuten. Nur der erste und letzte Zyklus sind länger als eine Stunde. Der Grund für die kurzen BHKW-Laufzeiten lässt sich an den Speichertemperaturen ablesen: Die im Heizbetrieb für die Viessmann BHKW-Regelung entscheidenden Temperaturen ( $T_{Sp,mittle}$  und  $T_{Sp,unten}$ ) steigen stark, wenn das BHKW läuft, bzw. fallen deutlich, wenn es stillsteht. Die für den BHKW-Start verantwortliche Temperatur  $T_{Sp,unten}$  sinkt wegen des kalten Heizkreisrücklaufwassers schnell unter den Sollwert und veranlasst den BHKW-Start. Nach dem Start steigt  $T_{Sp,mittle}$  über den Sollwert und stoppt das BHKW.

Die restlichen Temperaturbereiche im Speicher ( $T_{KS,1}$ ,  $T_{Sp,oben}$  und  $T_{KS,5}$ ) variieren dagegen kaum. Die kurzen Laufzeiten lassen den Speicherinhalt kaum ansteigen. Trotz acht Zyklen schwankt der Speicherinhalt bis 19.30 Uhr zwischen vier und knapp sieben Kilowattstunden. Erst der letzte Zyklus besitzt eine annehmbare Dauer von fast zwei Stunden und das, obwohl der Heizkreis am Ende des Zyklus nicht mehr versorgt wird. Der Grund dafür ist, dass die obere Speichertemperatur, die für die Einhaltung des Warmwassersollwerts zuständig ist, unter den Sollwert fällt und demzufolge die Regelung von Heizbetrieb auf Warmwasserbetrieb umschaltet. In diesem Zustand wird der Speicher vollständig geladen. Das BHKW stoppt nachdem der untere Speicherfühler eine Temperatur größer 53 °C anzeigt und der Speicherinhalt auf über 11 kWh angestiegen ist.

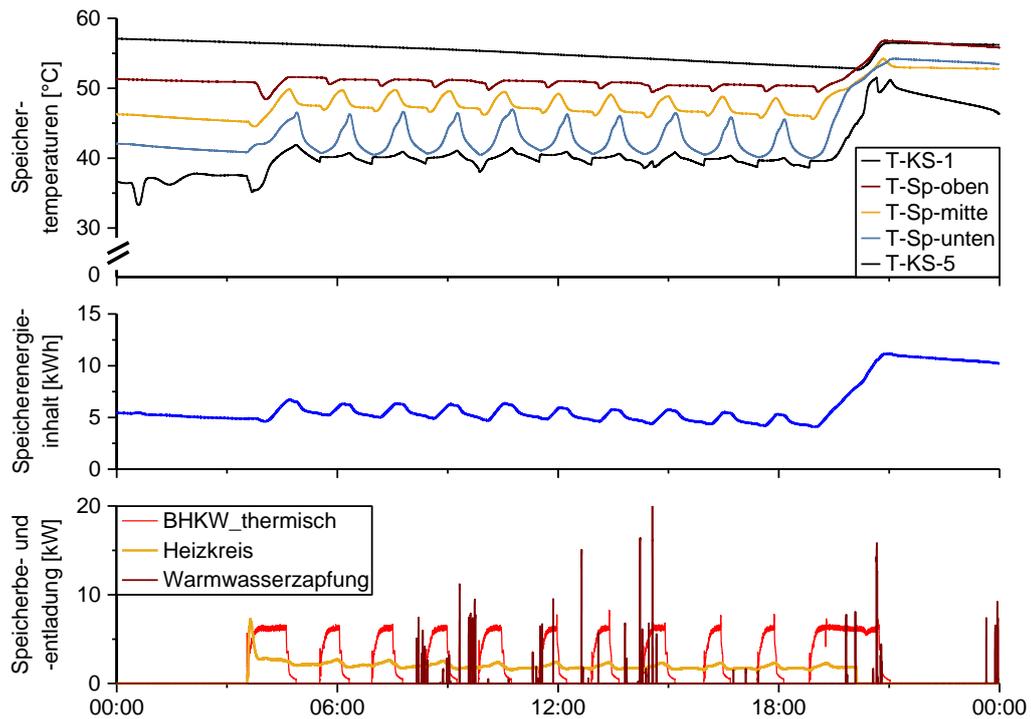


Abbildung 4-17: Speichertemperaturen, -inhalt sowie Speicherbeladung und -entladung in Miesbach am 11.11.2012

#### 4.5 Speicheranalyse an den Typtagen

Berechnet man zu den in Kapitel 3.4 durchgeführten Typtagmessungen die jeweiligen Speicherinhalte, lassen sich die nachfolgenden Diagramme anfertigen. Am Sommertypstag (Abbildung 4-18) ist der Speicherinhalt anfangs ca. 5 kWh. Obwohl dem Speicher keine Energie entnommen wird, sinkt der Speicherinhalt auf ca. 4 kWh um 5.00 Uhr wenn die Warmwassersollwertänderung auftritt. In den über zwei Stunden Laufzeit steigt der Inhalt auf 15,6 kWh. Im Laufe des Tages sinkt durch die Zapfungen und die Zirkulations- und Speicherverluste der Speicherinhalt auf ca. 5 kWh, entspricht also exakt dem Wert zu Beginn des Tages. Daraus kann geschlossen werden, dass sich das BHKW-Verhalten für aufeinanderfolgende Sommertypstage nicht ändert.

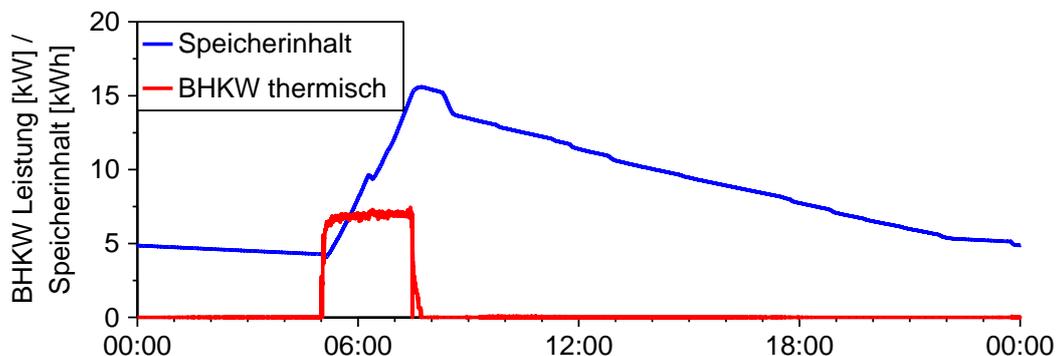


Abbildung 4-18: Speicherinhalt Sommertypstag

Am Typtag 15 °C (Abbildung 4-19) dauert es drei Tage, bis der „Ausgangszustand“ wieder erreicht wird. Am ersten Messtag (Typtag 15 °C-a) ist der Speicher zu Beginn des Tages mit 8 kWh gefüllt. Bis zum Ende des ersten BHKW-Zyklus ist Typtag 15 °C-a dem Sommertypstag sehr ähnlich. Durch die höhere Nachfrage sinkt der Speicherinhalt gegen 19.00 Uhr auf 4 kWh, woraufhin das BHKW ein zweites Mal startet. In der Folge ist der Speicher am Ende des ersten bzw. zu Beginn des zweiten Tages gut gefüllt. Die beiden Zyklen verschieben sich an Typtag 15 °C-b nach hinten. Zu Beginn des dritten Messtages liegt der Speicherinhalt bei knapp 16 kWh, was dazu führt, dass das BHKW nur einmal startet und der Speicherinhalt am Ende des Tages in etwa dem zu Beginn von Typtag 15 °C-a entspricht.

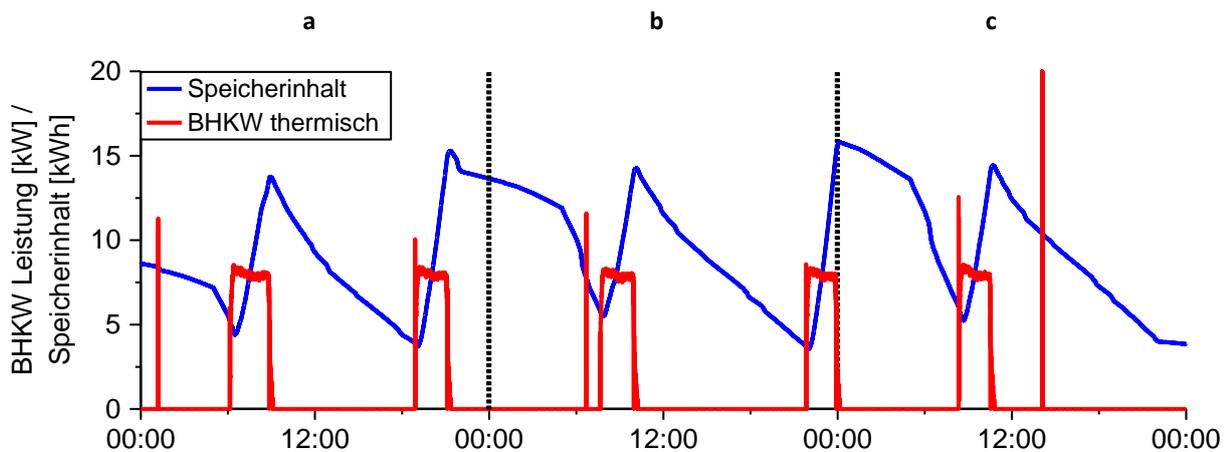


Abbildung 4-19: Speicherinhalt Typtag 15 °C

Am Typtag 10 °C-a ist der Speicherinhalt am Ende (15,3 kWh) deutlich über dem Startwert (8,3 kWh). Demzufolge startet das BHKW an Typtag 10 °C-b später und nur zweimal. Der maximal auftretende Speicherinhalt ist mit knapp 16 kWh ähnlich hoch wie an den beide Typtagen zuvor (Abbildung 4-20).

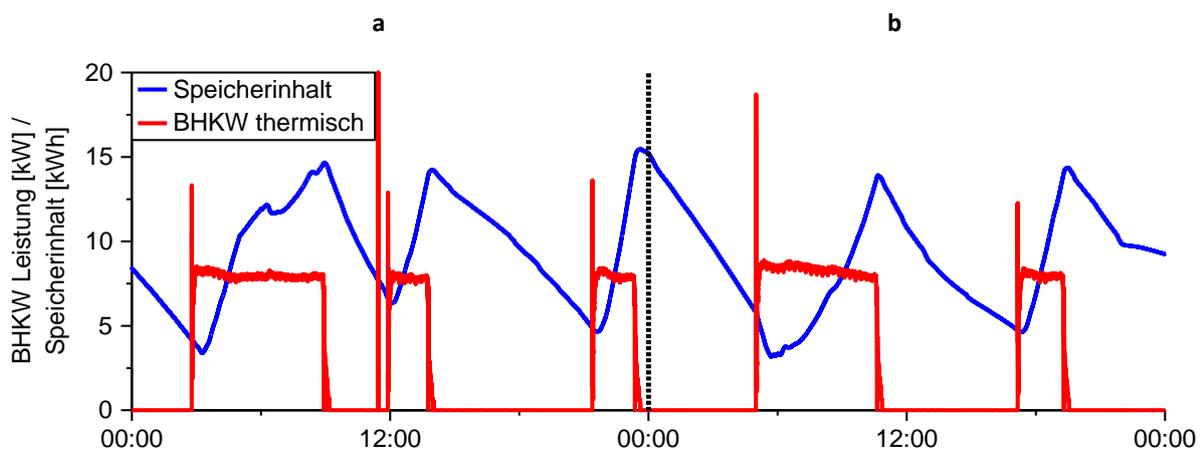


Abbildung 4-20: Speicherinhalt Typtag 10 °C

Am Typtag 5 °C bestimmt der anfängliche Speicherinhalt darüber, ob das BHKW zwei oder drei Zyklen aufweist. Ist der Speicherinhalt morgens gering (Abbildung 4-21, Typtag 5 °C-a) startet das BHKW in

diesem Beispiel um 1.35 Uhr und läuft dann bis zum Vormittag insgesamt fast neun Stunden bis der Speicherinhalt knapp 15 kWh erreicht. Nach einer zweistündigen Pause und dem Abfallen des Füllstands auf ca. 6 kWh startet das BHKW ein zweites Mal. Da die Wärmenachfrage zur Mittagszeit gering ist, läuft das BHKW im zweiten Zyklus nur bis 16.30 Uhr, was einen dritten Zyklus notwendig macht. Aufgrund des BHKW-Stopps während der Nachtabsenkung befinden sich um Mitternacht noch 12 kWh im Speicher, was dazu führt, dass das BHKW an Typtag 5 °C erst um 4.00 Uhr startet und folglich erst am frühen Nachmittag stoppt. Infolgedessen kommt es am Typtag 5 °C nur zu zwei Zyklen und einem leeren Speicher am Ende des Tages. An beiden Messtagen weist der Speicherinhalt zu keinem Zeitpunkt mehr als 15 kWh auf.

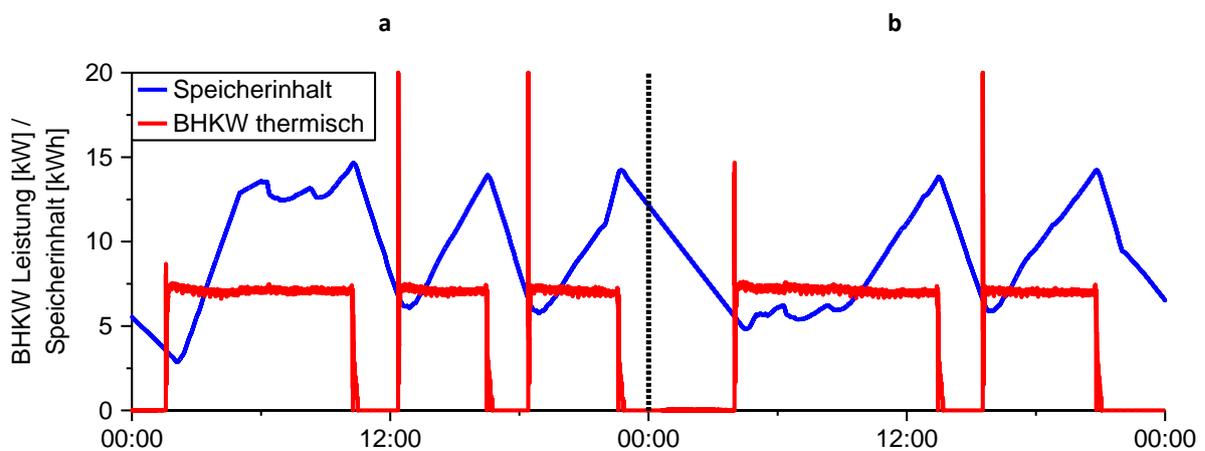


Abbildung 4-21: Speicherinhalt Typtag 5 °C

Am Typtag 0 °C (Abbildung 4-22) ist der Heizkreisverbrauch so groß, dass das BHKW nur einmal startet. Durch die Nachtabsenkung schaltet sich das BHKW nach 22.00 Uhr ab und startet am folgenden Tag, wenn der Sollwert unterschritten wird. Sinken die Temperaturen im Speicher weiter ab bzw. fällt der Speicherinhalt unter 3 kWh, wird das ZHG zugeschaltet. Wegen des hohen Verbrauchs ist der durchschnittliche Speicherinhalt am Typtag 0 °C sehr gering. Erst während der Nachtabsenkung steigt der Inhalt auf knapp 15 kWh, was jedoch zum sofortigen Abschalten des BHKW führt.

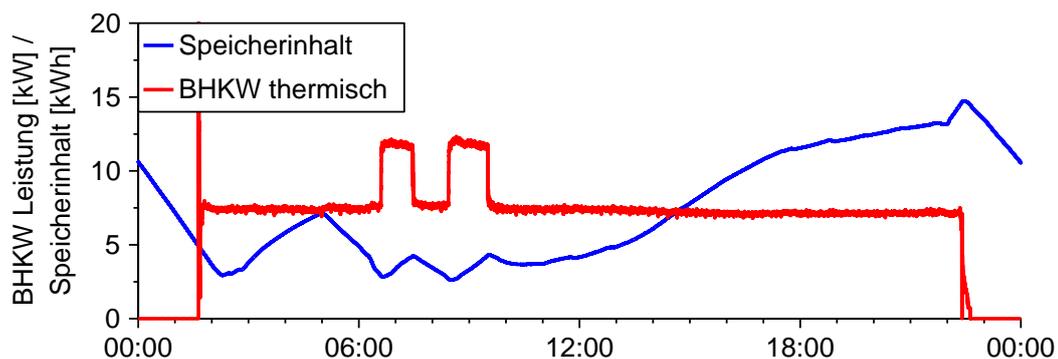


Abbildung 4-22: Speicherinhalt Typtag 0 °C

Wie in Kapitel 3.4 gezeigt, wird der Heizkreis trotz des Zuschaltens des ZHG nicht mit ausreichend hoher Temperatur versorgt. Dementsprechend ist am Typtag 0 °C eine Mindestenergie im Speicher von deutlich größer 3 kWh erforderlich, um die thermische Behaglichkeit sicherzustellen.

Die Speicherinhaltsextrema in Tabelle 4-5 spiegeln die BHKW-Regelung wider. Die Speicherminima liegen für alle Typtage zwischen 2,63 und 4,04 kWh. Da erst bei Temperaturen unter -3,75 °C (siehe Kapitel 3.2.6) der Sollwert von der Außentemperatur dominiert wird, ist dies nicht überraschend. Hinzu kommt, dass bei den Typtagen 5 °C und 0 °C der Verbrauch am Morgen größer als die BHKW-Leistung ist, was dazu führt, dass die minimalen Speicherinhalte ausgerechnet an den kältesten Tagen auftreten. Die größten Speichermaxima weisen dagegen die wärmsten Tage auf. Die Erklärung hierfür ist, dass die Ausschaltbedingung für alle Typtage gleich ist und dass an den warmen Tagen nach dem Ausschalten kein Wärmeverbrauch auftritt, womit der Speicherinhalt aufgrund des BHKW-Nachlaufs weiter ansteigen kann.

Die maximale Speicherausnutzung ( $\Delta E_{Sp,max}$ ) liegt, mit Ausnahme des Typtag 5 °C-b, im Bereich von 12 kWh. Sie ist damit erstens deutlich größer als die im Feldtest gemessene Speicherausnutzung. Zweitens entspricht 12 kWh genau der Hälfte der in Kapitel 4.2 gefundenen Maximalkapazität und drittens ist sie jahreszeitenunabhängig. Die Speicherinhaltsänderung während der BHKW-Betriebszeit ( $\Delta E_{Sp,Ladung}$ ) gibt an, um wie viel sich der Speicher während eines BHKW-Zyklus füllt. Im Gegensatz zu den in [LIPP 13-b] beschriebenen und in Kapitel 4.4 erläuterten Speicheraufladungen läuft das BHKW an den Typtagen immer relativ lange und lädt den Speicher um mindestens 6,88 kWh (Typtag 10 °C-a, 2. Zyklus). Im Mittel aller gemessenen Typtage erfolgt das BHKW-Stoppssignal nach einem Speicherenergieinhaltsplus von 8,86 kWh.

Der im Tagesverlauf gemittelte Speicherinhalt ( $E_{Sp,mittel}$ ) steigt im Gegensatz zum Feldtestergebnis nicht mit fallender Außentemperatur. Der kleinste mittlere Speicherinhalt tritt sogar am kältesten Typtag auf.

**Tabelle 4-5: Speicherinhaltsanalyse bei den verschiedenen Typtagmessungen**

Typtag	Sommer	15 °C			10 °C		5 °C		0 °C
Nr.	-	a	b	c	a	b	a	b	-
$E_{Sp,min}$ [kWh]	4,04	3,69	3,54	3,85	3,39	3,17	2,87	4,83	2,63
$E_{Sp,max}$ [kWh]	15,60	15,30	15,63	15,80	15,47	15,23	14,67	14,23	14,74
$\Delta E_{Sp,max}$ [kWh]	11,56	11,61	12,09	11,95	12,08	12,06	11,80	9,30	12,11
$\Delta E_{Sp,Ladung,mittel}$ [kWh]	10,50	9,33	9,39	7,62	8,93	8,32	7,81	8,34	9,48
$E_{Sp,mittel}$ [kWh]	8,29	8,69	9,45	9,77	9,56	8,94	9,84	8,83	7,51

## 5. Eingangsparmeter für die flexible Stromerzeugung

Grundvoraussetzung für eine flexible Stromerzeugung ist, dass möglichst viele Informationen für die Fahrplanerstellung zur Verfügung stehen und auch genutzt werden. Dazu zählen die im obigen Kapitel beschriebenen Speicherinformationen, mit Hilfe derer die jeweiligen Speicherkapazitäten bestimmt werden (Kap. 5.3), aber auch eine möglichst genaue Wärmebedarfsprognose (Kap. 5.2). Mit diesen Informationen und den stündlichen Börsenstrompreisen des Folgetags (Kap. 5.1) kann eine Optimierungsfunktion kostenoptimale Einsatzpläne erstellen.

Abbildung 5-1 zeigt den bereits aus Kapitel 1.4 bekannten schematischen Ablaufplan eines flexiblen Mikro-BHKW und veranschaulicht, dass im Folgenden die Eingangsparmeter näher bestimmt werden.

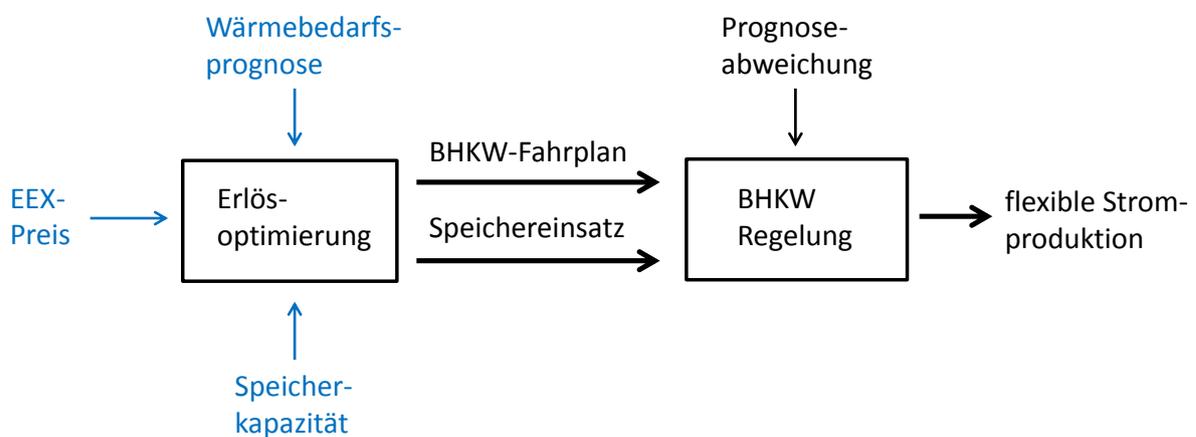


Abbildung 5-1: Ablaufdiagramm des Prozesses hin zur flexiblen Stromproduktion mit Fokus auf EEX-Preis, Wärmebedarfsprognose und Speicherkapazität

### 5.1 Börsenstrompreis

Aufgrund der wirtschaftlichen Situation (vgl. Kapitel 2.3.3) ist es aus Sicht des BHKW-Betreibers optimal, den Strom genau dann zu produzieren, wenn der Gebäudestromverbrauch besonders hoch ist. Daneben können manche Gewerbetreibende ihren Leistungspreis reduzieren, indem sie ihr BHKW zu Höchstlastzeiten betreiben. Der Anlagenbetreiber hat in beiden Fällen kein Interesse an einem volkswirtschaftlich optimalen Einsatz seiner KWK-Anlage.

Sollte in Zukunft die KWK insgesamt stark ausgebaut werden, muss die KWK-Stromerzeugung jedoch weg von der Betreiberoptimierung hin zu einem volkswirtschaftlichen Optimum. Dafür könnte zum einen die Stromerzeugung aus KWK-Anlagen den fluktuierenden Strom aus Photovoltaik und Windkraft ausgleichen, indem gegenläufig Strom produziert wird, also immer dann, wenn die Sonne nicht scheint oder Windstille herrscht. Zum anderen sollten KWK-Anlagen nicht laufen, wenn gerade viel Strom aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird.

Jedoch gibt es keine exakten Grenzen, an denen sich festmachen lässt, wann zu wenig Strom und wann zu viel „erneuerbarer“ Strom erzeugt wird. Darüber hinaus spielt auch die Stromnachfrage eine

wichtige, mit zu berücksichtigende Rolle. Bei hoher Nachfrage und mittlerer Stromproduktion aus EE-Anlagen sollten KWK-Anlagen eher Strom produzieren als bei niedriger Nachfrage ohne EE-Strom.

Für die Stromnachfrage abzüglich der vorrangigen Einspeisung aus EE- und KWK-Anlagen hat sich der Begriff „Residuallast“ eingebürgert. Werden aber KWK-Anlagen flexibilisiert, d.h. nicht in jedem Fall vorrangig abgenommen, muss auch der Begriff Residuallast neu bestimmt werden. Ebenso könnten zukünftig weitere Akteure den Strommarkt flexibler machen und deshalb eine Neudefinition des Begriffs Residuallast notwendig machen. Die Stromerzeugung aus manchen EE-Anlagen (Bioenergie und Wasserkraft), Demand Side Management Maßnahmen und der Einsatz von (elektrischen) Speichern können die Residuallastkurve stark verändern. Um alle Flexibilitätsmöglichkeiten abzubilden und für jede Stunde die jeweils ökonomisch sinnvollste Flexibilität auszuwählen, eignet sich ein Marktmodell, welches anhand der Kosten entscheidet, welche Flexibilisierungsoption wann greift und in welcher Reihenfolge die Marktteilnehmer abgerufen werden. Schon heute wird Strom an der Börse gehandelt und ein Preis gebildet, der das Stromangebot, die Stromnachfrage und die Erzeugung aus erneuerbaren Energien abbildet: der EEX-Preis.

### 5.1.1 Strombörse

An der Energiebörse in Leipzig [EEX 14] werden Strom, Gas und CO<sub>2</sub>-Zertifikate im Termin- und im Spotmarkt gehandelt. Auf dem Terminmarkt werden u.a. längerfristige Stromlieferverträge geschlossen. Kurzfristige Kontrakte (1-2 Tage) werden auf dem Spotmarkt der EPEX-Spot in Paris gehandelt. Man unterscheidet zwischen dem Day-Ahead und dem Intraday Markt [ALT 13].

#### Spotmarkt

Beim Day-Ahead Markt gibt es für jede Stunde des folgenden Tages einen Preis. Dieser bildet sich genau dort, wo sich die steigende Angebots- und die fallende Nachfragekurve schneiden. Der Schnittpunkt, der sogenannte Clearing-Price, gilt dann für alle erfolgreichen Gebote. Aufgrund der Arbitrage-Prozesse zwischen Termin- und Spotmarkt kann der Clearingpreis als Referenzpreis für die jeweilige Stunde betrachtet werden [ROON 12]. Der Day-Ahead Preis wird zwischen 12.00 und 13.00 Uhr im Internet veröffentlicht [EPEX 14]. Im Intraday Handel wird Strom für den laufenden Tag gehandelt, um beispielsweise auf Fehlprognosen kurzfristig (bis zu 45 Minuten) reagieren zu können. Da BHKW lange Laufzeiten und wenig Zyklen haben sollen, wird im Weiteren der Day-Ahead Spotmarktpreis („EEX-Preis“) als Referenz herangezogen.

### 5.1.2 Struktur des EEX-Preises

Abbildung 5-2 illustriert die EEX-Preise für das Jahr 2012 im Marktgebiet Deutschland/Österreich (PHELIX) in chronologischer Reihenfolge (dunkel-türkis) und absteigend sortiert (dunkel-rot). Es wird deutlich, dass Extremwerte, also negative Preise oder Werte größer 10 €/ct/kWh, nur äußerst selten auftreten (109 Mal, entspricht 1,24 % aller Stunden). Meistens (> 90 %) liegen die Preise an der Strombörse zwischen 2 und 8 €/ct/kWh.

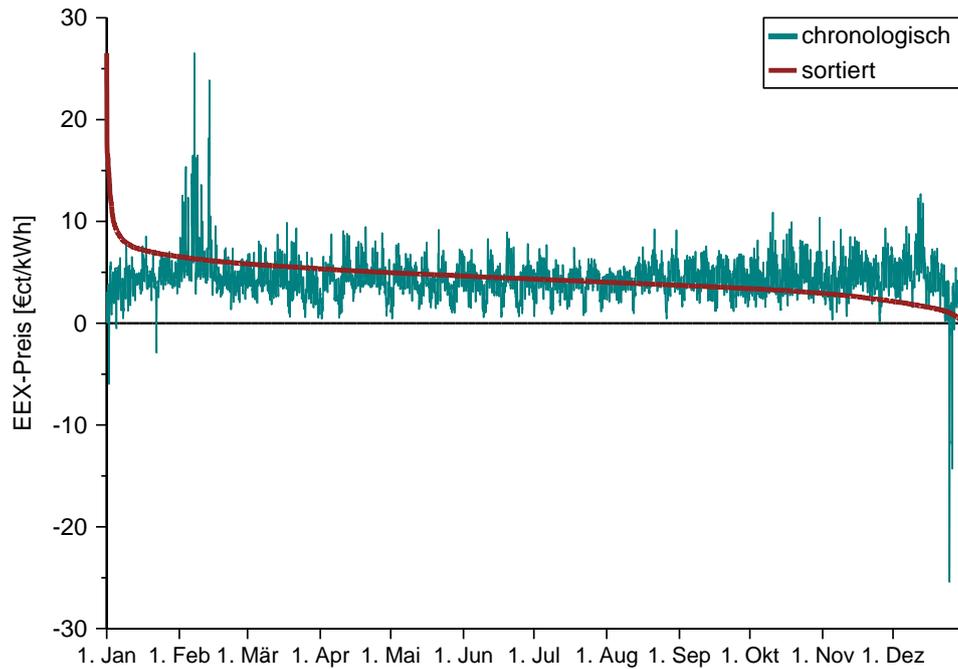


Abbildung 5-2: EEX-Börsenpreise, Jahr 2012<sup>38</sup>

Erst bei Betrachtung einzelner Tage erkennt man, dass sich der EEX-Preis aus Stromangebot und -nachfrage bildet. Gruppiert man die Preise in die jeweiligen Stunden mit Hilfe von Boxplots, ergibt sich der in Abbildung 5-3 gezeigte Verlauf. Sowohl der Median als auch die beiden Quantile (50 % und 90 %) bilden die typische Stromnachfragekurve inklusive Morgen- und Abendspitze ab.

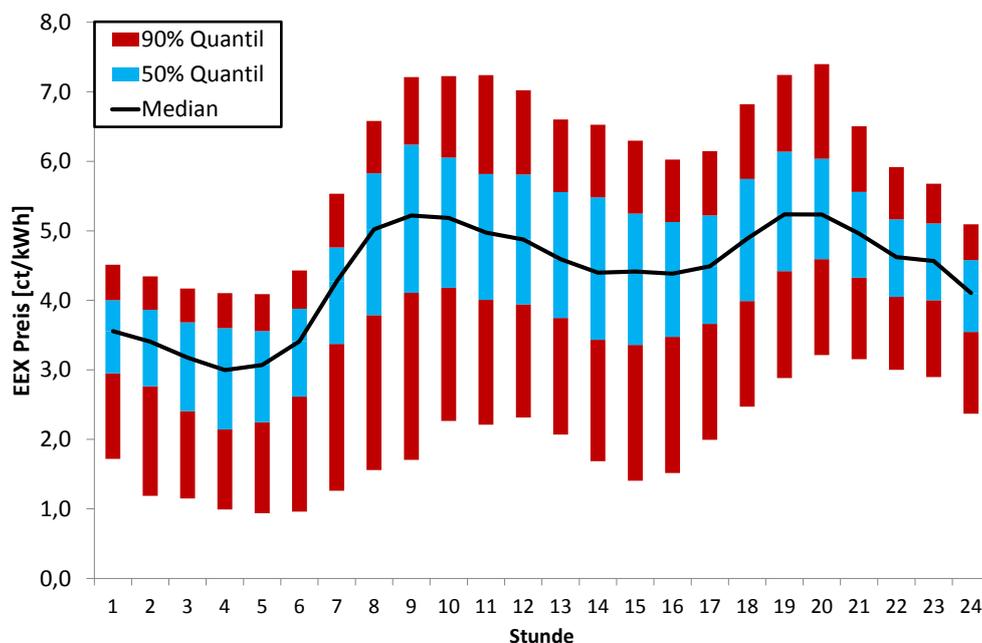


Abbildung 5-3: Stündliche EEX Börsenpreise, Jahr 2012

<sup>38</sup> Aufgrund der gehandelten Energiemengen wird an der Börse elektrische Energie in €/MWh gehandelt. Wegen der in dieser Arbeit betrachteten Leistungsklasse erfolgte eine Umrechnung in €/kWh.

Den Einfluss der Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik auf den EEX-Preis analysiert Hecht in seiner Bachelorarbeit [HEC 13]. Er arbeitet heraus, dass insbesondere die gut prognostizierbare PV-Einspeisung den Börsenstrompreis zur Mittagszeit deutlich drücken kann. Zudem ist der Strompreis bei hohem Windaufkommen niedriger als bei Windstille.

Neben der Tagesfluktuation ist der Börsenstrompreis auch vom jeweiligen Wochentag abhängig. Aufgrund der maximalen Stromnachfrage ist der Strompreis von Dienstag bis Donnerstag am höchsten und fällt zum Wochenende hin ab. Da die Stromnachfrage der Industrie am Montagmorgen noch nicht ihr Maximum erreicht hat, sind die Montagspreise tendenziell kleiner als an den folgenden Werktagen.

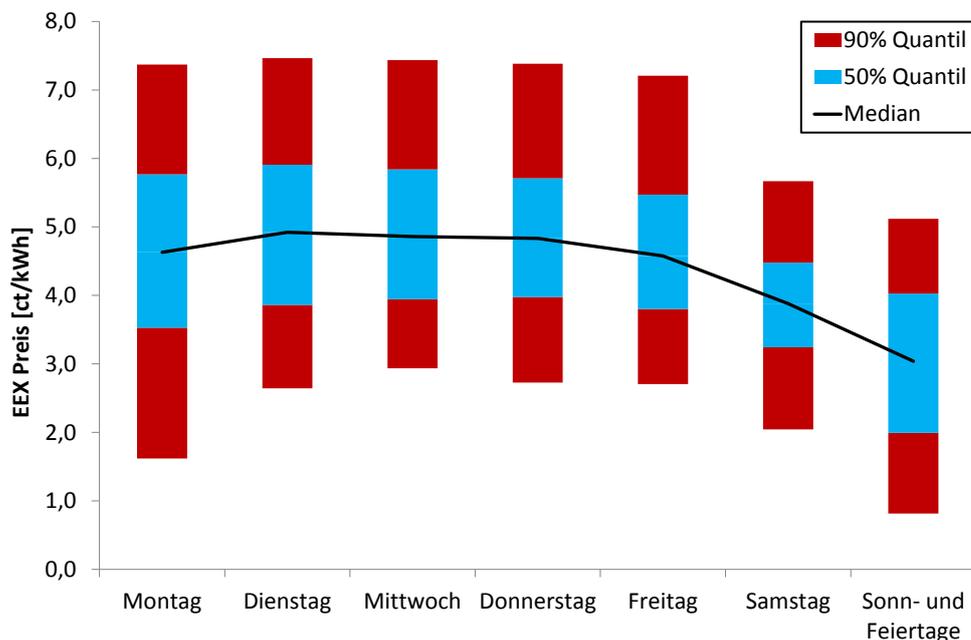


Abbildung 5-4: Wochentags-EEX-Börsenpreise, Jahr 2012

### 5.1.3 Repräsentativer EEX-Börsenpreis

Für die allgemeine Bewertung und Optimierung der Mikro-BHKW-Stromerzeugung ist es wichtig, einen repräsentativen EEX-Börsenpreis zu haben. Ausgehend von den Typtagkriterien soll der typische EEX-Preis nicht durch eine Mittelwertbildung geglättet werden, sondern dem realen Preisverlauf eines Tages entsprechen. Der zu ermittelnde, geeignete Tag soll einen minimalen ( $EEX_{d,min}$ ) bzw. maximalen Preis ( $EEX_{d,max}$ ) haben, der nahe am Mittelwert aller kleinsten ( $\overline{EEX_{min,2012}}$ ) bzw. größten ( $\overline{EEX_{max,2012}}$ ) Tageswerte des Jahres 2012 liegt. Zusätzlich soll die Differenz des größten und kleinsten Tageswertes ( $\Delta \overline{EEX} = \overline{EEX_{max}} - \overline{EEX_{min}}$ ) kleiner  $\pm 10\%$  der Differenz aus dem Mittelwert der 366 Maximal- und Minimalwerte sein:

$$0,9 \times \overline{EEX_{min,2012}} \leq EEX_{d,min} \leq 1,1 \times \overline{EEX_{min,2012}} \quad (5.1)$$

$$0,9 \times \overline{EEX_{max,2012}} \leq EEX_{d,max} \leq 1,1 \times \overline{EEX_{max,2012}} \quad (5.2)$$

$$0,9 \times \Delta \overline{EEX}_{2012} \leq \Delta EEX_d \leq 1,1 \times \Delta \overline{EEX}_{2012} \quad \text{mit } \Delta \overline{EEX} = \overline{EEX_{max}} - \overline{EEX_{min}} \quad (5.3)$$

Aus den verbliebenen acht möglichen Tagen wurden zusätzlich jene mit einer Außentemperatur größer 15 °C, kleiner 5 °C sowie Feier- und Wochenendtage ausgeschlossen. Des Weiteren wurde angestrebt, dass der 24-Stunden-Verlauf dem Verlauf des Medians der 24-Stunden-Werte aus Abbildung 5-3 möglichst nahe kommt. Als letztes Kriterium wurde festgelegt, dass der Vergleichstag eine deutliche Morgen- und Abendspitze aufweisen soll um auch Tage mit hoher solarer Einstrahlung widerspiegeln zu können. Nach Anwendung aller Kriterien wurde Freitag, der 28. September 2012 ausgewählt. Abbildung 5-5 zeigt den Strompreisverlauf und die statistischen Merkmale dieses Tages.

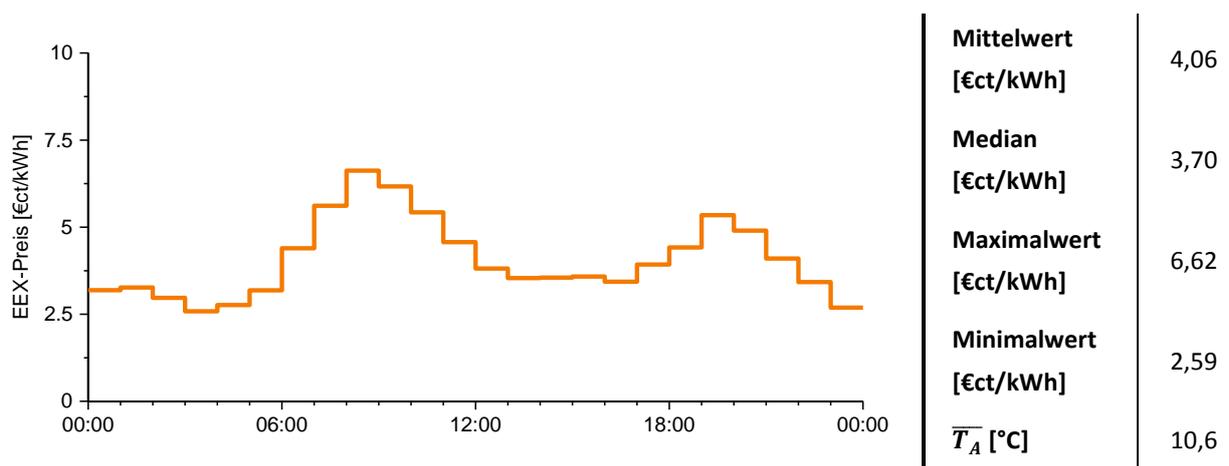


Abbildung 5-5: Repräsentativer EEX-Preisverlauf vom 28.09.2012

#### 5.1.4 Charakteristik der Stromerzeugung aus Mikro-KWK-Anlagen

In diesem Unterkapitel wird die Charakteristik der Stromerzeugung aus Mikro-KWK-Anlagen untersucht und mit den EEX-Preisen in Verbindung gebracht. Wegen der Nachtabsenkung und des zeitlichen Verlaufs des Warmwasserbedarfs kann vermutet werden, dass die Stromproduktion von wärmegeführten Mikro-KWK-Anlagen tendenziell tagsüber stattfindet. Da die Strompreise an der Börse am Tag (Peakperiode: 8.00 bis 20.00 Uhr) meist höher sind als im Tagesdurchschnitt (Base), kann angenommen werden, dass unflexible, wärmegeführte Mikro-KWK-Anlagen dazu tendieren, Strom bei überdurchschnittlichen Preisen zu erzeugen.

### Stromerzeugungscharakteristik von Mikro-KWK-Anlagen im Feldtest

In einem früheren vom IfE durchgeführten Feldtest wurden die Stromerzeugungsprofile von verschiedenen Mikro-KWK-Anlagen analysiert [LIPP 13-c]. Dabei stellte sich heraus, dass für alle Temperaturbereiche die Stromproduktion der untersuchten Anlagen während der Nacht gering ist, morgens ansteigt, mittags wieder abfällt und abends erneut steigt. Dies deckt sich mit dem Stromproduktionsprofil, das im Feldtest für den Standort Miesbach im Jahr 2012 bestimmt wurde (Abbildung 5-6). Während der Heizperiode findet zwischen 22.00 und 3.00 Uhr nahezu keine Stromproduktion statt. Erst mit dem Auskühlen des Speichers bzw. am Ende der Nachtabenkung wird Strom erzeugt. Auch in Miesbach ist die Stromerzeugung morgens (Stunde 8) am höchsten, fällt dann ab und steigt in den Abendstunden (ab 17.00 Uhr) wieder an. In den Sommermonaten erfolgt die meiste Stromproduktion ebenfalls in der achten Stunde und fällt dann ebenso ab.

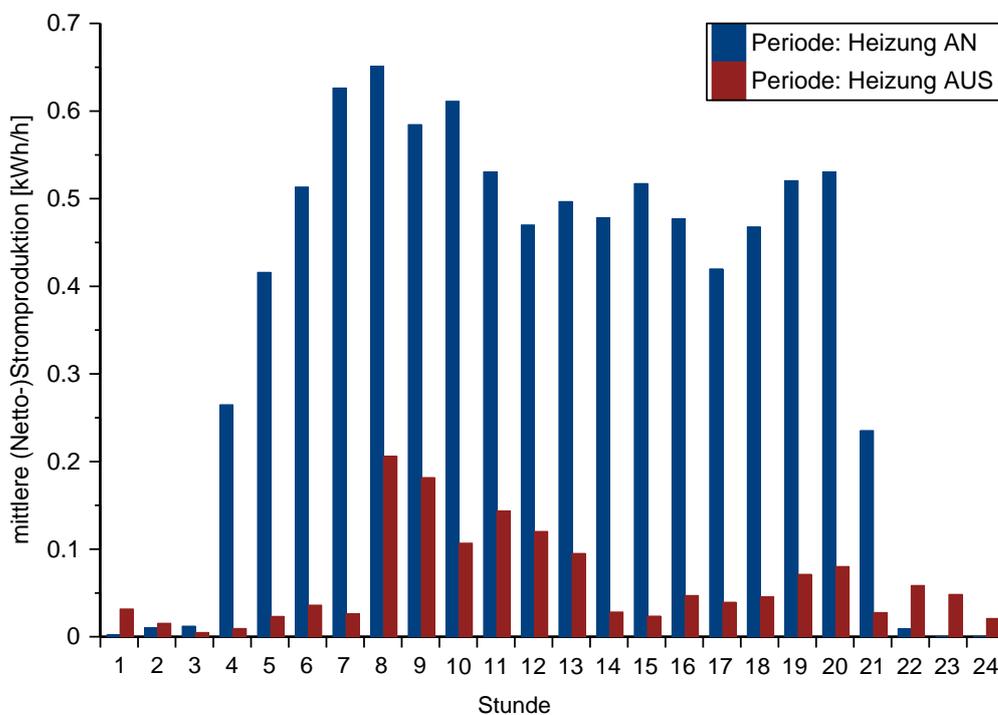


Abbildung 5-6: Stündliche Stromproduktion in Miesbach 2012

Vergleicht man die Stromproduktion mit den mittleren Strompreisen (Abbildung 5-3), so fällt auf, dass die Verläufe ziemlich ähnlich sind. Beide zeichnen sich durch eine Morgen- und Abendspitze, ein kleines „Mittagstal“ und niedrige Werte in der Nacht aus.

Um den „Wert“ des erzeugten Stroms zu bestimmen, werden sowohl die absoluten als auch die durchschnittlichen (auf die erzeugte Strommenge bezogenen) Erlöse berechnet. Für den Erlös bildet man das Produkt aus erzeugter Strommenge und dem dazugehörigen EEX-Preis. Anschließend werden die einzelnen Stundenerlöse aufsummiert. Für die Durchschnittserlöse (bspw. pro Tag oder Jahr) werden die Erlöse durch die erzeugte Strommenge dividiert:

$$\text{Erlös} = \sum_{i=1}^n (W_{el,i} \times \text{EEX-Preis}_i) \quad (5.4)$$

$$\text{durchschn. Erlös} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_{el,i} \times \text{EEX-Preis}_i)}{\sum_{i=1}^n W_{el,i}} \quad (5.5)$$

Für das Jahr 2012 zeigt Tabelle 5-1 die erzielten Erlöse in Miesbach. Der mittlere Erlös beträgt 5,12 €/kWh, der durchschnittliche EEX-Preis demgegenüber nur 4,38 €/kWh. Betrachtet man als Referenz nur die Zeit, zu der der Stirlingmotor Strom erzeugt hat (sprich das Jahr 2012 ohne den Zeitraum vom 28. Februar bis zum 16. Mai), ist der Referenzpreis zwar marginal höher (4,42 %), der erzeugte Strom aber immer noch über 15 % „wertvoller“ als der Durchschnittspreis.

**Tabelle 5-1: Wert des erzeugten KWK Stroms, Miesbach 2012**

	2012	2012 ohne 28.02. bis 16.05.
<b>durchschn. EEX-Preis [€/ct]</b>	4,38	4,42
<b>Stromerzeugung [kWh]</b>	1.383	1.383
<b>Erlös [€]</b>	70,81	70,81
<b>durchschn. Erlös [€/ct/kWh]</b>	5,12	5,12
<b>durchschn. Erlös / durchschn. EEX-Preis [%]</b>	116,9	115,8

### Mikro-KWK Stromerzeugung zu Zeiten extremer Strompreise

Werden Mikro-Anlagen als Spitzenlastkraftwerke angesehen, müssen neben den mittleren Erlösen auch die Tage betrachtet werden, an denen es zu maximalen Strompreisen gekommen ist. Ebenso stellt sich die Frage, ob wärmegeführte BHKW Strom erzeugen, wenn die Preise minimal sind.

Extreme EEX-Preise haben verschiedene Ursachen. So treten hohe Preise etwa nur auf, wenn die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien niedrig und die elektrische Last hoch ist. So hat in Deutschland in den 13 ersten Februartagen 2012 eine Kältewelle dafür gesorgt, dass die mittlere Außentemperatur bei -10,3 °C lag [DWD 12]. Zusammen mit der zu dieser Zeit geringen Wind- und PV-Einspeisung [ÜNB 14] hatte dies für den Strommarkt sehr hohe Preise zur Folge (siehe auch Abbildung 5-2). Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass die höchsten Einzeltageswerte meist werktags auftreten, da dann die Stromnachfrage höher ist als am Wochenende. Der höchste Einzelstundenwert war im Jahr 2012 am Donnerstag, den 7. Februar zwischen 9.00 und 10.00 Uhr zu beobachten (26,53 €/kWh).

Im Gegensatz dazu treten niedrige (oder sogar negative) Strompreise oft an Sonn- und Feiertagen auf, wenn die Netzlast gering ist. Dazu kam an den Weihnachtsfeiertagen 2012 eine kontinuierlich hohe Windstromeinspeisung von deutlich über 10 GW [ÜNB 14]. Aufgrund dessen war der Strompreis sehr gering und fiel in der zweiten Stunde vom 25. Dezember auf -25,41 €/kWh. Die zu dieser Zeit

eingespeiste elektrische Leistung aus Windkraft betrug fast 16 GW.

Mit Blick auf die Stromerzeugung der Mikro-KWK-Anlage in Miesbach an den Tagen mit extremen Strompreisen ist das Ergebnis nur teilweise positiv zu bewerten. An den beiden Tagen mit den höchsten EEX-Preisen (Abbildung 5-7, links) läuft das Mikro-BHKW zwischen 5.30 Uhr und 20.30 Uhr,<sup>39</sup> was zu durchschnittlichen Erlösen von jeweils ca. 15 €/ct/kWh führt. Das BHKW ist während der Preisspitze stets in Betrieb, obwohl diese am 7. Februar vormittags und am anderen Tag abends auftritt. Nachts, wenn der Strompreis verhältnismäßig niedrig ist, steht das BHKW still.

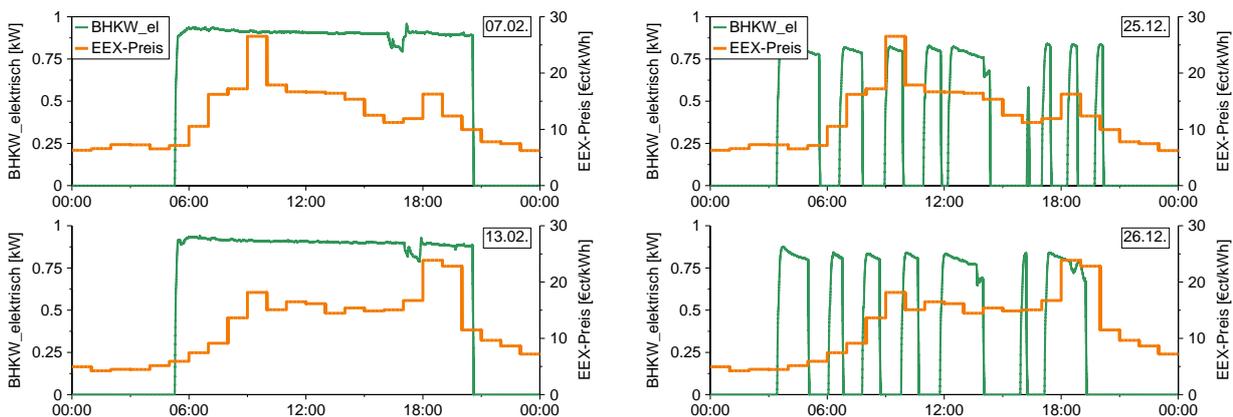


Abbildung 5-7: BHKW-Stromproduktion an Tagen mit extremen Börsenpreisen, Miesbach 2012

An den beiden Weihnachtsfeiertagen 2012 (Abbildung 5-7, rechts) war der mittlere EEX-Preis am niedrigsten. Da an beiden Tagen weniger als 7 kWh elektrische Energie erzeugt wurden und das BHKW häufig taktete, ist davon auszugehen, dass die Bewohner in Miesbach an den Weihnachtsfeiertagen außer Haus waren. An beiden Tagen fiel der EEX-Preis in den Morgenstunden deutlich ins Negative. Trotzdem hat das Mikro-BHKW in diesen Stunden Strom erzeugt. An beiden Tagen tritt insgesamt ein negativer Erlös auf. Der durchschnittliche Erlös liegt knapp über dem EEX-Preis-Mittelwert der jeweiligen Tage (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Erlöse an den Tagen mit extremen EEX-Preisen

	07.02.	13.02.	25.12.	26.12.
durchschn. EEX-Preis [€/ct/kWh]	12,09	11,90	-3,73	-1,31
Stromerzeugung [kWh]	13,78	13,74	6,73	6,78
Erlös [€ct]	206,5	206,4	-18,3	-8,25
durchschn. Erlös [€/ct/kWh]	14,98	15,03	-2,72	-1,22

<sup>39</sup> Der Einbruch der elektrischen Leistung zwischen 17.00 und 18.00 Uhr ist auf das Zuschalten des SLK und dem daraus resultierenden höheren Eigenstrombedarf zurückzuführen.

Da sich der in Abbildung 5-3 dargestellte mittlere Strompreisverlauf auch an den Tagen mit den Preisextrema wiederfindet, ist der Durchschnittserlös von Mikro-KWK-Anlagen nicht nur im Jahresmittel, sondern auch an den Tagen mit extremen Strompreisen höher als der Durchschnitt. Da maximale Strompreise immer an kalten Tagen auftreten, eignen sich Mikro-KWK-Anlagen auch als „Spitzenlastkraftwerke“, da sie mit großer Wahrscheinlichkeit zu Zeiten hoher Preise laufen. Bei sehr kleinen Preisen könnte die Stromerzeugung durch den Spitzenlastkessel verhindert, mit sinnvollem Speichermanagement verlagert oder mittels einer elektrischen Heizvorrichtung sogar Strom aus dem Netz bezogen werden („Power to Heat“).

#### **Stromerzeugungscharakteristik des Whispergen BHKW an den Typtagversuchen**

Die stündliche Stromerzeugung des WG-Mikro-BHKW bei den Typtagversuchen zeigt Abbildung 5-8. Aufgrund des eingestellten Sollwertsprungs um 5.00 Uhr läuft das BHKW meist morgens zwischen 5.00 und 8.00 Uhr. Das unterste Diagramm in Abbildung 5-8 stellt das arithmetische Mittel der fünf Typtage (schwarz) bzw. die nach der Häufigkeit ihres Auftretens gewichteten Mittelwerte (pink) dar. Es kann festgehalten werden, dass der Einschaltzeitpunkt an den einzelnen Tagen, abgesehen vom Sollwertsprung, variiert. Im Mittel ist aber eine erhöhte Stromerzeugung am Morgen und am Abend feststellbar.

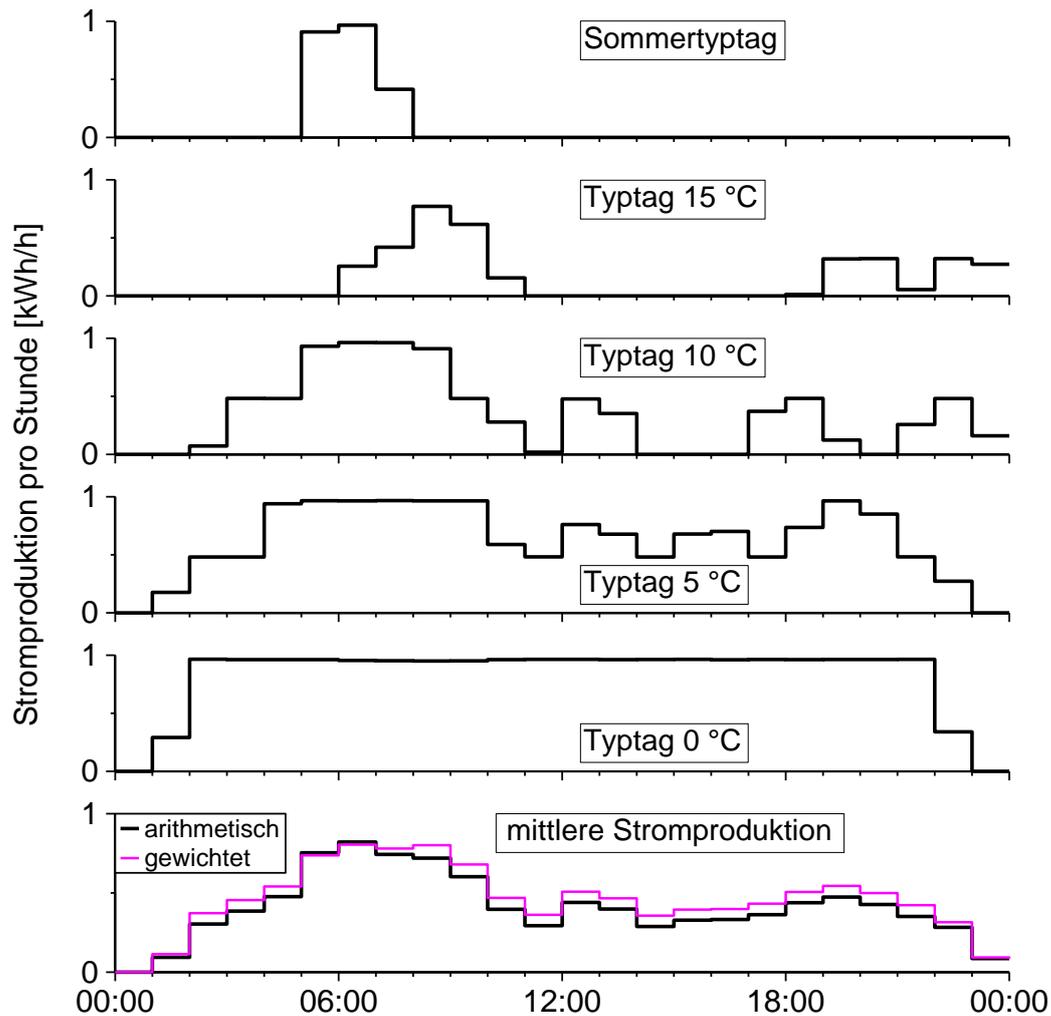


Abbildung 5-8: Stündliche Stromproduktion der Typtage

Betrachtet man die Erlöse, die das BHKW an den Typtagen (Tabelle 5-3) erwirtschaftet, dann wird ersichtlich, dass die Tagesdurchschnittserlöse, mit Ausnahme des Typtags 15 °C, zwischen 4,14 €/ct/kWh und 4,35 €/ct/kWh, also leicht über dem Mittelwert des EEX-Tages (4,06 €/ct/kWh), liegen. Die Stromproduktion am Typtag 15 °C startet etwas später, weshalb die Durchschnittserlöse ca. 1 €/ct/kWh über den sonstigen Tagen liegen. Bei den Typtagversuchen mit mehreren Messtagen ist sowohl der absolute Erlös als auch der bezogene Erlös oft sehr unterschiedlich. Am Typtag 15 °C-a ist der Erlös bspw. doppelt so hoch wie am dritten Messtag. Am Typtag 10 °C ist der durchschnittliche Erlös am ersten Tag über 1 €/ct/kWh kleiner als am zweiten. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass die Stromproduktion an den Typtagen eher morgens und abends stattfindet, wenn die Preise hoch sind, während tendenziell wenig (mittags/nachmittags) bis sehr wenig (nachts) Strom produziert wird, wenn die Preise gering sind.

Tabelle 5-3: BHKW Erlöse an den Typtagen

Typtag	Sommer	15 °C	10 °C	5 °C	0 °C
Erlös <sub>Typtage</sub> [€ct]	9,48	18,7	36,5	65,6	83,7
Erlös <sub>Messtage</sub> [€ct]	-	24,2/19,4/12,3	36,6/36,4	67,3/63,9	-
Erlös <sub>Typtage,bez.</sub> [€ct/kWh]	4,14	5,29	4,29	4,35	4,21
Erlös <sub>Messtage,bez.</sub> [€ct/kWh]	-	5,34/4,82/6,13	3,92/5,00	4,17/4,56	-

### 5.1.5 Zwischenbilanz: Mikro-BHKW Stromerzeugung und Börsenstrompreise

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass wärmegeführte Mikro-KWK-Anlagen in vielen Stunden des Jahres Strom erzeugen, wenn der Börsenstrompreis hoch ist. Das mittlere KWK-Stromerzeugungsprofil korreliert mit den tageszeitlichen Schwankungen des Strompreises. Im Winter, wenn die Stromerzeugung aus den PV-Anlagen gering ist, laufen Mikro-BHKW sehr lange und können diese ersetzen. Im Sommer wird nur wenig KWK-Strom produziert. Der Börsenstrompreis ist an sonnigen Tagen meist morgens und abends am höchsten, weil die Photovoltaik mittags den meisten Strom erzeugt. Da die wärmegeführten BHKW im Sommer entweder zufällig (vgl. Abbildung 5-6) oder immer zur gleichen (und dabei „falschen“) Zeit (Abbildung 3-32) in Betrieb sind, muss die Stromerzeugung geplant werden, sollen BHKW zu den Höchstpreisen laufen.

Bei geringer Stromnachfrage oder bei hoher EE-Strom-Einspeisung kann die Stromerzeugung mit Hilfe des SLK verhindert bzw. mit einem intelligenten Speichermanagement in Zeiten höherer Preise verlagert werden. In Zukunft könnte durch den Speicher sogar überschüssiger Strom aus dem Netz (Power to Heat) aufgenommen werden.

Luibl hat in seiner Diplomarbeit u.a. die zukünftigen Börsenstrompreise bis ins Jahr 2030 simuliert [LUI 12] und festgestellt, dass wegen des weiteren Ausbaus der erneuerbaren Energien die Schwankungen des EEX-Strompreises deutlich zunehmen werden. Insbesondere der Photovoltaik-Ausbau führt zu einem Absinken des Strompreises in den Mittagsstunden. Die Anforderungen an das Stromsystem, flexibel Strom zu erzeugen, werden demnach auf jeden Fall steigen.

## 5.2 Wärmebedarfsprognose

Für die Erstellung einer kostenoptimalen BHKW-Betriebsweise muss der zu deckende Wärmebedarf und sein zeitlicher Verlauf möglichst genau prognostiziert werden. Der Wärmebedarf setzt sich zusammen aus der benötigten Heizenergie, dem Warmwasserbedarf, den zu deckenden Zirkulationsverlusten sowie den Speicherverlusten. Für die Prognose muss zuerst der (reale) Wärmeverbrauch bestimmt werden. Da dafür keine zusätzliche Messtechnik installiert werden soll, wird der stündliche Wärmeverbrauch aus der Differenz des nutzbaren Speicherinhalts am Ende und zu Beginn jeder Stunde abzüglich der vom

BHKW dem Speicher zugeführten thermischen Energie<sup>40</sup> berechnet:

$$Q_{\text{Verbrauch, Stunde } i} = (E_{\text{Sp},i+1} - E_{\text{Sp},i}) - \frac{t_{\text{BHKW}}(\text{min})}{60 \text{ min}} \times 7,6 \text{ kWh} \quad (5.6)$$

In Kapitel 4.3 wurde die Speicherinhaltsänderung bei verschiedenen Lade- und Entladezyklen analysiert. Meist tritt die Änderung zeitlich verzögert auf. Nach der Einschwingzeit ist die thermische Bilanz am Speicher korrekt.

In Kapitel 3.1.2 wurde der Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Wärmeverbrauch analysiert. Es stellte sich heraus, dass es in der Heizperiode einen linearen Zusammenhang gibt. In den Sommermonaten (bzw. wenn die Heizung aus ist) variiert der Wärmeverbrauch durch das individuelle Zapfverhalten. Ein direkter Bezug des Bedarfs zur Außentemperatur konnte nicht festgestellt werden. Da die Zirkulations- und Speicherverluste jeden Tag ähnlich sind, tragen sie zu einer Vereinheitlichung des thermischen Verbrauchs bei.

Die für die thermische Prognose notwendige Schätzung des Wärmebedarfs erfolgt angelehnt an Pielke, welcher die Methode der Lastfortschreibung und der Regression verwendet [PIE 10]. Da er jedoch auf die Einbeziehung von technischen Kommunikationsmitteln verzichtet, geht die Außentemperatur nicht in die Schätzung mit ein. Für diese Arbeit ist jedoch eine Anbindung an das Internet zur Übertragung der EEX-Preise unabdingbar, womit auch eine Temperaturprognose für die Wärmebedarfsschätzung eingesetzt werden kann. Die Genauigkeit der Temperaturvorhersage wurde von Kinninger [KIN 12] untersucht.<sup>41</sup> Die mittlere prozentuale, auf Kelvin bezogene Temperaturabweichung für den nächsten Tag beträgt laut Kinninger 0,5 %, also ungefähr 1,5 °C. Für die nachträgliche Einschätzung der Güte der Wärmeprognose im Fall Miesbach wurde der Fehler der Temperaturvorhersage nicht einbezogen.

Einen weiteren Einfluss auf den Heizwärmebedarf hat in vielen Gebäudetypen die Tagesperiodizität. Jedoch konnte weder für Einfamilienhäuser im Allgemeinen noch für den Miesbach-Feldtest im Speziellen eine wochentagabhängige Periodizität nachgewiesen werden.

Für die Wärmebedarfsprognose in dieser Arbeit wurden zwei Verfahren entwickelt: „Stützpunkt 20 °C“ und „Trend“. Beide Verfahren werden ex-post, also im Nachhinein auf ihre Tauglichkeit hin überprüft. Beim „Stützpunkt 20 °C“-Verfahren, welches nur in der Heizperiode eingesetzt werden kann, wird aus mindestens einem vergangenen Tag der arithmetische<sup>42</sup> Mittelwert der Außentemperatur und des Wärmeverbrauchs berechnet und mit Hilfe eines Stützpunkts ( $Q_{\text{Wärmeverbrauch}} = 0 \text{ kWh}$ ,  $T_A = 20 \text{ °C}$ ) eine Gerade gebildet, die den linearen Anstieg des Wärmeverbrauchs bei fallenden Außentemperaturen widerspiegelt. Der Wärmebedarf des folgenden Tages ( $Q_{d+1}$ ) wird aus dem Tagesmittelwert der

<sup>40</sup> Aus den Messergebnissen zu Abbildung 3-24 und Abbildung 4-11 abzüglich der Leitungsverluste konnten 7,6 kWh plausibel abgeleitet werden.

<sup>41</sup> In der Arbeit von Kinninger [KIN 12] finden sich exakte Informationen, wie sowohl Börsenstrompreise als auch Wetterdaten abgerufen werden können.

<sup>42</sup> Ebenso könnte man unter den vorangehenden Tagen die weniger weit zurückliegenden stärker gewichten und damit die Wärmeprognose evtl. weiter verbessern.

Temperaturprognose ( $T_{A,d+1}$ ), der Mitteltemperatur der vergangenen Tage ( $\overline{T_{A,i}}$ ) und dem mittleren Wärmeverbrauch der vergangenen Tage ( $\overline{Q_i}$ ) gebildet:

$$Q_{d+1} = \frac{20\text{ °C} - T_{A,d+1}}{20\text{ °C} - \overline{T_{A,i}}} \times \overline{Q_i} \quad \text{für } i \geq 1 \quad (5.7)$$

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass man mit nur einem Wert den Verbrauch des folgenden Tages schätzen kann. Beim „Trend“-Verfahren ist dies nicht der Fall. Bei diesem wird mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ein linearer Zusammenhang aus den letzten (mindestens zwei) Verbräuchen ( $Q_i$ ) und Außentemperaturen ( $T_{A,i}$ ) gebildet:

$$Q_{d+1} = m \times T_{A,d+1} + t \quad (5.8)$$

$$\min_{m,t} \sum_{i=1}^n (-Q_i + m \times T_{A,i} + t)^2 \quad \text{für } i \geq 2 \quad (5.9)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{A,i} - \overline{T_{A,i}}) \times (Q_i - \overline{Q_i})}{\sum_{i=1}^n (T_{A,i} - \overline{T_{A,i}})^2} \quad (5.10)$$

$$t = \overline{Q_i} - m \times \overline{T_{A,i}} \quad (5.11)$$

Die grafische Darstellung der oben erläuterten Formeln zeigt Abbildung 5-9. Bei der „Stützpunkt 20 °C“-Methode wird aus dem Schwerpunkt der vorhandenen Werte und einem zusätzlichen Stützpunkt eine Gerade gebildet. Beim „Trend“-Verfahren wird aus den vorhandenen Punkten eine Gerade erzeugt, die den kleinsten quadratischen Fehler zu den Messwerten aufweist.

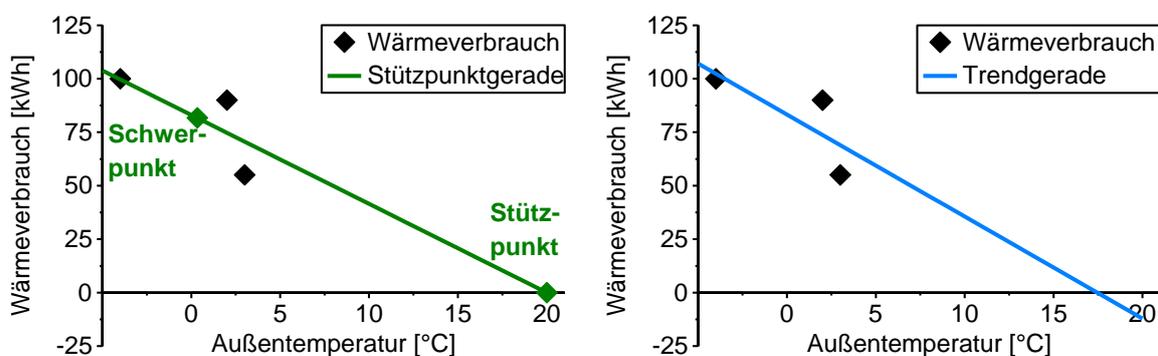


Abbildung 5-9: Grafische Darstellung des „Trend“- und „Stützpunkt 20 °C“-Verfahrens

Um die beiden Verfahren vergleichen zu können, wird die Temperaturprognose (bzw. der gemessene Temperaturmittelwert des Folgetags) in die beiden ermittelten Gleichungen eingesetzt. Abbildung 5-10 verdeutlicht den über die Heizperiode kumulierten Fehler für beide Prognosemethoden bei verschiedenen langen Betrachtungszeiträumen. Es fällt auf, dass bei der „Trend“-Prognose bei einem kurzen Betrachtungszeitraum der Fehler sehr groß werden kann. Der Grund hierfür ist, dass bei sehr ähnlichen Außentemperaturen die Steigung der Gerade sehr steil wird und es folglich zu sehr hohen Abweichungen kommen kann. In der Detailansicht von Abbildung 5-10 wird aber auch ersichtlich, dass ab einem Betrachtungszeitraum von mindestens vier Tagen die Vorhersagegenauigkeit bei der „Trend“-Methode besser ist. Vergrößert sich der Betrachtungszeitraum weiter, spielen langfristige Effekte eine entscheidendere Rolle und der absolute Fehler kann wieder ansteigen. Ein guter Kompromiss aus langfristigen Effekten und dem wöchentlichen periodischen Einfluss ist ein Betrachtungszeitraum von sieben Tagen. Sollten noch zu wenig Daten vorliegen oder die Heizeinstellungen noch verändert worden sein, bietet sich das „Stützpunkt 20 °C“-Verfahren an.

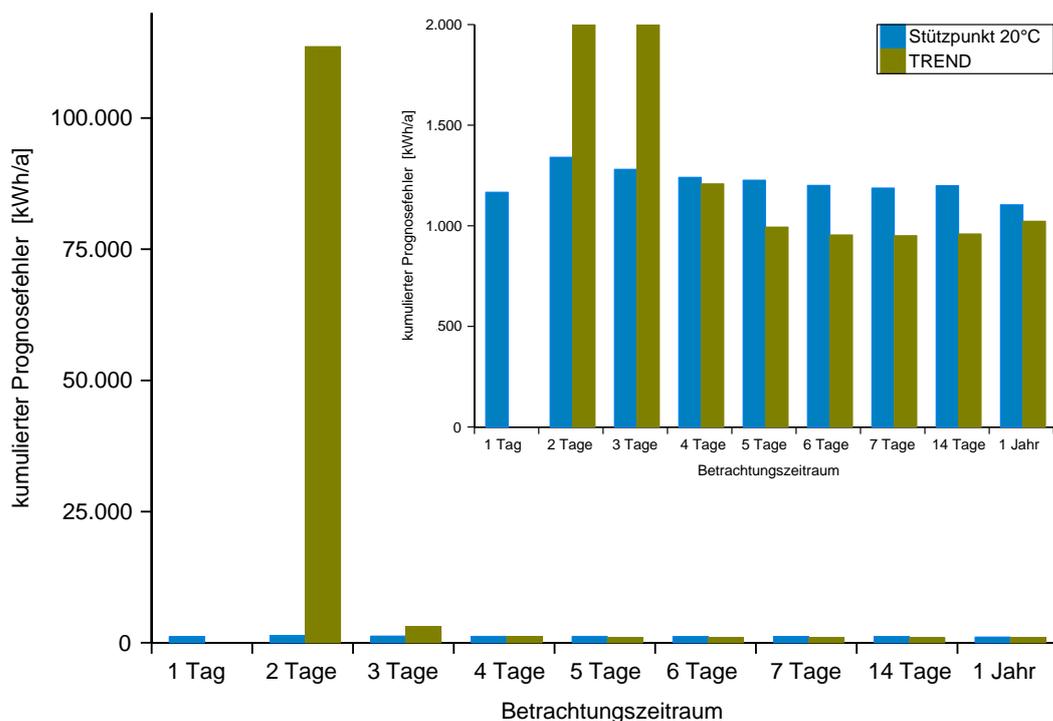


Abbildung 5-10: Kumulierter Wärmeverbrauchsprognosefehler des Wärmeverbrauchs für die Methoden „Stützpunkt 20 °C“ und „Trend“, Miesbach 2012

Neben dem absoluten Wert muss auch der zeitliche Verlauf des Wärmebedarfs vorhergesagt werden. Wegen der Trägheit der Speicherinhaltsbestimmung bzw. der Wärmeverbrauchs-messung ist es ausreichend, den Wärmebedarf auf Stundenbasis zu schätzen. Es wird angenommen, dass sich der zeitliche Verlauf am Folgetag kaum ändert. Der Absolutwert wird hingegen mit dem Verhältnis aus den jeweiligen Tageswerten skaliert:

$$Q_{h,d+1} = \frac{Q_{d+1}}{Q_d} \times Q_{h,d} \quad \text{für } h = 1 \dots 24 \quad (5.12)$$

Bei der Analyse der Prognosegüte ist es wichtig, zwischen zwei regelmäßig auftretenden Fehlern zu unterscheiden:

- Zeitfehler
- Amplitudenfehler

Zeitfehler treten aufgrund von Lastverschiebungen auf. Die prognostizierte Last kann sowohl früher als auch später auftreten. Amplitudenfehler hingegen betreffen die Absolutwerte des stündlichen Verbrauchs.

In der Heizungstechnik treten Zeitfehlerabweichungen insbesondere bei den Warmwasserzapfungen auf. Da die genauen Zapfzeiten erstens durch die stündliche Speicherinhaltsanalyse nicht minutengenau bestimmbar sind und zweitens von Tag zu Tag sehr stark variieren (vgl. Abbildung 3-10), ist fast immer mit einem Zeitfehler zu rechnen. Für den Zirkulationsverbrauch und den Heizwärmeverbrauch ist der Zeitfehler aufgrund der konfigurierten Zeiten vernachlässigbar. Der Amplitudenfehler tritt dagegen bei allen Verbrauchern auf. Bei den Zirkulationsverlusten ist der Amplitudenfehler relativ klein, da diese bei konstantem Durchfluss und Raumtemperatur nur von der Warmwasservorlauftemperatur abhängen (vgl. [CAN 12]). Der Warmwasserverbrauch wird vom Nutzerverhalten der Bewohner bestimmt und kann demzufolge stark variieren. In absoluten Werten sind diese beiden Fehler an kälteren Tagen vergleichsweise klein. Weicht die tatsächliche Außentemperatur von der prognostizierten ab, ist der Amplitudenfehler sehr viel größer. Ebenso kann die in dieser Arbeit nicht berücksichtigte solare Strahlung einen zusätzlichen Amplitudenfehler in der Wärmebedarfsprognose erzeugen.

Im folgenden Abschnitt wird der kumulierte Fehler des Tageswärmeverbrauchs für den Feldteststandort Miesbach untersucht.<sup>43</sup> Abbildung 5-11 zeigt den absoluten Fehler der „Trend“-Prognose für einen gewählten Betrachtungszeitraum von sieben Tagen. Im linken Diagramm sind die Werte für die Heizperiode aufgetragen. Der Vorhersagefehler ist an 87 % aller Tage kleiner 8 kWh, also im Bereich einer Whispergen BHKW-Betriebsstunde. Die größten Abweichungen treten bei sehr niedrigen Außentemperaturen auf, bei Veränderungen an den Heizungseinstellungen oder wenn die Bewohner außer Haus sind. In der Sommerperiode (Abbildung 5-11, rechts) ist der Fehler meist kleiner als zwei Kilowattstunden. Erst mit der partiellen Aktivierung der Heizungsanlage Ende September (vgl. Abbildung 3-3) wird der Fehler deutlich größer und klingt dann mit der gewählten Zeitkonstante (7 Tage) wieder ab.

---

<sup>43</sup> Da diese Analyse auf realen Messdaten basiert werden Fehler bei der Temperaturprognose nicht berücksichtigt.

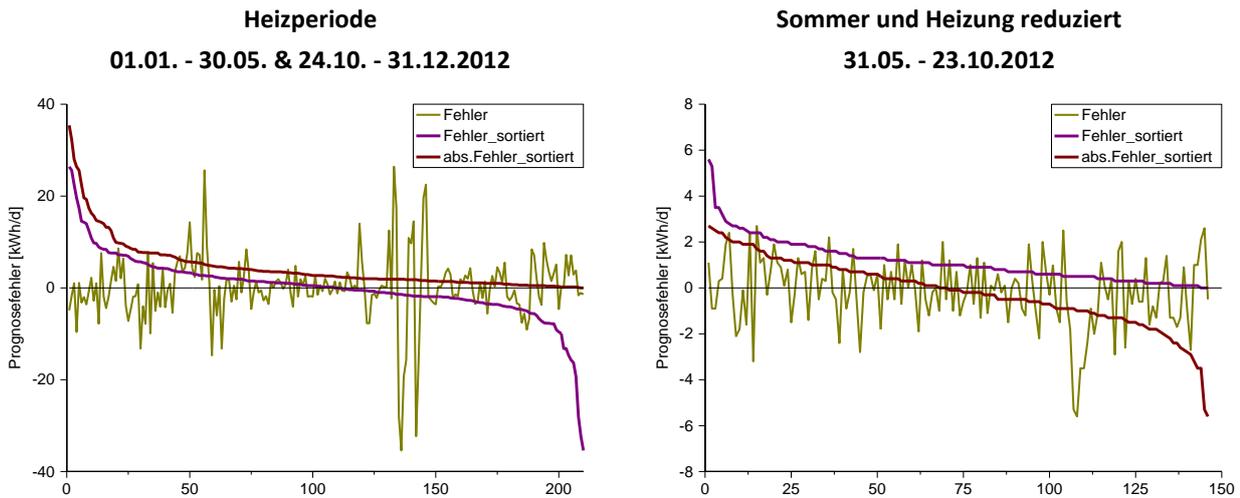


Abbildung 5-11: Absoluter Vorhersagefehler mit der „Trend-Prognose“, Betrachtungszeitraum 7 Tage, Miesbach 2012

Den relativen Prognosefehler zeigt Abbildung 5-12. Die Klassenbreite wurde dabei so angepasst, dass die Verteilungen auf den ersten Blick ähnlich sind. Bei genauer Betrachtung wird jedoch klar, dass die relativen Prognosefehler in der Heizperiode deutlich kleiner sind. Drei Viertel aller Prognosen liegen innerhalb  $\pm 10\%$ , 92,3% sogar im Bereich von  $\pm 20\%$ . Dagegen bewegen sich in der Sommerperiode nur 40,8% der Tagesprognosen innerhalb  $\pm 20\%$ , 16,5% befinden sich sogar außerhalb der  $\pm 50\%$  Grenze.

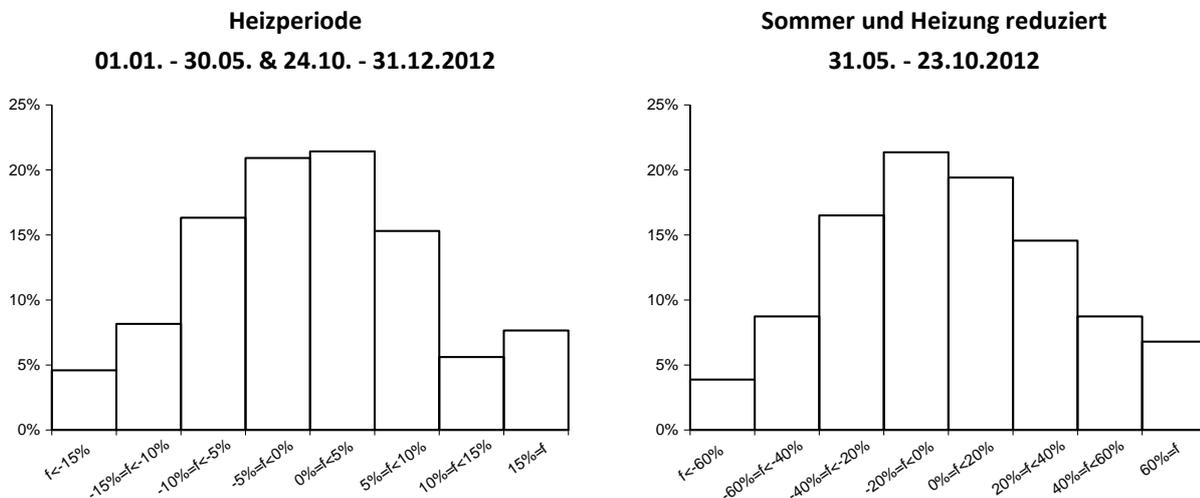


Abbildung 5-12: Relativer Vorhersagefehler mit der „Trend-Prognose“, Betrachtungszeitraum 7 Tage, Miesbach 2012

Wie schon erwähnt, ist neben dem absoluten Wärmeverbrauch insbesondere dessen zeitlicher Verlauf entscheidend. Während die gezapften Warmwassermengen meist in einem Bereich liegen, den der thermische Speicher ausgleichen kann, trifft dies für den Heizenergieverbrauch nicht zu. An kalten Tagen ist die Heizleistung teilweise größer als die thermische BHKW-Leistung. Der Speicher kann ein Gebäude ohne BHKW maximal zwei Stunden versorgen. Deshalb ist es notwendig, den Heiz- bzw. Wärmeverbrauch auch in seiner zeitlichen Auflösung möglichst genau zu prognostizieren.

Abbildung 5-13 illustriert den stündlichen Wärmeverbrauch, sprich den Heiz- und

Warmwasserverbrauch, in der ersten Januarwoche am Standort Miesbach im Jahr 2012. An allen Tagen tritt eine morgendliche Spitze ab 6.00 Uhr auf. Der Wärmeverbrauch geht dann tagsüber leicht zurück und steigt in den Abendstunden wieder an. Die Nachtabsenkung setzt ab 22.00 Uhr ein. Überlagert ist der Heizenergieverbrauch von den Warmwasserzapfungen, die den Wärmeverbrauch nachts und in den frühen Morgenstunden ausmachen. Darüber hinaus gibt es auch tagsüber einzelne größere Stundenwerte (Beispiel: 7. Januar, 10.00-11.00 Uhr), die mit größeren Zapfungen erklärt werden können.

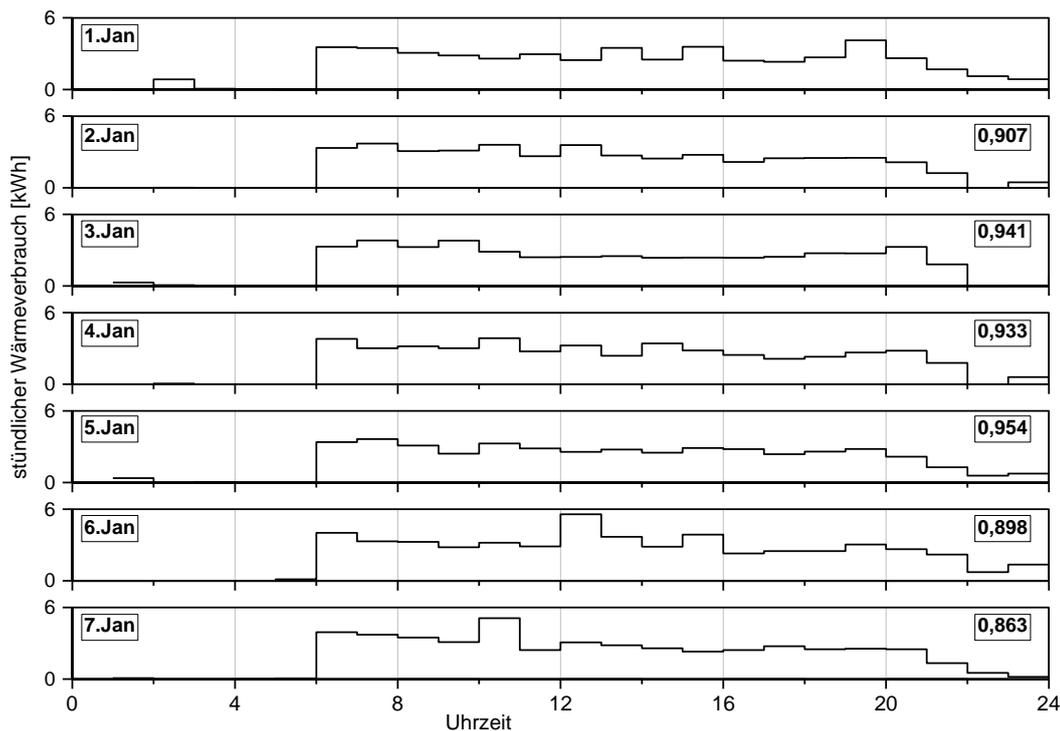


Abbildung 5-13: Stündlicher Wärmeverbrauch in der ersten Januarwoche, Miesbach 2012

Um die Ähnlichkeit dieser thermischen Lastgänge zu bestimmen, werden im Folgenden angelehnt an die Arbeit von Grohmann<sup>44</sup> [GRO 00] die Korrelationskoeffizienten ( $r_{d,d+1}$ ) zwischen den einzelnen Tagen berechnet. Wenn der Korrelationskoeffizient nahe +1 oder -1 ist<sup>45</sup>, gibt es einen linearen Zusammenhang der stündlichen Wärmeverbräuche  $Q_{d,h}$  und  $Q_{d+1,h}$ . Ist der Korrelationskoeffizient dagegen nahe null, sind die Wertepaare voneinander unabhängig [SAC 09].

$$r_{d,d+1} = \frac{\sum_{h=1}^{24} (Q_{d,h} - \bar{Q}_d) \times (Q_{d+1,h} - \bar{Q}_{d+1})}{\sqrt{\sum_{h=1}^{24} (Q_{d,h} - \bar{Q}_d)^2 \times \sum_{i=1}^{24} (Q_{d+1,h} - \bar{Q}_{d+1})^2}} \quad (5.13)$$

<sup>44</sup> Grohmann destilliert in seiner Arbeit aus einer Vielzahl verschiedener Lastgänge typische Lastverläufe. Um die Kurvenform zweier Lastgänge zu vergleichen, bedient er sich des Korrelationskoeffizienten.

<sup>45</sup> Ein Korrelationskoeffizient von -1 weist auf einen mathematischen Zusammenhang der Einzelwerte hin. Für die hier angestellten Betrachtungen ist ein hoher negativer Korrelationskoeffizient jedoch nicht nützlich.

Der Korrelationskoeffizient ist auch in Abbildung 5-13 für die jeweils benachbarten Tage angegeben. Sowohl der 4. als auch der 5. Januar, Tage die sich optisch sehr ähneln, haben einen Korrelationskoeffizienten von 0,954. Aber auch alle anderen Tage der ersten Januarwoche weisen Koeffizienten größer 0,86 auf. Betrachtet man ein ganzes Jahr (Abbildung 5-14), so kann festgehalten werden, dass benachbarte Tage jedoch nur während der Heizperiode korrelieren.

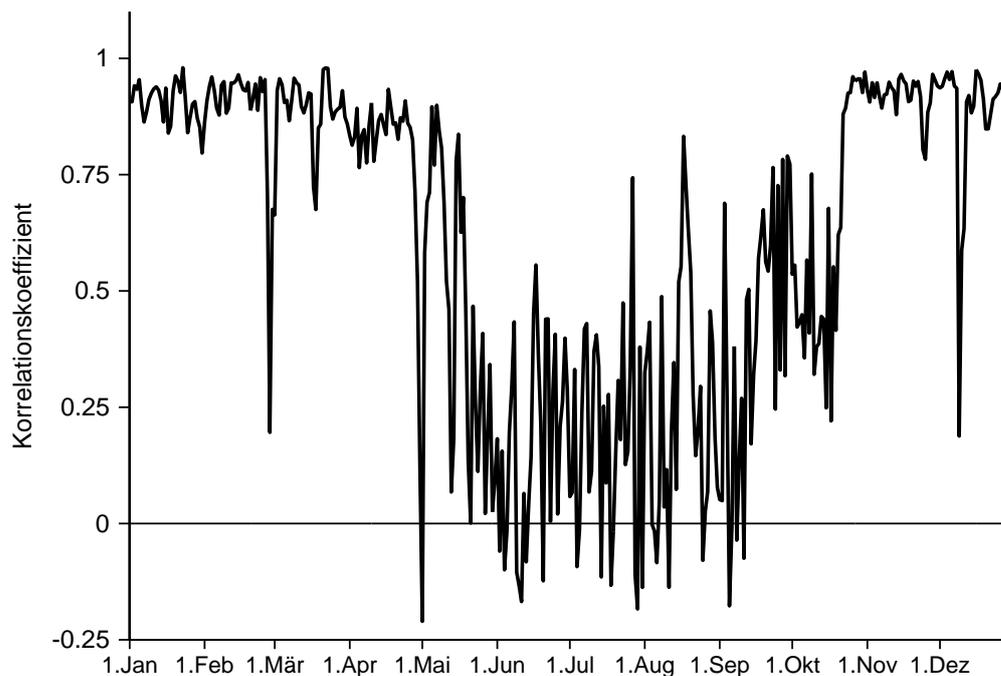


Abbildung 5-14: Korrelationskoeffizienten des Wärmeverbrauchs, Miesbach 2012

Da, wie oben erwähnt, der thermische Speicher in den meisten Fällen sowohl den Zeit- als auch den Amplitudenfehler in den Sommermonaten ausgleichen kann, wirken sich die geringe Korrelation der einzelnen Tage und die damit verbundene schlechte Prognose weniger stark aus als in der Heizperiode. In letztgenannter erreichen dagegen fast die Hälfte der Tage Korrelationskoeffizienten über 0,90 und fast drei Viertel über 0,80. Eine auf dem vergangenen Tag beruhende stündliche Wärmebedarfsschätzung kann folglich den zeitlichen Verlauf ausreichend genau prognostizieren. Tabelle 5-4 fasst die Korrelation benachbarter Tage für die Heizperiode und für das ganze Jahr nochmals zusammen.

Tabelle 5-4: Überblick über die Korrelationskoeffizienten des Wärmeverbrauchs in Miesbach

	Mittelwert	Median	Anzahl der Werte größer 0,9	Anzahl der Werte größer 0,8
Heizperiode	0,81	0,89	45 %	72 %
Jahr 2012	0,57	0,74	23 %	47 %

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es verschiedene Wärmeprognosemöglichkeiten gibt. Je nach Gebäude und Nutzerverhalten variiert der Einfluss des saisonalen und/oder periodischen Wärmeverbrauchs. Sehr wichtig für eine bestmögliche Prognose ist es, Änderungen an der Heizungsanlage (bspw. Heizung-AN oder -AUS) auf die BHKW-Steuerung zu übertragen, damit diese entsprechende Modifizierungen sofort verarbeiten kann und den Betrachtungszeitraum ggf. neu wählt.

### 5.3 Speicherkapazität

Der minimale Speicherinhalt, der notwendig, ist um die thermische Last jederzeit decken zu können, wird definiert als das in Kapitel 4.3 gefundene theoretische Minimum (1,0 kWh) plus eine Mindestenergiemenge. Für Tage, die wärmer als 15 °C sind, entspricht die Mindestenergiemenge dem halben Tageswarmwasserverbrauch (3,3 kWh). Für kältere Tage muss infolge des erhöhten Heizenergieverbrauchs mehr Wärme vorgehalten werden.

Die in Kapitel 3.4 und Kapitel 4.5 beschriebenen Typtagversuche haben gezeigt, dass der minimale Speicherinhalt an den Übergangstagen nur leicht gegenüber dem Sommerbetrieb ansteigen muss. Erst bei sehr niedrigen Temperaturen steigt die Heizkreisvorlauftemperatur über den Warmwassersollwert. Für die kälteren Tage wird ein etwas größerer Speichermindestfüllstand benötigt, da die morgendlichen Zapfungen zeitgleich mit der Morgenspitze auftreten.

Wie man aus den Typtagversuchen ablesen kann, sind für den Typtag 10 °C 5 kWh und für den Typtag 0 °C 8 kWh ausreichend. Die Speicherminima für die restlichen Tage werden zwischen den festgelegten Werten interpoliert:

$$E_{Sp,min} = 4,3 \text{ kWh} \quad \text{für } T_A \geq 15 \text{ °C} \quad (5.14)$$

$$E_{Sp,min} = -0,14 \times T_A + 6,4 \text{ [kWh]} \quad \text{für } 15 \text{ °C} < T_A \leq 10 \text{ °C} \quad (5.15)$$

$$E_{Sp,min} = -0,3 \times T_A + 8 \text{ [kWh]} \quad \text{für } 10 \text{ °C} < T_A \leq 0 \text{ °C} \quad (5.16)$$

$$E_{Sp,min} = 8 \text{ kWh} \quad \text{für } T_A < 0 \text{ °C} \quad (5.17)$$

Bei abweichenden Komfortbedürfnissen, höheren oder niedrigeren Heizkreissolltemperaturen, einer anderen Bewohneranzahl etc. müssen auch andere Mindestenergien vorgehalten werden. Im Feldversuch in Miesbach ist die Speicherenergie auf zwei Personen ohne Vollbad ausgelegt, weshalb geringere Mindestenergien als hier definiert auftreten (vgl. hierzu nochmals Abbildung 4-16).

Wie in Kapitel 4.1 gezeigt, ist der Speicherinhalt durch die maximal möglichen BHKW-Temperaturen nach oben beschränkt. Weiterhin steigen die Verluste bei sehr hohen Speicherinhalten stark an (Abbildung 4-15). An Sommertagen ist der Wärmebedarf vergleichsweise gering, womit der maximale Speicherenergieinhalt ( $T_A \geq 15 \text{ °C}$ ) auf 20 kWh begrenzt werden kann. Da an sehr kalten Tagen ( $T_A < 5 \text{ °C}$ ) einerseits höhere Temperaturen benötigt werden und andererseits die Speicherverluste als „Kellerheizung“ angesehen werden können, kann der maximale Speicherinhalt als Obergrenze herangezogen werden. Für die übrigen Außentemperaturen wird  $E_{Sp,max}$  zwischen 20 und 25 kWh interpoliert.

$$E_{Sp,max} = 20 \text{ kWh} \quad \text{für } T_A \geq 15 \text{ °C} \quad (5.18)$$

$$E_{Sp,max} = -0,5 \times T_A + 27,5 \text{ [kWh]} \quad \text{für } 15 \text{ °C} < T_A \leq 5 \text{ °C} \quad (5.19)$$

$$E_{Sp,max} = 25 \text{ kWh} \quad \text{für } T_A < 5 \text{ °C} \quad (5.20)$$

Abbildung 5-15 illustriert die Speichergrenzen bzw. die Speicherkapazität in Abhängigkeit der mittleren Tagesaußentemperatur. Die sich aus der Differenz von maximalem und minimalem Speicherinhalt ergebende Speicherkapazität liegt zwischen 15,7 kWh und 18 kWh, was in etwa zwei WG-BHKW-Betriebsstunden entspricht.

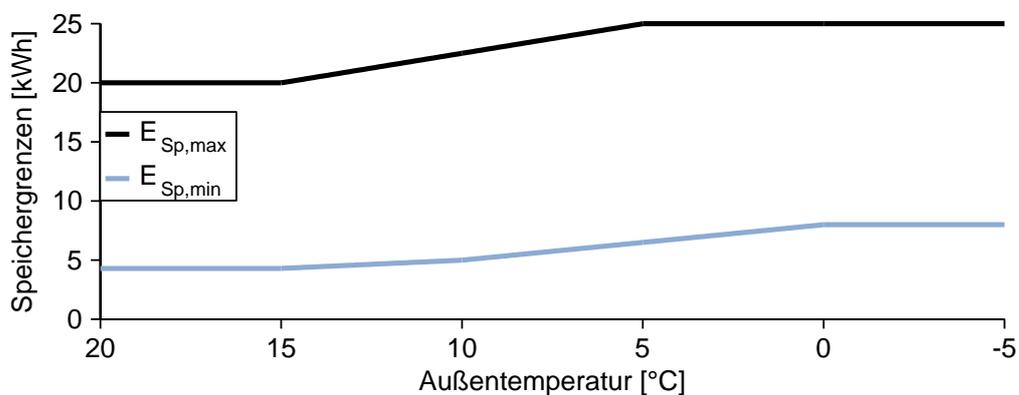


Abbildung 5-15: Minimaler und maximaler Speicherenergieinhalt in Abhängigkeit der Außentemperatur

## 6. BHKW-Einsatzplanung und Regelung

In Kapitel 5 wurden die drei für die Optimierung notwendigen Randbedingungen hergeleitet. Der EEX-Preis dient in diesem Kapitel als Grundlage einer Optimierung, durch die die erzielten Erlöse maximiert werden sollen. Die Wärmebedarfsprognose bildet zusammen mit der maximalen Speicherkapazität die Basis für die Einsatzplanung.

Das Ergebnis der Optimierungsrechnung sind ein Einsatzplan für das BHKW (Fahrplan) sowie eine Vorgabe über den zeitlichen Verlauf des Speicherinhalts (Speichereinsatz) (Kap. 6.1). Die für die Umsetzung des BHKW-Fahrplans programmierte Regelung (Kap. 6.2) wurde darauf ausgelegt, dass diese auch bei Prognoseabweichungen so reagiert, dass Strom während möglichst hoher Börsenpreise erzeugt wird und der BHKW-Betrieb effizient bleibt (Kap. 6.3), d.h. die Mindestzyklendauer nicht unterschritten und die Pausendauer eingehalten wird. Im Ablaufdiagramm der Abbildung 6-1 sind die nachfolgend näher zu betrachtenden letzten Schritte hin zur flexiblen Stromerzeugung hervorgehoben.

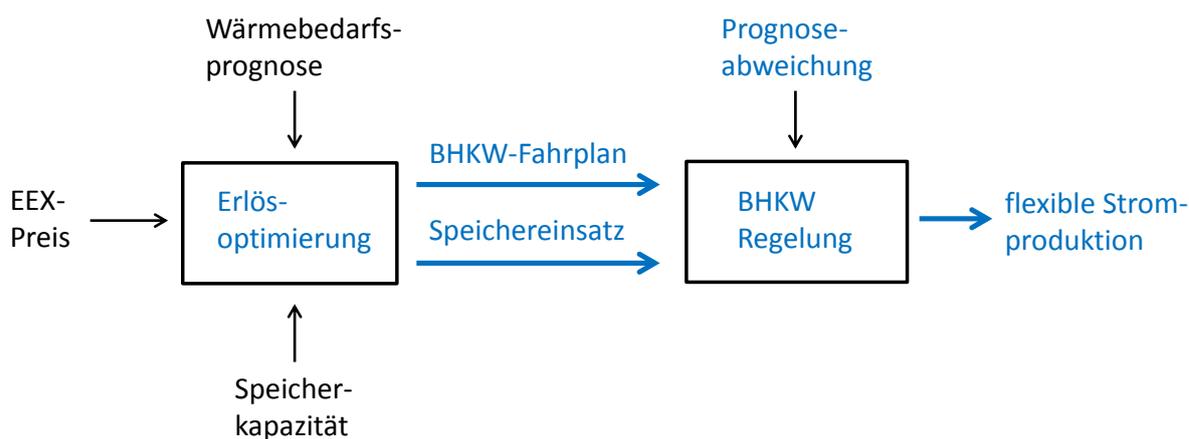


Abbildung 6-1: Ablaufdiagramm des Prozesses hin zur flexiblen Stromproduktion mit Fokus auf Erläsoptimierung, Einsatzpläne, BHKW Regelung inkl. Prognoseabweichung

### 6.1 BHKW- und Speicher-Einsatzplanung

Für die BHKW- und Speichereinsatzplanung wurden insgesamt drei aufeinander aufbauende Szenarien entwickelt:

In Szenario 1 werden die in Kapitel 5 definierte Speicherkapazität und Wärmebedarfsprognose eingesetzt, um die Stromerzeugung zu flexibilisieren. Ausgehend von feststehenden Speicherstart- und Speicherendbedingungen wird der Gesamterlös maximiert.

Wie sich zeigen wird, kann in Szenario 1 der Strom nicht immer während der höchsten Preise erzeugt werden. Genau an dieser Stelle setzt Szenario 2 an: Wie in Kapitel 3.4 dargelegt wurde, hat der Speicherfüllstand zu Beginn des Tages einen starken Einfluss auf die Stromerzeugung und folglich auch auf die Erlöse. Die Idee von Szenario 2 ist es demnach, den Speicherinhalt zu Beginn des Messtages so festzulegen, dass Strom während der höchsten Preise erzeugt werden kann. Damit nur die Stunden mit

Preisspitzen ausgewählt werden, wird der Zeitschritt der Optimierung von drei Minuten auf eine Stunde vergrößert und die Zielgröße so angepasst, dass das BHKW durchschnittlich maximale Erlöse erzielt.

Das dritte Szenario basiert auf zwei Überlegungen, welche in den vorangehenden Szenarien noch nicht berücksichtigt wurden. Erstens: Da der Speicherinhalt am Ende des Tages dem Speicherinhalt zu Beginn des nächsten Tages entspricht, ist die Flexibilität der einzelnen Tage bei einem größeren Betrachtungszeitraum geringer als bei einer Einzeltagsoptimierung. Zweitens besteht aufgrund der voneinander abweichenden Strompreise der aufeinanderfolgenden Tage (vgl. Abbildung 5-4) die Möglichkeit, dass bei einer Erweiterung des Betrachtungszeitraums bzw. durch die gezielte Stromproduktionsverlagerung auf einen anderen Tag insgesamt höhere Erlöse erzielt werden können.

Tabelle 6-1 fasst die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale der drei Szenarien zusammen.

**Tabelle 6-1: Speicherinhalt und Zielgröße der drei Szenarien**

	<b>Szenario 1</b>	<b>Szenario 2</b>	<b>Szenario 3</b>
<b>Zielgröße</b>	Gesamterlöse	durchschn. Erlöse	durchschn. Erlöse
<b>Speicherinhalt zu Beginn und am Ende des Tages</b>	$E_{Sp,Start} = E_{Sp,Ende}$	variabel	$E_{Sp,Start,d+1} = E_{Sp,Ende,d}$
<b>Wärmeerzeugung</b>	= Bedarf	< Bedarf	≈ Bedarf
<b>Zeitschritt <math>\Delta t</math> [h]</b>	0,5 / 0,05	1	0,1

In allen Szenarien errechnet sich der Speicherinhalt der Zeitschritte aus dem vorangegangenen Inhalt abzüglich des geplanten Wärmeverbrauchs (Heizung und Warmwasser) und der Speicherverluste (Formel (4.10)). Falls das BHKW in Betrieb sein sollte, wird die Wärmeenergie, die das BHKW im stationären Betrieb durchschnittlich erzeugt (7,6 kWh/h; vgl. Fußnote 40, S. 126), hinzuaddiert:

$$E_{Sp,n+1} = E_{Sp,n} - Q_{Verbrauch} - Q_{Speicherverlust} + Q_{th,BHKW} \quad (6.1)$$

$$\text{mit } Q_{Speicherverlust} = 0,0065 \times E_{Sp,n} \times \frac{\Delta t}{1h} + 0,088 \text{ kWh} \times \frac{\Delta t}{1h} \quad (6.2)$$

$$Q_{th,BHKW} = 0 \text{ kWh} \quad \text{für BHKW - AUS} \quad (6.3)$$

$$Q_{th,BHKW} = 7,6 \text{ kWh} \times \frac{\Delta t}{1h} \quad \text{für BHKW - AN} \quad (6.4)$$

Die Randbedingungen, welche der Optimierungsalgorithmus einhalten muss, betreffen die Speichergrenzen, die Anfahrtstrafkosten und die Mindestlauf- bzw. Mindestpausenzeit des BHKW: Der geplante Speicherinhalt muss jederzeit innerhalb der in Kapitel 5.3 definierten Speichergrenzen liegen. Um Taktbetrieb zu vermeiden und einen möglichst effizienten BHKW-Betrieb zu erreichen, wird das Starten mit Strafkosten belegt. Es stellte sich heraus, dass Strafkosten von 1 €ct je Anfahrtvorgang einen

guten Kompromiss zwischen wenigen BHKW-Zyklen und Erlösmaximierung darstellen. Die BHKW-Mindestlauf- bzw. Mindestpausenzeit wurde auf größer-gleich eine Stunde gesetzt.

Die Optimierung erfolgt mit Hilfe des Excel-Solvers. Als Lösungsmethode wurde der evolutionäre Algorithmus [NIS 97] verwendet. Dieser verbessert kontinuierlich durch Mutation, Rekombination und Selektion die Ergebnisse der Optimierungsfunktion. Aufgrund der Nichtlinearität des Optimierungsproblems sowie der binären Entscheidung (BHKW AN/AUS) ist der evolutionäre Algorithmus für die Szenarien praktikabel. Eine Optimalitätsgarantie (globaler Extremwert) kann wegen des Adaptionsprozesses zwar nicht gewährleistet werden, die folgenden Ergebnisse weisen jedoch eine mehr als ausreichende Qualität auf. Der im Allgemeinen hohe Rechenaufwand dieses Optimierungsalgorithmus wird durch eine geeignete Wahl der Startwerte reduziert.

### 6.1.1 Szenario 1: $E_{Sp,Start} = E_{Sp,Ende}$

Eine Maximierung der erzielbaren Erlöse ergibt sich einerseits durch Stromerzeugung zu Höchstpreiszeiten; andererseits lassen sich die Erlöse auch steigern, wenn das BHKW möglichst lange betrieben wird. Allerdings soll in Szenario 1 nur so viel Wärme erzeugt werden, wie auch verbraucht wird, woraus folgt, dass der Startwert des Speicherinhalts gleich dem Endwert sein muss. Dieser wurde als Mittelwert des Speicherminimal- und Speichermaximalinhalts festgelegt:

$$E_{Sp,soll,Start} = E_{Sp,soll,Ende}^* = \frac{E_{Sp,min} + E_{Sp,max}}{2} \quad (6.5)$$

Der Speicherinhalt zu Beginn des Tages ( $E_{Sp,soll,Start}$ ) wird als Startwert in der Optimierungsrechnung herangezogen. Der Sollendwert wird hingegen als zusätzliche Randbedingung berücksichtigt. Jedoch kann der Speicherendwert aufgrund der diskreten Schritte nicht exakt erreicht werden. Ein an die Schrittweite angepasster Zielkorridor muss folglich definiert werden als:

$$E_{Sp,soll,Ende,min/max} = E_{Sp,soll,Start} \pm \frac{\Delta t}{1h} \times \frac{7,6 kWh}{2} \quad (6.6)$$

Die Einsatzplanung erfolgt anschließend in zwei Stufen: Zuerst beträgt die Schrittweite 30 Minuten. Die Erlöse ergeben sich aus der Summation des Produkts aus Stromerzeugung und EEX-Preis, abzüglich der Strafkosten für die Anfahrvorgänge:

$$\left( \sum_{i=1}^{48} EEX-Preis_i \times W_{el,i} \right) - K_S = max! \quad (6.7)$$

Anschließend wird die Schrittweite auf drei Minuten verringert und dementsprechend der Speicherzielbereich verkleinert. Die zusätzliche oder wegfallende Stromerzeugung findet an den Rändern der zuerst definierten BHKW-Zyklen unter Berücksichtigung der Randbedingungen statt. Tabelle 6-2 zeigt die Speichersollinhalte zu Beginn bzw. am Ende des Tages sowie – nochmals zum Vergleich – die in Kapitel 5.3 bestimmten Speichergrenzen aller Typtage:

**Tabelle 6-2: Speichergrenzen und Speichersollinhalte in Szenario 1**

Tag	Sommer	15 °C	10 °C	5 °C	0 °C
$E_{Sp,min}$ [kWh]	4,3	4,3	5	6,5	8
$E_{Sp,max}$ [kWh]	20	20	22,5	25	25
$E_{Sp,soll,Start}$ [kWh]	12,15	12,15	13,75	15,75	17,5
$E_{Sp,soll,Ende,min/max}$ [kWh]	12,15 ±0,19	12,15 ±0,19	13,75 ±0,19	15,75 ±0,19	17,5 ±0,19

Abbildung 6-2 veranschaulicht beispielhaft für den Typtag 5 °C die Einsatzplanung: Das obere Diagramm zeigt den Strompreis und den stündlich prognostizierten Wärmeverbrauch. Im mittleren Bereich wird der Sollspeicherfüllstand zu Beginn und am Ende des Tages illustriert. Die untere (6,5 kWh) und obere (25 kWh) Speichergrenze sind durch die Randbedingung festgelegt. Ganz unten in Abbildung 6-2 ist das Ergebnis der BHKW-Einsatzplanung („BHKW-Betriebszeiten“ in rot) und der zu dieser gehörige Speichersollinhalt (blaue Kurve) abgebildet. Das Resultat verdeutlicht, dass das BHKW immer dann läuft, wenn der EEX-Preis hoch ist. Zudem werden die Speichergrenzen eingehalten und der Speicherfüllstand erreicht am Ende des Tages den Zielbereich.

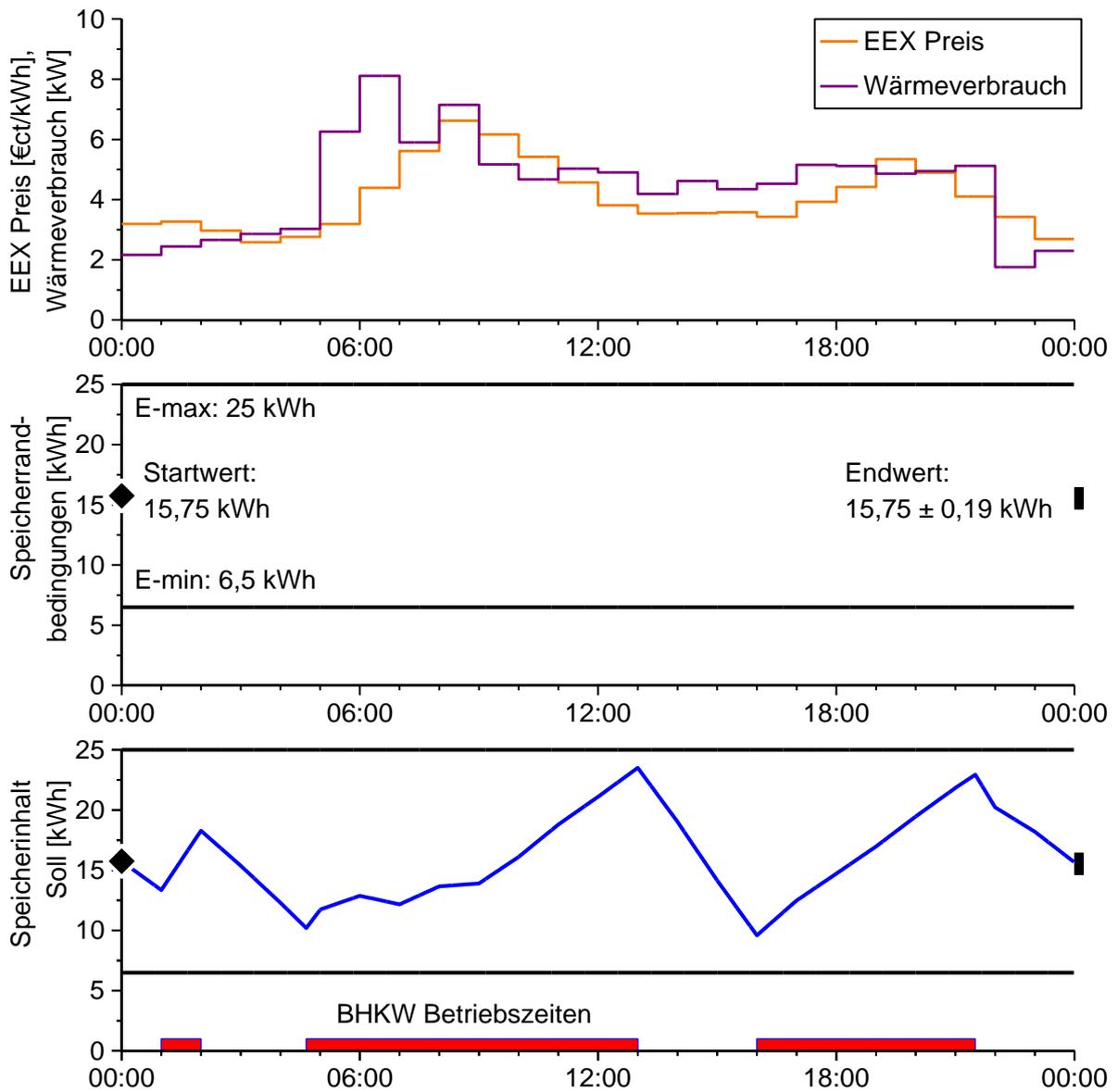


Abbildung 6-2: Fahrplanerstellung Szenario 1, Typtag 5 °C

Die BHKW-Einsatzpläne (Fahrpläne) der anderen Typtage veranschaulicht Abbildung 6-3. Hierbei wird ersichtlich, dass an allen Typtagen eine Stromerzeugung zwischen 8.00 und 9.11 Uhr sowie zwischen 19.00 und 20.00 Uhr erfolgt. Im Sommer läuft das BHKW ausschließlich morgens und abends zu diesen Strompreisspitzen-Zeiten. Mit fallender Außentemperatur werden allmählich auch die angrenzenden Bereiche mit mittleren oder niedrigeren Preisen ausgegeben. Um die thermische Last decken zu können, wird für die Typtage 10 °C und 5 °C ein dritter BHKW-Zyklus, jeweils zwischen 1.00 und 2.00 Uhr notwendig. Am Typtag 0 °C ist die Nachfrage so groß, dass das BHKW nur einmal starten muss.

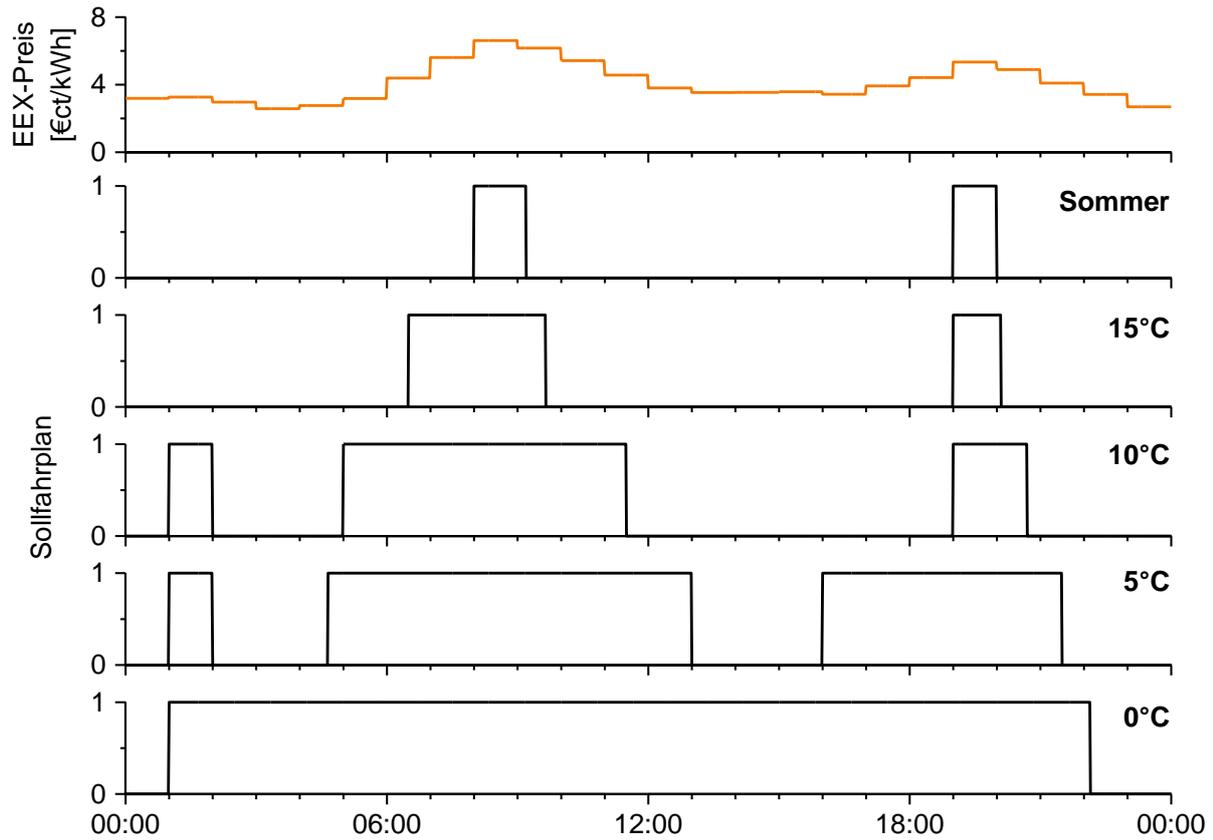


Abbildung 6-3: Sollfahrpläne der Typtage (Szenario 1)

Die erzielbaren Erlöse steigen mit der BHKW-Laufzeit. Da jedoch die jeweiligen Stundenpreise mit zunehmender Laufzeit sinken, ist der mittlere Preis am Sommertypstag am höchsten. Tabelle 6-3 stellt die Erlöse, die durchschnittlichen Erlöse und die (theoretisch) maximal möglichen Erlöse mit „unendlich großem“ Speicher für die einzelnen Typtage einander gegenüber.

Tabelle 6-3: Strompreiserlöse in Szenario 1

Typtag	Sommer	15 °C	10 °C	5 °C	0 °C	24 h
Erlös [€ct]	13,20	24,28	45,75	68,11	88,70	97,44
durchschn. Erlös [€ct/kWh]	6,00	5,71	4,97	4,59	4,19	4,06
durchschn. Erlös <sub>theo, max</sub> [€ct/kWh]	6,32	5,92	5,25	4,68	4,25	4,06
Erlös / Erlös <sub>theo, max</sub> [%]	94,9	96,5	94,7	98,1	98,6	-

### 6.1.2 Szenario 2: $E_{Sp,Start}$ variabel

Im Hinblick auf maximale Strompreise und die Takthäufigkeit (zwei Starts beim Sommertypstag, jeweils drei Starts bei den Typtagen 10 °C und 5 °C) wird in Szenario 1 noch kein optimaler BHKW-Betrieb erreicht. In Abbildung 6-4 wird der Sollfahrplan für den Sommertypstag und der dazugehörigen Speicherinhalt aus Szenario 1 dargestellt. Am Sommertag beträgt die thermische Sollproduktion 16,56 kWh. Da der Speicher morgens zur Strompreisspitze noch relativ „voll“ ist, kann die erforderliche Wärme nicht in einem BHKW-Zyklus erzeugt werden. Das BHKW muss abends ein zweites Mal starten. Auch der thermische Speicher kann in diesem Szenario nicht optimal ausgenutzt werden. Die berechnete Speicherkapazität, also die Differenz aus maximalem und minimalem Speicherinhalt, beträgt 7,57 kWh, was in etwa einer BHKW-Betriebsstunde entspricht.

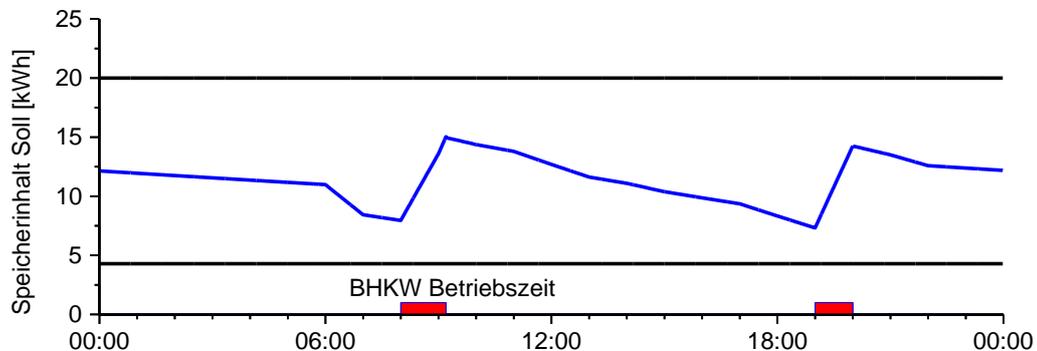


Abbildung 6-4: Sollfahrplan und Speichersollinhalt, Typtag Sommer, Szenario 1

Damit in nur einem BHKW-Zyklus die an diesem Tag benötigte Wärme erzeugt werden kann, müsste das BHKW sehr viel später starten, was wiederum geringere Erlöse zur Folge hätte. Um letzteres zu vermeiden, muss der Speicherinhalt zu Beginn des Tages in die Optimierung integriert werden. Am Beispieltag könnte dies dazu führen, dass der Speicher zu Beginn des Tages deutlich „leerer“ wäre, was zur Konsequenz hätte, dass das BHKW in nur einem Zyklus und zur (morgentlichen) Strompreisspitze die an diesem Tag benötigte Wärme erzeugen kann.

Lässt man jedoch die Speicherinhalte zu Beginn und am Ende des Tages offen, würde bei einer Maximierung der Gesamterlöse immer ein trivialer Fall eintreten: Der Speicher ist morgens leer und abends voll. Um dies zu umgehen, wird die Zielgröße im zweiten Szenario als Maximierung des durchschnittlichen Erlöses definiert:

$$\frac{\sum_{i=1}^{24} (EEX \text{ Preis}_i \times W_{el,i}) - K_S}{\sum_{i=1}^{24} W_{el,i}} = \max! \quad (6.8)$$

Um einen möglichst effizienten BHKW-Betrieb zu gewährleisten, wird die BHKW-Startanzahl in der Heizsaison auf zwei und außerhalb der Heizperiode auf einen Start begrenzt. Dafür werden die Strafkosten in Szenario 2 ausgehend von 1 €ct so lange erhöht, bis die maximale Startanzahl nicht mehr überschritten wird.

Bei dem gewählten Zeitschritt von einer Stunde liefert die Kostenoptimierung einen BHKW-Fahrplan mit maximalen Durchschnittserlösen. Der dazugehörige Speichersollinhalt ist jedoch nicht eindeutig. Unter verschiedenen Startbedingungen können die gleichen Erlöse erzielt werden (siehe Abbildung 6-5). Damit die Speicherverluste möglichst klein sind, wird derjenige Sollspeicherinhaltsverlauf ausgewählt, der den kleinsten Speicher(start)inhalt aufweist.

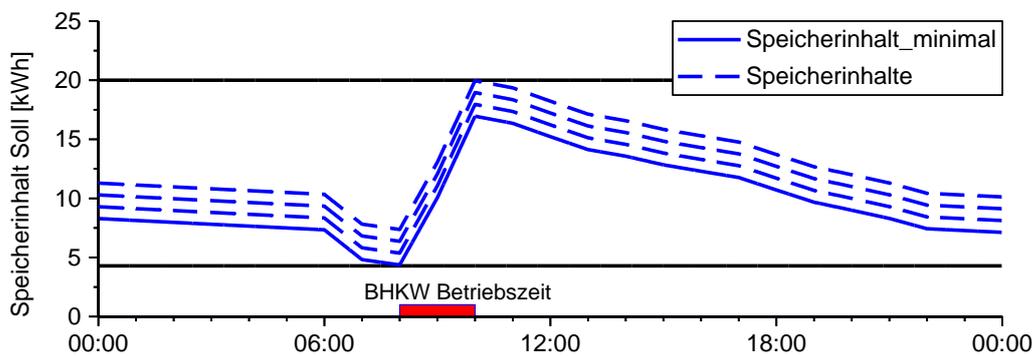


Abbildung 6-5: Verschiedene Speicherinhalte bei gleicher BHKW Betriebszeit, Typtag Sommer, Szenario 2

Die Überprüfung der Zielvorgabe von Szenario 2, namentlich Strom in den Stunden der höchsten Strompreise zu erzeugen, wird in Abbildung 6-6 demonstriert. Die Diagramme zeigen den sortierten EEX-Preis und die für den jeweiligen Typtag geplanten Betriebsstunden. Es wird ersichtlich, dass die höchsten Preise an allen Typtagen erzielt werden können. Am Sommertypstag läuft das BHKW nur während der beiden Stunden mit den höchsten Preisen. Am Typtag 15 °C werden die drei höchsten sowie der fünfhöchste Preis vom BHKW abgedeckt. Erst an kälteren Tagen wird auch an Stunden Strom erzeugt, an denen der Strompreis kleiner als 5 €ct/kWh ist. Zusätzlich wird am Typtag 10 °C eine Stunde lang Strom bei 3,19 €ct produziert. An den beiden kältesten Typtagen läuft das BHKW wegen des hohen Wärmebedarfs auch bei niedrigen Preisen. Trotzdem kann das BHKW in den ersten neun (Typtag 5 °C) bzw. 16 (Typtag 0 °C) profitabelsten Stunden Strom erzeugen.

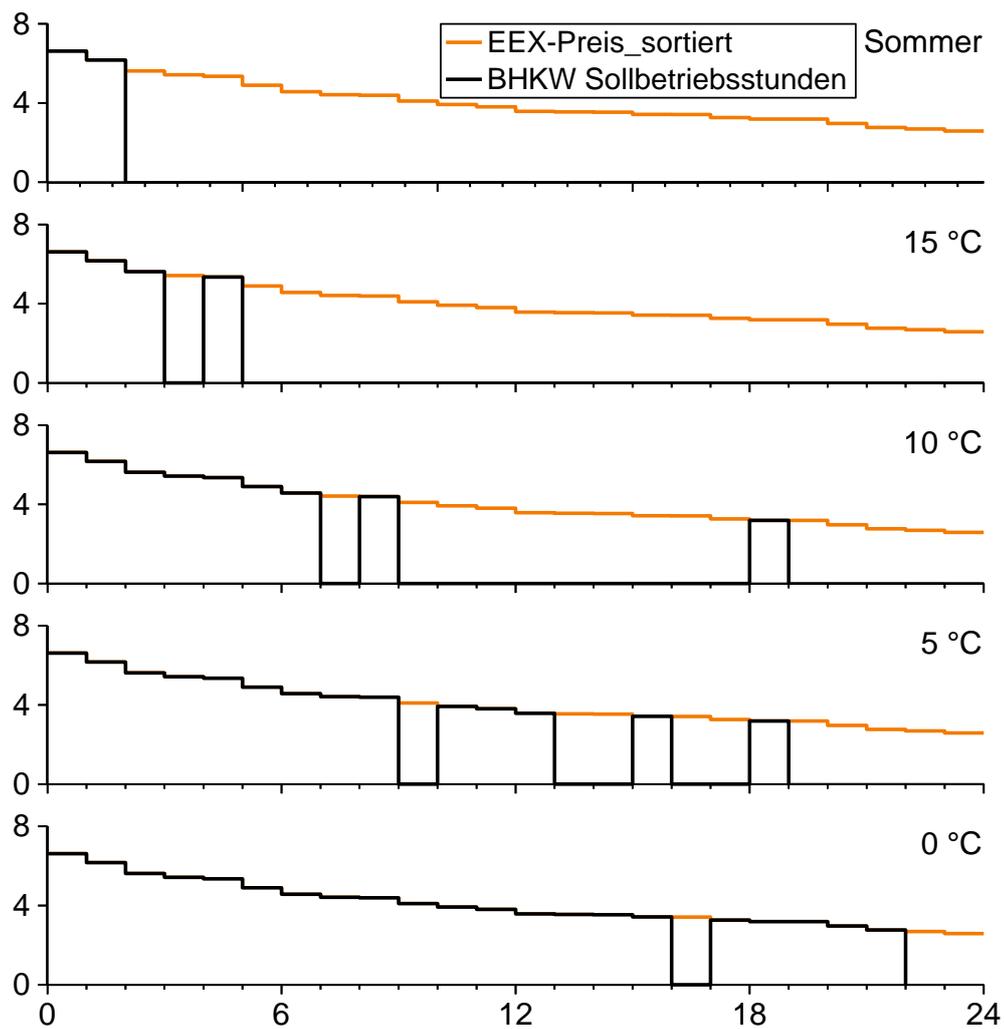


Abbildung 6-6: Stromproduktion während hoher Börsenstrompreise, Szenario 2

Durch den variablen Speicherinhalt zu Beginn des Messtages und die reduzierte Laufzeit bei niedrigen Börsenpreisen kann der durchschnittliche Erlös in Szenario 2 im Vergleich zu Szenario 1 nochmals gesteigert werden (Tabelle 6-4). Es zeigt sich, dass der (theoretische) maximale Erlös nahezu erreicht wird. Zusätzlich kann festgehalten werden, dass die hohen Erlöse nur durch die optimierte BHKW- und Speichereinsatzplanung ermöglicht wurden. Ein größerer Speicher würde dagegen kaum mehr zusätzlich positive Effekte herbeiführen.

Tabelle 6-4: Geplante Strompreiserlöse in Szenario 2

Typtag	Sommer	15 °C	10 °C	5 °C	0 °C
durchschn. Erlös [€ct/kWh]	6,40	5,94	5,14	4,67	4,23
Steigerung gg. Szenario 1 [%]	6,67	4,03	3,42	1,74	0,95
durchschn. Erlös <sub>theo,max</sub> [€ct/kWh] <sup>46</sup>	6,40	5,96	5,27	4,75	4,26
Erlös / Erlös <sub>theo,max</sub> [%]	100,0	99,7	97,5	98,3	99,3

Der zeitliche Verlauf der BHKW-Fahrpläne wird in Abbildung 6-7 dargestellt. Neben den höheren Erlösen wird auch die Startanzahl im Vergleich zu Szenario 1 reduziert sowie die Länge der BHKW-Zyklen erhöht.

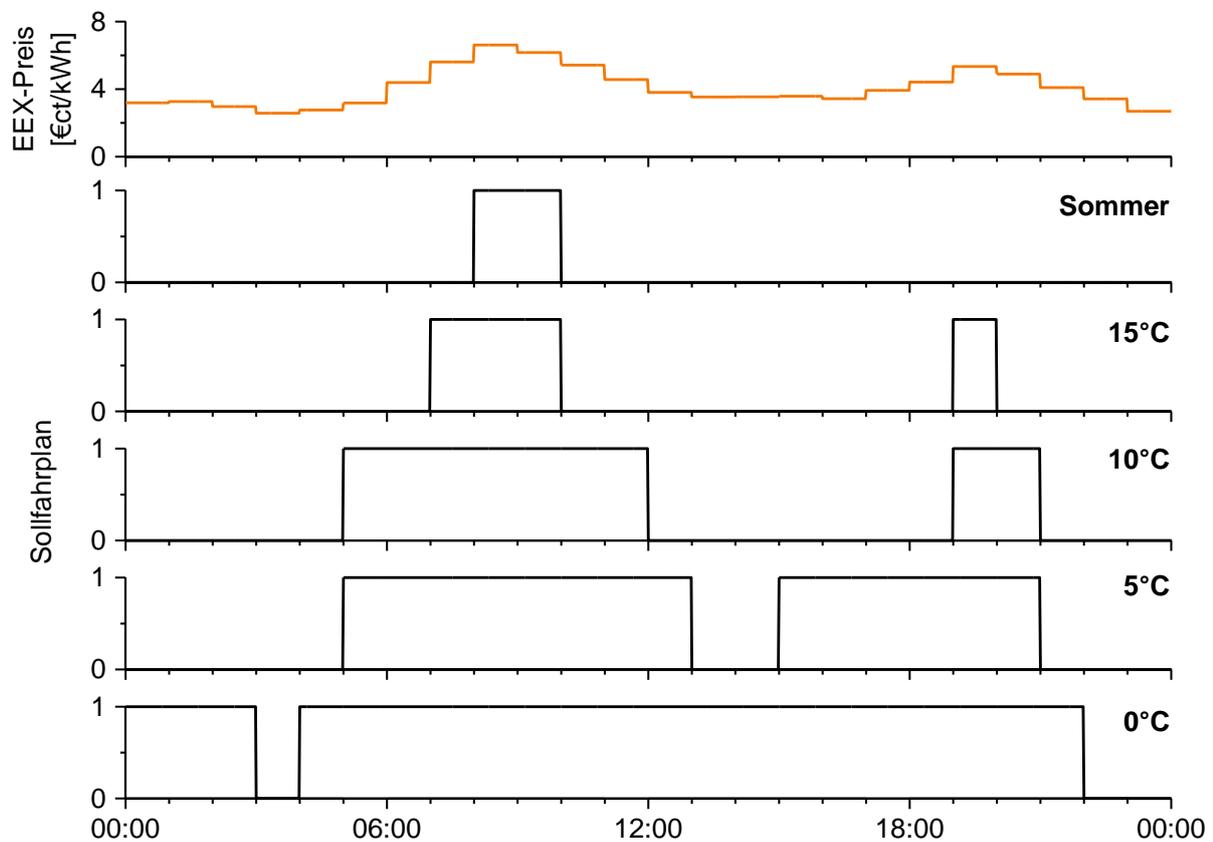


Abbildung 6-7: Sollfahrpläne der Typtage, Szenario 2

<sup>46</sup> Da sich im Vergleich zu Szenario 1 die Berechnung der BHKW-Laufzeit ändert bzw. letztgenannte sinkt, ändert sich bzw. steigt auch der (theoretisch) maximal erzielbare Erlös.

Die dazugehörigen Speichereinhalte zeigt Abbildung 6-8. Im Vergleich zu Szenario 1 steigt die Speicherausnutzung stark an. Bei den Typtagen Sommer und 5 °C nimmt die zusätzliche verwendete Speicherkapazität um jeweils mehr als 4 kWh zu (Tabelle 6-5).

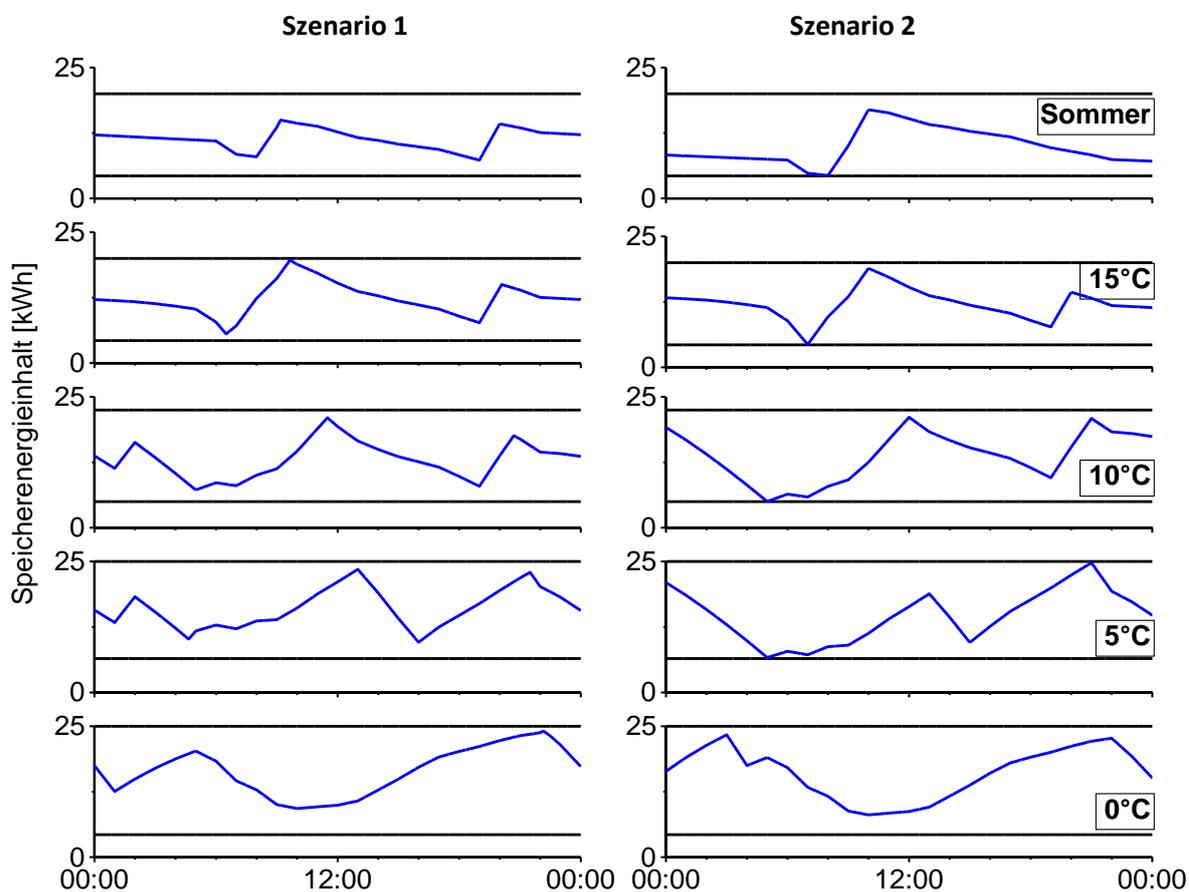


Abbildung 6-8: Speichersollinhalt an den Typtage in den Szenarien 1 und 2

Tabelle 6-5: Speicherausnutzung in Szenario 1 und Szenario 2

	Szenario 1			Szenario 2			Vergleich der beiden Szenarien	
	$E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max}$ [kWh]	$E_{Sp,verwendet}$ [kWh]	$E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max}$ [kWh]	$E_{Sp,verwendet}$ [kWh]	$\Delta E_{Sp,verwendet}$ [kWh]	$\Delta E_{Sp,verwendet}$ [%]
<b>Sommer</b>	7,33	15,04	7,71	4,38	16,96	12,58	4,87	+63,2
<b>15 °C</b>	5,58	19,67	14,09	4,38	18,91	14,53	0,44	+3,12
<b>10 °C</b>	7,23	21,02	13,79	5,03	21,12	16,09	2,30	+16,7
<b>5 °C</b>	9,60	23,51	13,91	6,69	24,77	18,08	4,17	+30,0
<b>0 °C</b>	9,31	24,08	14,77	8,09	23,40	15,31	0,54	+3,66

Die größere Speicherausnutzung bringt das KWK-System jedoch auch näher an die Speichergrenzen. Während bei Szenario 1 die Sollspeichereinhalte meist einen vergleichsweise großen Abstand zu den

Speichergrenzen aufweisen, wird in Szenario 2 der Speicher fast komplett genutzt. Tabelle 6-6 gibt die prognostizierten Abstände zu den Speichergrenzen wieder. Wegen der oben erläuterten Reduzierung der Speicherverluste wird in Szenario 2 der minimale Speicherinhalt fast immer erreicht, während der Abstand in Szenario 1 deutlich größer ist. Ein anderes Bild ergibt sich für die obere Speichergrenze. Diese wird in Szenario 1 bei den Typtagen 15 °C und 0 °C beinahe erreicht, während in Szenario 2 außer an Typtag 5 °C die Differenz zur Obergrenze jederzeit größer einer Kilowattstunde ist.

Tabelle 6-6: Abstände zu den jeweiligen Speichergrenzen

	Szenario 1		Szenario 2	
	$\min(E_{Sp,soll}) - E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max} - \max(E_{Sp,soll})$ [kWh]	$\min(E_{Sp,soll}) - E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max} - \max(E_{Sp,soll})$ [kWh]
<b>Sommer</b>	3,03	4,96	0,08	3,04
<b>15 °C</b>	1,28	0,33	0,08	1,09
<b>10 °C</b>	2,23	1,48	0,26	1,39
<b>5 °C</b>	3,10	1,49	0,19	0,23
<b>0 °C</b>	1,31	0,92	0,09	1,60

### 6.1.3 Szenario 3: Fahrplan unter Berücksichtigung des Folgetags

Wegen des Verlaufs des ausgewählten EEX-Preises ist das Optimierungsergebnis, mit Ausnahme von Typtag 0 °C, ein zu Beginn des Tages ausreichend geladener Speicher, der den Wärmeverbrauch während der Nachtabsenkung bzw. Stromtiefpreisphase deckt. In Szenario 2 ist der Speicherfüllstand am Ende des Tages wegen der Maximierung der Durchschnittserlöse tendenziell niedrig. Da der Endwert des Vortags dem Speicherstartwert entspricht, wird der betrachtete Zeithorizont in Szenario 3 vergrößert. Dies ist insbesondere von Nöten, da neben den Tagesschwankungen des Strompreises auch der aktuelle bzw. kommende Wochentag (vgl. Abbildung 5-4) einen starken Einfluss auf den Preis hat. Folgt beispielsweise ein Sonn- oder Feiertag, könnte es sinnvoll sein, den Speicher abends möglichst voll zu laden, um Tiefpreise zu vermeiden und insgesamt höhere Erlöse zu erzielen.

Abbildung 6-9 zeigt ein exemplarisch ausgewähltes Sommerwochenende von Freitag, den 24. August bis einschließlich Montag, den 27. August 2012. Der Base-EEX-Preis sinkt von 5,31 €/kWh über 3,91 €/kWh am Samstag auf 2,02 €/kWh am Sonntag. Erst am Montag steigt der Preis wieder auf 4,36 €/kWh an.

Eine Einzeltagoptimierung (Zeitschritt: 6 min) wie im zweiten Szenario, jedoch mit festem Startwert ab Tag 2, ergibt den in Abbildung 6-9 oben dargestellten BHKW-Fahrplan und den zugehörigen Speichersollinhalt. Erweitert man den Optimierungszeitraum auf vier Tage, stellt sich ein anderes Ergebnis ein (Abbildung 6-9, unten). Auf den ersten Blick ist der Unterschied zwischen den jeweiligen Einsatzplänen gering. Von den insgesamt fünf BHKW-Zyklen sind der erste und die letzten beiden identisch. Der zweite und dritte BHKW-Zyklus verschieben sich zeitlich nach vorne (in den Vortag) in

Richtung höherer Strompreise. In den insgesamt 528 BHKW-Betriebsminuten steigt der Erlös von 45,17 €ct bei der Einzeltagoptimierung auf 49,47 €ct (+9,52 %), wenn alle vier Tage gemeinsam betrachtet werden.

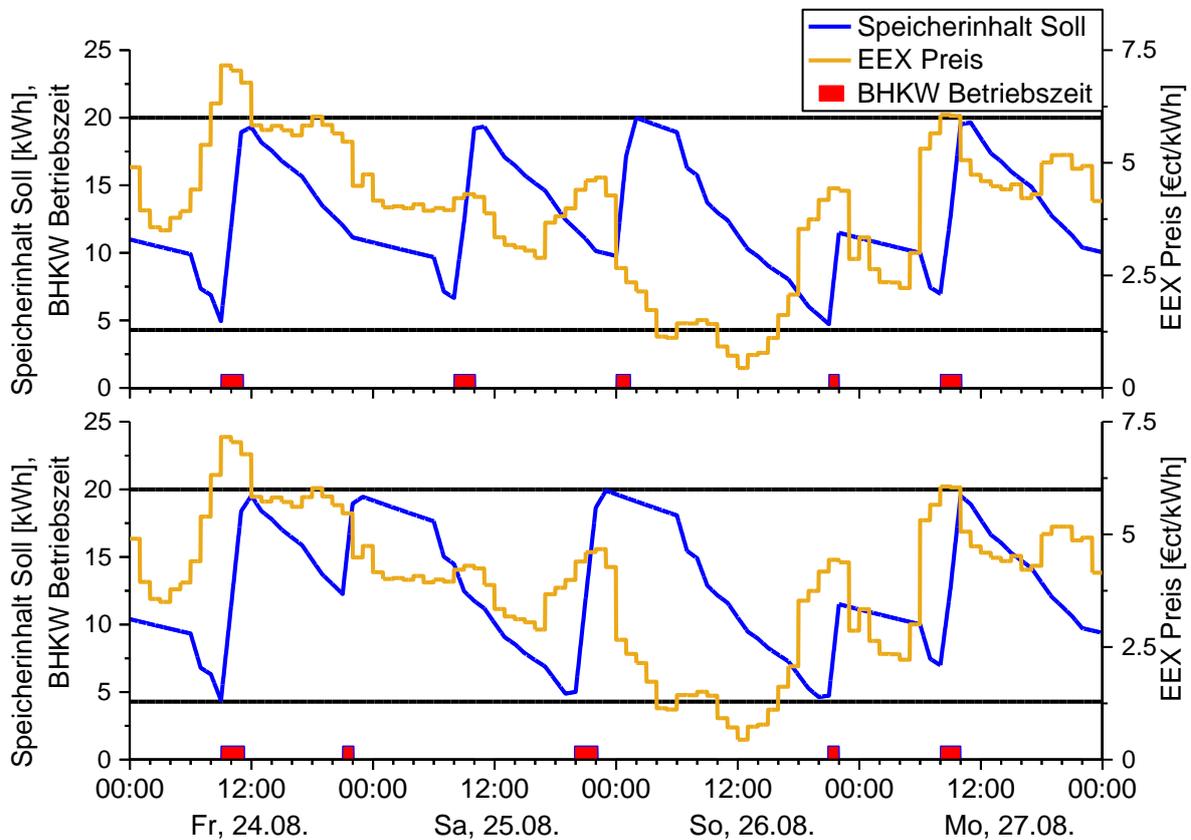


Abbildung 6-9: EEX Preis, Fahrplan und Speicherinhalt an einem Sommerwochenende

Die EEX-Preise werden für den Folgetag zwischen 12.00 und 13.00 Uhr veröffentlicht. Demzufolge ist eine 4-Tages-Optimierung wie oben dargestellt nicht realisierbar. Da die durch den Speicher hervorgerufene maximale zeitliche Verschiebung selbst im Sommer nur wenige Stunden betrifft, reicht es aus, wenn der aktuelle Fahrplan abends (am besten vor der Abendspitze) erstellt wird. Die in Abbildung 6-9 auftretenden Fahrplanverschiebungen können mit einem Zeithorizont von sechs Stunden problemlos durchgeführt werden, weshalb sich eine Vermessung des dritten Szenarios am Prüfstand erübrigt.

## 6.2 Intelligente BHKW-Regelung

Ein optimierter BHKW-Betrieb macht nur Sinn, wenn die Regelung den erstellten Fahrplan auch umsetzen kann. Sind die BHKW-Regelung und die Optimierung nicht aufeinander abgestimmt, kann es zu Komforteinbußen, geringen Erlösen oder sogar zu einem BHKW-Stillstand in Zeiten höchster EEX-Preise kommen.

### 6.2.1 Aufgaben der BHKW-Regelung

Der durch den Optimierungsalgorithmus entwickelte BHKW-Fahrplan wird an die BHKW-Regelung übergeben. Ihre Aufgabe ist es, diesen möglichst genau einzuhalten und auch bei auftretenden Prognoseabweichungen möglichst hohe Erlöse zu erzielen.

Je komplexer der BHKW-Fahrplan entworfen wird, desto schwieriger wird es, diesen im realen Betrieb einzuhalten. Zum einen, weil die Fahrplanerstellung auf diversen Annahmen beruht. Zum anderen, da durch die optimierte Fahrplanerstellung, insbesondere in Szenario 2, das Mikro-KWK-System stärker „ausgereizt“ wird. Der Speicherinhalt erreicht häufig seine Grenzen; fast die gesamte Speicherkapazität wird genutzt. Am Beispiel des Sommertages von Szenario 1 und Szenario 2 lässt sich dies verdeutlichen: Eine Abweichung des Wärmeverbrauchs ergibt am Sommertag des ersten Szenarios (Abbildung 6-4) weder Komfortverluste noch eine Nichteinhaltung des Fahrplans. In Szenario 2 würde hingegen ein kleiner Mehrverbrauch zur Unterschreitung des minimalen Speicherinhalts führen (Abbildung 6-8).

Weiterhin ist zu bedenken, dass die für den BHKW-Fahrplan definierten Bedingungen unterschiedliche Auswirkungen auf den thermischen Komfort und die wirtschaftlichen Erlöse haben. Eine kurzfristige Unterschreitung des minimalen Speicherinhalts  $E_{Sp,min}$  wird der Hausbewohner in der Regel (außer er lässt gerade ein Vollbad ein) nicht bemerken. Eine Abweichung des Speicherinhalts vom Sollfahrplan innerhalb der Speichergrenzen hat hingegen keine Auswirkungen auf die Komfortbedürfnisse. Jedoch führt das Überschreiten des maximalen Speicherinhalts ( $E_{Sp,max}$ ) zum sofortigen Abschalten des BHKW und folglich zu verminderten Einnahmen.

Ferner ist zu beachten, dass bei Fahrplanabweichungen keine zusätzlichen Start- und Stoppvorgänge des Mikro-BHKW initiiert und die notwendigen Mindestlauf- bzw. Pausenzeiten eingehalten werden.

Zusammengefasst hat die implementierte BHKW-Regelung drei Hauptaufgaben:

- Einhaltung des Sollfahrplans
- Speichergrenzen beachten
- geplante Zyklenzahl nicht erhöhen

### 6.2.2 Einhaltung des Sollfahrplans bei Abweichungen

Um diese Aufgaben zu bewältigen wird bei Fahrplanabweichungen das BHKW nicht einfach zu- oder abgeschaltet, da dies sowohl die Zyklenzahl erhöhen als auch das Mindestlauf- bzw. Pausenzeitkriterium verletzen würde. Deshalb wird immer der gesamte Fahrplan betrachtet und dieser bei Bedarf angepasst. Notwendig dafür ist eine kontinuierliche Messung der auftretenden Abweichung ( $E_{Diff}$ ) zwischen dem aktuellen Speicherinhalt und dem dazugehörigen Sollwert der Speichereinsatzplanung:

$$E_{Diff} = E_{ist} - E_{soll} \quad (6.9)$$

Ist  $E_{Diff}$  von vornherein negativ, wird der BHKW-Fahrplan erweitert. Steht das BHKW still, wird der Fahrplan zeitlich nach vorne geschoben und das BHKW startet früher. Der neue Startzeitpunkt wird so gewählt, dass die Abweichung zum geplanten Startzeitpunkt abgebaut ist (Abbildung 6-10):

$$t_{verschiebung} = \frac{E_{Diff}}{\dot{Q}_{th,BHKW}} = \frac{E_{Diff}}{7,6 \text{ kW}} \quad (6.10)$$

Wird  $E_{Diff}$  während das BHKW in Betrieb ist negativ, stoppt das BHKW erst dann, wenn  $E_{Diff}$  größer gleich null ist. Durch die Fahrplanerweiterung kann sichergestellt werden, dass der Originalfahrplan erfüllt wird und gleichzeitig kein zusätzlicher BHKW-Start erfolgt. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass an den Rändern des Originalfahrplans der Strompreis höher ist als zu anderen (zufälligen) Zeitpunkten.

Ist  $E_{Diff}$  positiv, wird der BHKW-Fahrplan dagegen nicht verändert. Der Grund hierfür ist erstens die Einhaltung des Sollfahrplans. Zweitens besteht die Möglichkeit, dass bei der Prognose ein zeitlicher Fehler auftritt, der dann während der BHKW-Laufzeit korrigiert werden kann. Und falls drittens die obere Speichergrenze nicht erreicht wird, kann der Fahrplan auch bei geringerer Nachfrage eingehalten werden.

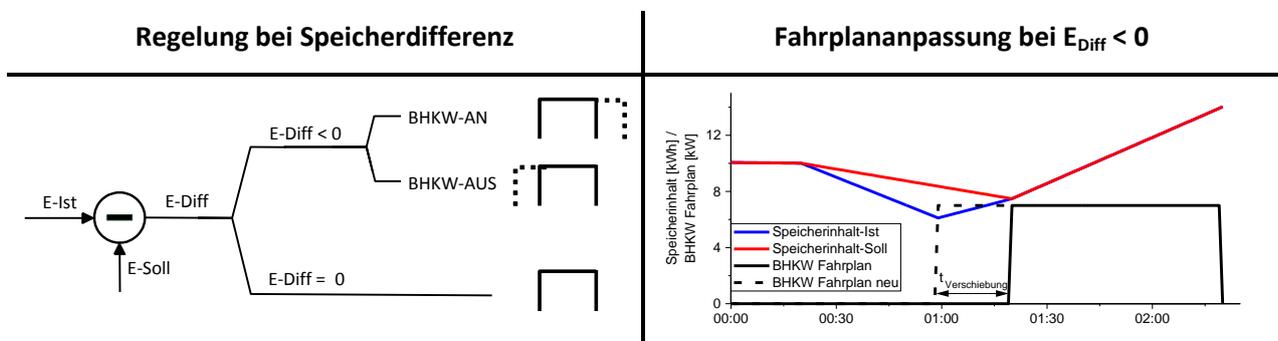


Abbildung 6-10: Regelverhalten einer Abweichung vom Sollspeicherenergieinhalt

### 6.2.3 Verletzung der Speichergrenzen

Noch wichtiger als die exakte Einhaltung des Fahrplans ist die Nichtüberschreitung der thermischen Speichergrenzen. Erreicht der Speicherfüllstand den Maximalwert ( $E_{Sp,max}$ ), muss das BHKW zwingend ausgeschaltet werden. Es müssen vier Bedingungen erfüllt sein, bis das BHKW wieder freigegeben wird; so wird verhindert, dass die obere Speichergrenze innerhalb kurzer Zeit erneut erreicht wird. Als erstes wird eine BHKW-Mindestpausendauer von einer Stunde abgewartet. Nach Ablauf dieser muss der Sollfahrplan eine Restlaufzeit von mindestens einer Stunde gewährleisten, damit es nicht zu einem kurzen und ineffizienten Zyklus kommt. Sollte der Speichermaximalwert aufgrund einer zu hohen Wärmebedarfsprognose erreicht werden, würde der Speicherfüllstand trotz Mindestpausenzzeit die Grenze bald wieder erreichen. Deshalb wird das BHKW erst freigeschaltet, wenn der Speicherinhalt kleiner dem Sollwert und geringer als das Speichermaximum abzüglich einer BHKW-Betriebsstunde ( $E_{Sp,max} - 7,6 \text{ kWh}$ ) ist.

Sollte der Speicherinhalt den unteren Speicherfüllstand erreichen, wird das BHKW sofort eingeschaltet. Auch beim Unterschreiten wird eine Mindestlaufzeit von einer Stunde erzwungen. Weiterhin wird der Einschaltbefehl erst zurückgesetzt, wenn die Speicherdifferenz positiv und die Differenz zum Speicherminimalinhalt größer 3,8 kWh ist. Sind diese Kriterien erfüllt, kann das BHKW ausgeschaltet werden, wenn die Mindestpausenzzeit größer als eine Stunde ist (Tabelle 6-7).

Sollte nach dem BHKW-Zwangsstart der Speicherinhalt weiter fallen, wird zusätzlich das Zusatzheizgerät bei  $\frac{E_{Sp,min}}{2}$  aktiviert und beim Erreichen von  $E_{Sp,min}$  zurückgesetzt.<sup>47</sup>

**Tabelle 6-7: Voraussetzungen zum Rücksetzen des Ausschalt- und Einschaltbefehls des BHKW**

$E_{Sp} > E_{Sp,max}$	$E_{Sp} < E_{Sp,min}$
$t_{Pause} > 1 \text{ h}$	$t_{Pause} > 1 \text{ h}$
$t_{BHKW,Restlaufzeit} > 1 \text{ h}$	$t_{BHKW,Restlaufzeit} > 1 \text{ h}$
$E_{Sp} < E_{Sp,soll}$	$E_{Sp} > E_{Sp,soll}$
$E_{Sp} < E_{Sp,max} - 7,6 \text{ kWh}$	$E_{Sp} > E_{Sp,min} + 3,8 \text{ kWh}$

<sup>47</sup> Je nach Wahl der unteren Speichergrenze sollte das Starten des ZHG früher bzw. später erfolgen.

## 6.3 BHKW-Stromproduktion bei Prognoseabweichungen

Im Folgenden wird gezeigt, wie sich Fehlprognosen auf den BHKW-Betrieb unter oben erläuteter Regelung auswirken. Wie in Kapitel 5.2 dargestellt, muss zwischen Amplituden- und Zeitfehlern unterschieden werden.

### 6.3.1 Veränderte BHKW-Stromproduktion bei Amplituden-Prognoseabweichungen

Da an kalten Tagen der Heizkreisverbrauch dominiert, wird für die folgenden Untersuchungen der Heizkreisverbrauch an den Typtagen 0 °C, 5 °C und 10 °C jeweils um 12,5 % (HK  $\pm$ 12,5 %) bzw. 25 % (HK  $\pm$ 25 %) verringert bzw. erhöht. Am Sommertypstag wird dagegen der Warmwasserverbrauch mit  $\pm$ 25 % (WW  $\pm$ 25 %) bzw.  $\pm$ 50 % (WW  $\pm$ 50 %) prozentual etwas stärker, absolut gesehen jedoch deutlich weniger variiert (vgl. Abbildung 5-12). Am Typtag 15 °C wird davon ausgegangen, dass sowohl der Heizenergieverbrauch als auch der Warmwasserverbrauch um 12,5 % und 25 % abweichen.

Abbildung 6-11 zeigt am Beispiel des Typtag 10 °C, wie sich die verschiedenen Verbrauchsabweichungen auf den Mikro-BHKW-Betrieb auswirken. Verglichen mit der perfekten Verbrauchsprognose (Basisfall aus Szenario 2, oberstes Diagramm in Abbildung 6-11) weisen die beiden linken Diagramme geringere und die beiden auf der rechten Seite höhere Verbräuche auf. Wird der Heizkreisverbrauch überschätzt, sinkt der Speicherinhalt langsamer als im Basisfall und umgekehrt. Auf den Startzeitpunkt des BHKW hat ein verminderter Verbrauch keinen Einfluss. Im Gegensatz dazu erreicht der Speicherinhalt bei höherem Verbrauch schon vor dem geplanten BHKW-Start die untere Speichergrenze und startet demzufolge früher (4.11 Uhr bei HK +25 % bzw. 4.34 Uhr bei HK +12,5 %).

Da der Heizkreisverbrauch in den beiden linken Diagrammen auch tagsüber unter dem geplanten Wert liegt, wird die obere Speichergrenze schon vor Ablauf des Sollbetriebs erreicht (11.10 Uhr bzw. 10.10 Uhr) und das BHKW abgeschaltet. In den beiden anderen Fällen stoppt das Mikro-BHKW um 12.16 Uhr bzw. um 12.37 Uhr, wenn die Speicherdifferenz abgebaut ist.

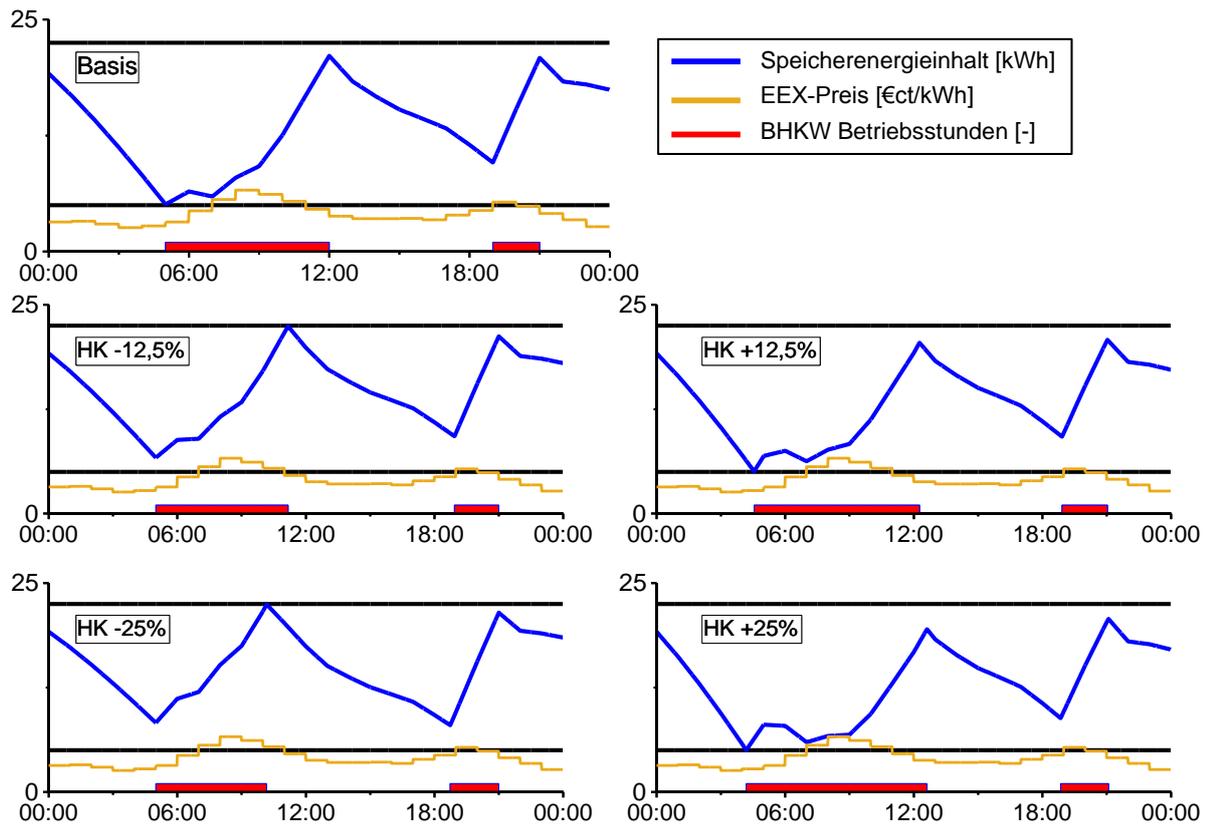


Abbildung 6-11: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Verbrauchsabweichung, Typtag 10 °C

Überraschenderweise startet der zweite BHKW-Zyklus in allen vier Fällen früher als im Basisfall. Bei geringerem Verbrauch ist der Speicherinhalt aufgrund des vorzeitigen Abschaltens im ersten BHKW-Zyklus kleiner als geplant, weshalb das BHKW vor 19.00 Uhr anfährt. Bei den Diagrammen mit höherem Verbrauch gilt das Gleiche wie im ersten Zyklus: Der höhere Verbrauch führt zu einem vorzeitigen Einschalten und zu einer länger andauernden Stromproduktion.

Die erzielten Erlöse sinken (steigen) zusammen mit der kürzeren (längeren) BHKW-Laufzeit (siehe Tabelle 6-8). Die bezogenen Erlöse sind bei der Verbrauchsüberschätzung sogar höher als im Basisfall. Grund hierfür ist das vorzeitige Abschalten im ersten BHKW-Zyklus bei relativ geringem EEX-Preis. Demgegenüber fallen aufgrund der niedrigeren Preise außerhalb der geplanten BHKW-Laufzeit die erzielten Durchschnittserlöse bei längerer Laufzeit von 5,14 €ct/h auf 4,98 €ct/h (HK +12,5 %) bzw. 4,86 €ct/h (HK +25 %).

Tabelle 6-8: Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, Typtag 10 °C

	HK -25%	HK -12,5%	Basis	HK +12,5%	HK +25%
<b>BHKW – Bh [h]</b>	7,43	8,23	9,00	9,83	10,67
<b>Erlös [€ct]</b>	38,3	42,7	46,2	49,0	51,8
<b>Erlös<sub>bez</sub> [€ct/kWh]</b>	5,16	5,19	5,14	4,98	4,86

An kälteren Tagen (Abbildung 6-12) führt eine Verbrauchsüberschätzung zu deutlich größeren Abweichungen. Da die absoluten Werte nun deutlich höher sind, wird die obere Speichergrenze in allen Fällen mit geringerem Verbrauch erreicht. Dies führt meist zu zusätzlichen BHKW-Zyklen, am Typtag 0 °C, HK -25 % beispielsweise zu drei zusätzlichen Starts und drei ungeplanten Stillstandszeiten. Diese verteilen sich relativ zufällig: Kurz nach 12.00 Uhr erreicht der Speicherinhalt das Maximum und das BHKW steht während eines niedrigen Preises still. Der zweite Stopp tritt dagegen genau zur Abendspitze auf.

Ist der Verbrauch größer als angenommen, fällt am Typtag 0 °C die morgendliche Pause weg; beim Typtag 5 °C ist dies erst bei +25 % Zusatzverbrauch der Fall. Am Typtag 0 °C, HK +25 % fällt der Speicherinhalt unter  $\frac{E_{Sp,min}}{2}$ , was zur Aktivierung des ZHG führt.

Die Erlöse (Anhang, Tabelle A-5 und Tabelle A-6) steigen wiederum mit der Betriebszeit. Die bezogenen Erlöse fallen bei Mehrverbrauch, da das BHKW auch während der Strompreistäler in Betrieb ist. Wegen des zufällig auftretenden BHKW-Abschaltens erhöhen sich die bezogenen Erlöse nicht bei einer Verbrauchsüberschätzung.

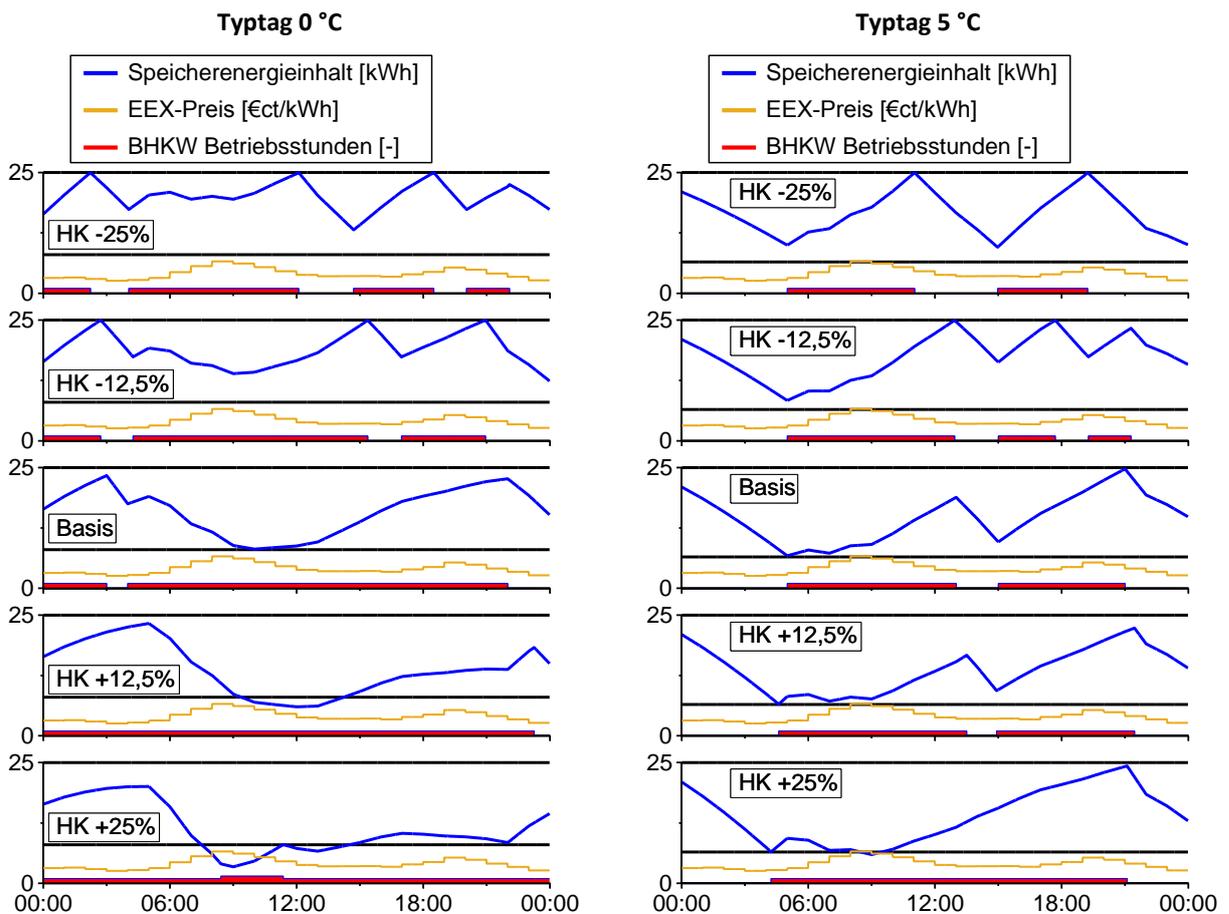


Abbildung 6-12: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Verbrauchsabweichung, Typtage: 0 °C und 5 °C

Ist am Typtag 15 °C (Abbildung 6-13, links) der Wärmeverbrauch geringer als angenommen, fällt der zweite BHKW-Zyklus weg, während der erste etwas früher stoppt. Dagegen steigt die Betriebszeit bei

erhöhtem Wärmeverbrauch in beiden Zyklen.

Am Sommertypstag (Abbildung 6-13, rechts) haben Fehlprognosen die geringsten Auswirkungen auf den BHKW-Betrieb. Bei Überschätzung läuft das BHKW genau wie geplant, nur der Speicherinhalt ist am Ende des Tages größer als angenommen. Bei Unterschätzung startet das BHKW früher, da die untere Speichergrenze vor dem Sollstart erreicht wird. Da die Speicherkapazität jedoch begrenzt ist, stoppt das BHKW in beiden Fällen (WW +25 % und WW +50 %) beim Erreichen der Speicherobergrenze.

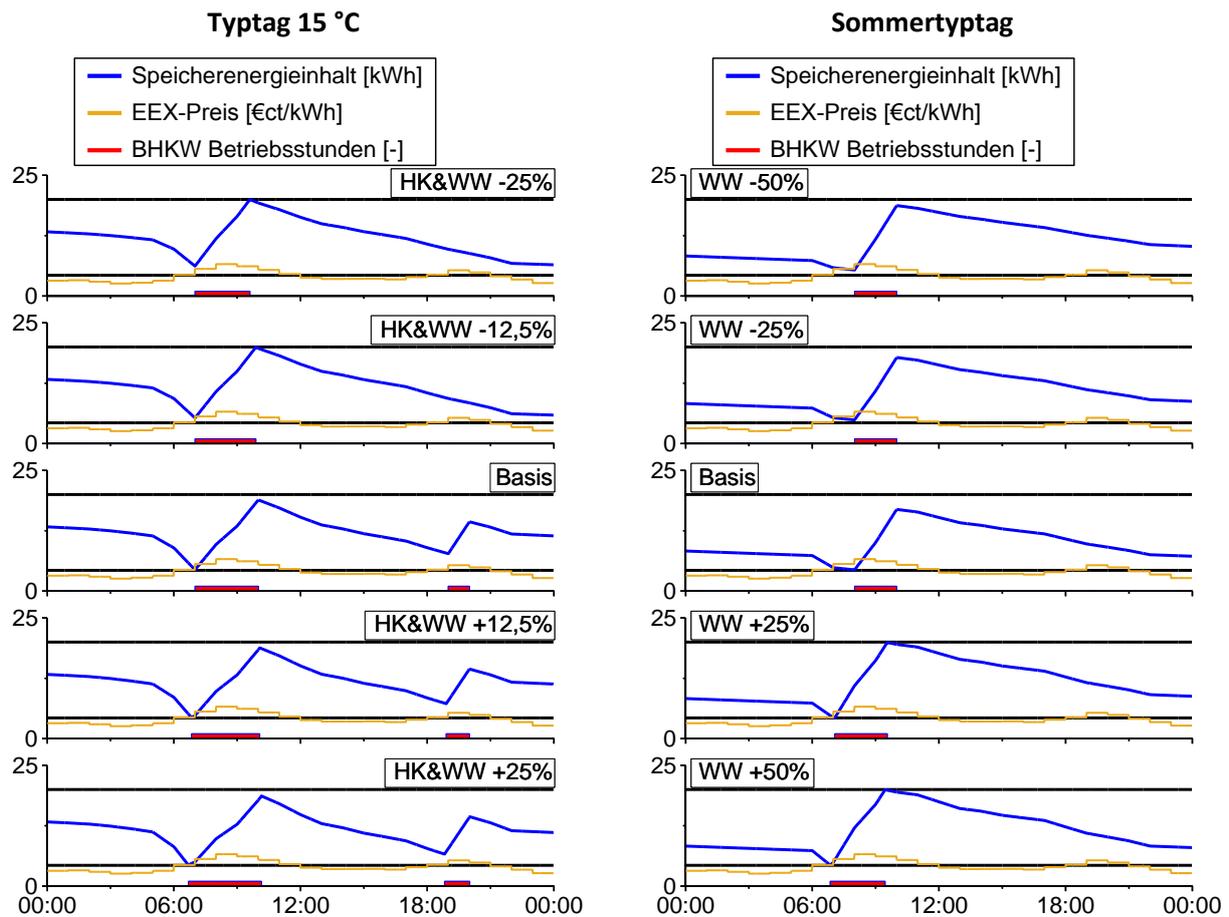


Abbildung 6-13: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Verbrauchsabweichung, Typtage: 15 °C und Sommer

Auch an den warmen Tagen (Anhang, Tabelle A-7 und Tabelle A-8) korrelieren die Erlöse mit der BHKW-Betriebszeit. Da der zweite BHKW-Zyklus (mit niedrigerem Preis) weggefallen ist, steigen die bezogenen Erlöse am Typtag 15 °C bei Verbrauchsüberschätzung sogar auf 6,13 €/kWh.

Zusammenfassend ergibt die theoretische Analyse, dass die entwickelte BHKW-Regelung Fehlprognosen meist gut ausgleichen kann. An Wintertagen kommt es jedoch bei einer Verbrauchsüberschätzung aufgrund des (mehrmaligen) Erreichens der oberen Speichergrenze zu zusätzlichen Starts und längeren (nicht einkalkulierten) Stillstandszeiten. An den Übergangs- und Sommertagen können kleine Fehlprognosen meist durch den Speicher aufgefangen und folglich der Fahrplan umgesetzt werden. Muss der Fahrplan zwingend eingehalten werden, sollte eine konservative Wärmebedarfsprognose gewählt werden, da bei positiver Abweichung der Sollfahrplan fast immer befolgt werden kann.

### 6.3.2 Veränderte BHKW Stromproduktion bei Zeitprognosefehlern

Neben dem Amplitudenfehler kann auch ein Zeit-Prognosefehler zu Abweichungen der geplanten BHKW-Stromproduktion führen. Da Heizkreis- und Zirkulationszeiten durch feste Zeiten konfiguriert sind,<sup>48</sup> werden an dieser Stelle nur die Warmwasserzapfungen zeitlich verändert. Die dazugehörigen Zapfmengen sind an kälteren Tagen im Vergleich zur Heizenergie vernachlässigbar, weshalb Zeitprognosefehler an dieser Stelle nur für die wärmeren Tage untersucht werden.

Grundlage für die folgenden Untersuchungen sind der in Szenario 2 gefundene Sollfahrplan und Sollspeicherinhalt. Für die Auswirkung eines auftretenden Zeitfehlers wird das Warmwasser an den Typtagen Sommer und 15 °C um eine, zwei und vier Stunden früher (WW -1h, WW -2h, WW -4h) bzw. später (WW +1h, WW +2h, WW +4h) gezapft. Abbildung 6-14 veranschaulicht die berechneten Veränderungen hinsichtlich Speicherinhalt und Stromproduktion am Sommertypstag.

Da bei der BHKW-Einsatzplanung der Sollspeicherinhalt zum Start des BHKW dem minimalen Speicherinhalt entspricht, führen vorzeitige Zapfvorgänge zu einer verfrühten Speicherinhaltsabsenkung und folglich zu einem BHKW-Start vor 8.00 Uhr. Da die gezapfte Menge jedoch nicht höher als geplant ist, wird die maximale Speichergrenze in den Fällen WW -1h und WW -2h vor dem Sollende erreicht. Bei der -4h Abweichung startet das BHKW auch über vier Stunden früher, weshalb die Mindestpausendauer bis zum geplanten Start größer einer Stunde ist. Es kommt zu einem zweiten BHKW-Zyklus. Dieser beginnt (wie geplant) um 9.00 Uhr und stoppt ebenfalls bei Erreichen der oberen Speichergrenze. Wegen des früheren Starts und dem Versuch den Sollfahrplan einzuhalten erhöht sich die BHKW-Laufzeit im Vergleich zum Referenzfall und folglich steigen auch die Gesamterlöse (Tabelle 6-9). Da die Stromproduktion bei den negativen Abweichungen während geringerer EEX-Preise stattfindet, sinkt der auf die Betriebsstunden bezogene Erlös mit dem Anwachsen des Zeitfehlers.

---

<sup>48</sup> Bei manchen Heizungsregelungen gibt es spezielle Wochenendkonfigurationen. Dies müsste in der Wärmebedarfsprognose berücksichtigt werden.

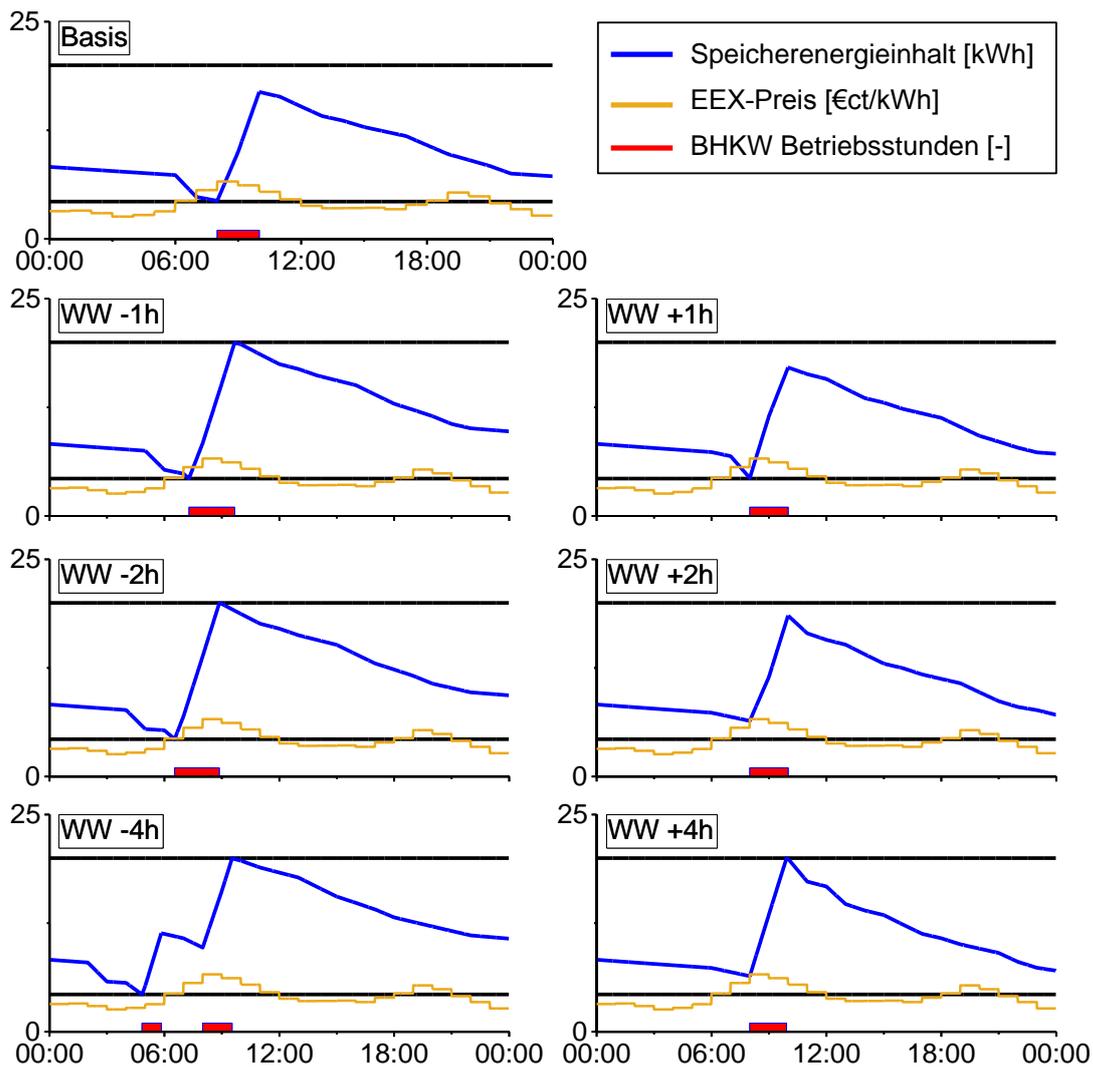


Abbildung 6-14: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Zeitfehler in der Prognose, Sommertypstag

Dagegen haben verspätete Zapfungen nur im dritten Beispiel (WW +4h) einen Einfluss auf die erzielten Erlöse. Bei den Versuchen WW +1h und WW +2h wird die minimale Speichergrenze später bzw. überhaupt nicht erreicht. Aufgrund der ausreichend großen Speicherkapazität können die geplanten Sollbetriebsstunden trotz Fehlprognose eingehalten werden. Bei der vierstündigen Verspätung WW +4h ist dies nicht mehr der Fall. Hier wird die obere Speichergrenze kurz vor Ablauf der Sollbetriebszeit erreicht, was zu einer kürzeren Laufzeit und folglich zu geringeren Erlösen führt. Da aber der EEX-Preis in der zweiten höher als in der ersten Sollbetriebsstunde ist, steigt der durchschnittliche Erlös leicht an.

Tabelle 6-9: Betriebsstunden und Erlöse bei Zeitabweichung, Sommertypstag

	WW -4h	WW -2h	WW -1h	Basis	WW +1h	WW +2h	WW +4h
<b>BHKW – Bh [h]</b>	2,53	2,33	2,38	2,00	2,00	2,00	1,92
<b>Erlös [€ct]</b>	13,03	13,41	14,76	12,79	12,79	12,79	12,28
<b>Erlös<sub>bez.</sub> [€ct/kWh]</b>	5,14	5,75	6,19	6,40	6,40	6,40	6,41

Am Typtag 15 °C treten bei einem Zeitfehler in der Prognose die gleichen Ergebnisse auf. Verfrühte Zapfungen erhöhen Laufzeit und Erlöse bei fallenden Durchschnittseinnahmen (Tabelle 6-10).

Tabelle 6-10: Betriebsstunden und Erlöse bei Zeitabweichung, Typtag 15 °C

	WW -4h	WW -2h	WW -1h	Basis	WW +1h	WW +2h	WW +4h
<b>BHKW – Bh [h]</b>	4,17	4,15	4,00	4,00	4,00	3,90	3,85
<b>Erlös [€ct]</b>	23,72	24,06	23,75	23,75	23,75	23,14	22,27
<b>Erlös<sub>bez.</sub> [€ct/kWh]</b>	5,69	5,80	5,94	5,94	5,94	5,93	5,79

Bei späteren Zapfungen wird ab zwei Stunden der maximale Speicherinhalt erreicht, weshalb sich Laufzeit, Erlöse und Durchschnittserlöse verringern. Auf den zweiten BHKW-Zyklus zwischen 20.00 und 21.00 Uhr hat eine Fehlprognose in keinem der untersuchten Fälle eine Auswirkung (Abbildung 6-15).

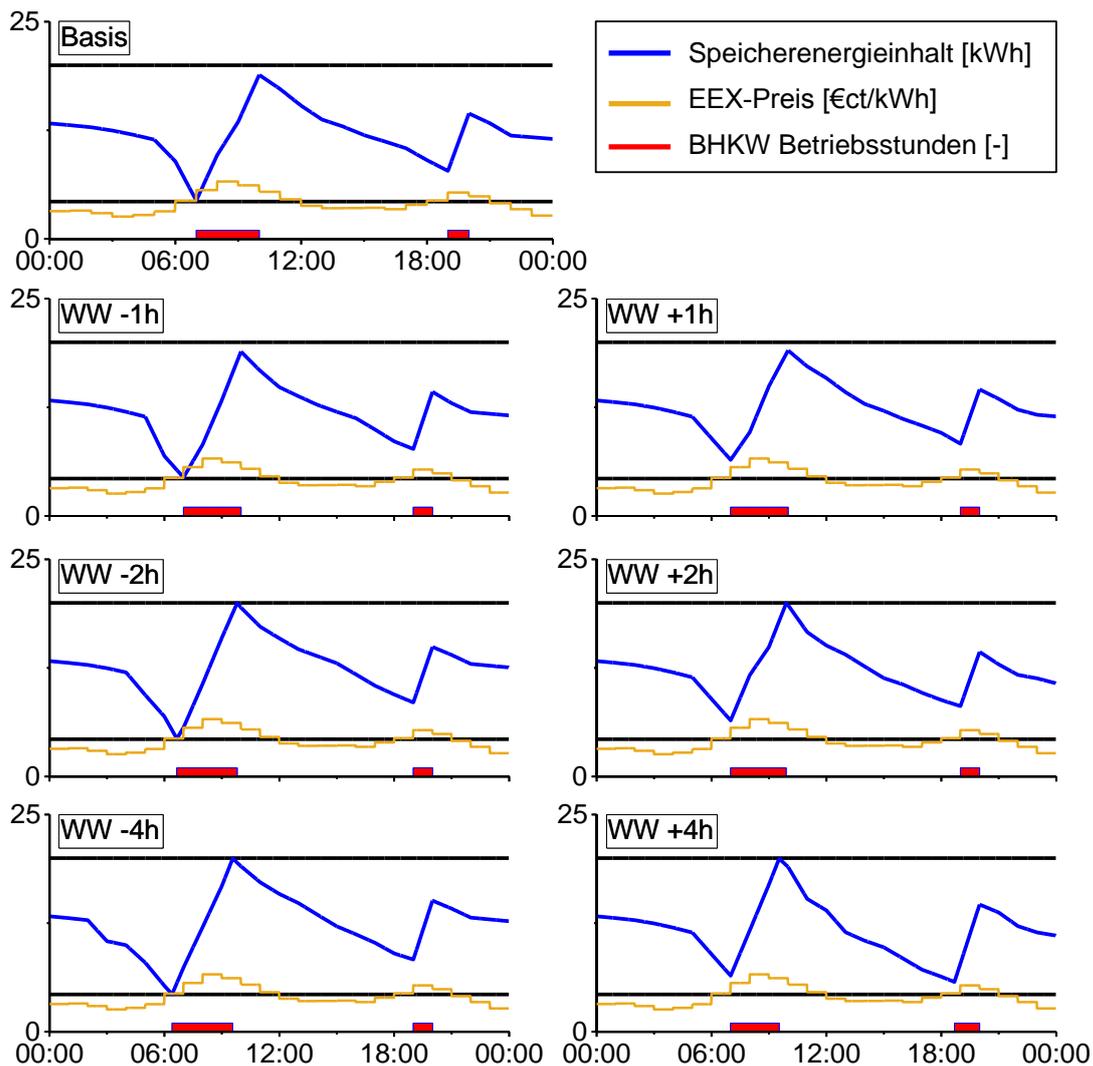


Abbildung 6-15: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Zeitfehler in der Prognose, Typtag 15 °C

Bei auftretenden Zeit-Prognosefehlern kann geschlussfolgert werden, dass sich erst bei Abweichungen größer zwei Stunden die BHKW-Stromproduktion nennenswert vom Sollbetrieb unterscheidet. Da ein Optimierungsergebnis aus Szenario 2 das Eintreten des minimalen Füllstands zum Zeitpunkt des BHKW-Starts ist, wirken sich vorzeitige Zapfungen hinsichtlich des Einhaltens des Sollfahrplans schwerwiegender aus als spätere Zapfungen. Bedenkt man jedoch die in den Prüfstandsmessungen auftretende Zeitverzögerung, welche verstärkt bei Warmwasserzapfungen zu beobachten ist (vgl. Kapitel 4.3), sollten sich verfrühte Zapfungen in den Prüfstandsmessungen nicht ganz so stark auswirken.

## 7. Messergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die im vorhergehenden Abschnitt erzeugten Fahrpläne am Prüfstand ohne (Kap. 7.1) und mit (Kap. 7.2) Prognoseabweichungen umgesetzt und die Ergebnisse anschließend diskutiert (Kap. 7.3). Die in Kapitel 6.2 vorgestellte Regelung wurde zusammen mit der Prüfstandssteuerung (vgl. Kap. 3.2.7) mit der Programmiersoftware LabVIEW [NI 13-c] am Prüfstand implementiert.

### 7.1 Messergebnisse der Szenarien 1 und 2

Nachfolgend werden die Typtag-Prüfstandsergebnisse der beiden Szenarien gegenübergestellt. In Szenario 1 ist der Speichersollinhalt zu Beginn und am Ende der Messung gleich und entspricht dem arithmetischen Mittelwert aus dem minimalen und maximalen Speicherenergieinhalt. Bei Szenario 2 variiert der Speichersollinhalt zu Beginn des Tages, was zur Folge hat, dass das BHKW noch flexibler betrieben werden kann.

Der thermische Wärmebedarf an den Typtagen entspricht dem aus der Typtaganalyse in Kapitel 3.4. Obwohl technisch bedingt niemals die exakt gleiche Wärmemenge verbraucht wird, ist die Prüfstandsautomatisierung ausreichend genau, so dass im Weiteren nur die elektrische (Soll-)Leistung des BHKW und der zugehörige thermische (Soll-)Speicherinhalt betrachtet werden.

#### Sommertyptag

Abbildung 7-1 stellt die Ergebnisse der Prüfstandsmessungen aus Szenario 1 (links) und 2 (rechts) für den Sommertyptag dar. Das obere Diagramm zeigt jeweils die elektrische Nettostromerzeugung (dunkelgrün) und die geplante Stromerzeugung (schwarz). Ebenso ist der EEX-Preis in orange aufgetragen. Die unteren Diagramme von Abbildung 7-1 veranschaulichen die gemessenen (blaue Kurven) und die in den Fahrplänen hinterlegten Sollspeicherinhalte (rote Kurven) sowie die (außentemperaturabhängigen) Speichergrenzen (schwarz).

Im ersten Szenario startet das BHKW in beiden Zyklen nach Fahrplan. Wegen der jeweiligen kurzen Laufzeit wird weniger thermische Energie in den Speicher eingebracht als geplant. Dies führt für beide Zyklen zu verlängerten BHKW-Betriebszeiten. Infolgedessen ist der Erlös (13,7€ct) höher als erwartet (13,2 €ct). Da der erzeugte Strom nach der geplanten Laufzeit mit einem geringeren EEX-Preis multipliziert wird, ist der Durchschnittserlös kleiner als geplant.

Der Speicherenergieinhalt in Szenario 1 folgt bis ca. 6.00 Uhr exakt dem Fahrplan. Die anschließenden Zapfungen lassen den Speicherinhalt weniger fallen als im Fahrplan vorgesehen. Das im unteren Teil des Speichers kalte (< 42 °C) Wasser trägt, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, nicht mehr zu einem weiteren Speicherinhaltsabsinken bei. Da das BHKW im folgenden Ladevorgang aber zuerst dieses Wasser erwärmt, hebt sich dieser Effekt während des BHKW-Zyklus (fast) wieder auf. In beiden Zyklen verbleibt am Ende der geplanten Laufzeit eine negative Speicherdiffenz, die es noch abzutragen gilt. Der BHKW-

Nachlauf am Ende der Zyklen sorgt anschließend dafür, dass der Energieinhalt im Speicher größer als geplant ist. Diese Differenz bleibt im weiteren Tagesverlauf bestehen.

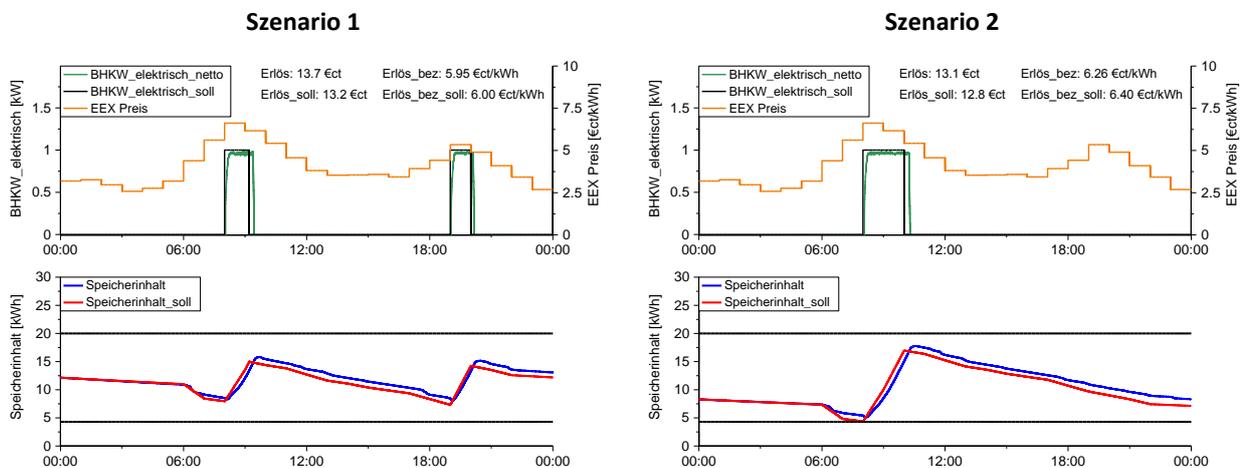


Abbildung 7-1: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Sommertypstag

In Szenario 2 ist der Speicher zu Beginn des Tages deutlich „leerer“. Dies hat zur Folge, dass das BHKW vormittags zu den Stromhöchstpreisen länger laufen und den Speicher so laden kann, dass abends kein zweiter BHKW-Startvorgang vonnöten ist. Da in Szenario 2 das BHKW insgesamt etwas kürzer in Betrieb ist, sinkt der Gesamterlös im Vergleich zu Szenario 1. Die bezogenen Erlöse sind wegen der höheren Strompreise in den Vormittagsstunden jedoch deutlich höher.

Für den Speicherinhalt gilt das Gleiche wie für Szenario 1. Die Warmwasserzapfungen senken den Speicherinhalt weniger ab als vorhergesehen. Trotzdem schafft es das BHKW nicht ganz, den Speicher bis zum Soll-Betriebsende zu laden, weshalb es auch in diesem Szenario zu einem Nachlauf kommt.

Bisher außer Acht gelassen wurde der Einfluss der Szenarien auf den Nutzungsgrad des Whispergen BHKW. Wie in Kapitel 6.1 dargelegt, geht die Optimierung von einer konstanten thermischen BHKW-Leistung von 7,6 kW aus. Die Versuche in Kapitel 3.3.1 haben jedoch gezeigt, dass sowohl die Laufzeit als auch die BHKW-Rücklauftemperatur einen Einfluss auf den Nutzungsgrad haben. Da Szenario 2 nur einen Zyklus aufweist, ist theoretisch davon auszugehen, dass der Nutzungsgrad des BHKW höher sein müsste. Die in Tabelle 7-1 aufgeführten Nutzungsgrade bestätigen dies. Während sich der thermische Nutzungsgrad am Sommertypstag um absolut 1,5 % (relative Änderung: 1,8 %) vergrößert, erhöht sich der elektrische Nutzungsgrad um 0,72 % (relativ: 7,6 %). Der Gesamtnutzungsgrad ist deutlich höher, weil beide Einzelnutzungsgrade in Szenario 2 zunehmen. Die Stromkennzahl steigt aufgrund der Division der jeweiligen Nutzungsgrade dagegen nur wenig.

Tabelle 7-1 stellt zusätzlich die veränderte Speicherausnutzung dar. In Szenario 2 ist die genutzte Speicherkapazität erheblich größer. Der minimale Speicherinhalt fällt im Vergleich zu Szenario 1 von 8,06 kWh auf 5,39 kWh, während der maximale Speicherinhalt von 15,83 kWh auf 16,25 kWh zunimmt. Die verwendete Speicherkapazität steigt demzufolge von 7,77 kWh auf 10,86 kWh, was einer prozentualen Zunahme von knapp 40 % entspricht.

Tabelle 7-1: Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Sommertypstag

	$\xi_{th}$ [%]	$\xi_{el}$ [%]	$\xi_{ges}$ [%]	$\sigma$ [-]	$E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max}$ [kWh]	$\Delta E_{Sp}$ [kWh]
<b>Szenario 1</b>	82,4	9,48	91,9	0,115	8,06	15,83	7,77
<b>Szenario 2</b>	83,9	10,2	94,1	0,122	5,39	16,25	10,86

### Typtag 15 °C

Der Typtag 15 °C zeichnet sich dadurch aus, dass das BHKW in Szenario 2 eine halbe Stunde später (7.00 Uhr), also erst nach einem deutlichen Sprung des EEX-Preises, startet. Da der Speicherinhalt zu Beginn des Tages im Vergleich zu Szenario 1 nur unwesentlich höher ist, sollte der Speichersollinhalt kurz vor dem BHKW-Start den minimalen Inhalt erreichen.

In den beiden Prüfstandsmessungen (Abbildung 7-2) sinkt der gemessene Speicherinhalt (identisch zum Sommertypstag) ab ca. 5.00 Uhr langsamer als der berechnete Inhalt. Demzufolge wird die untere Speichergrenze nicht erreicht und der Fahrplan kann eingehalten werden.

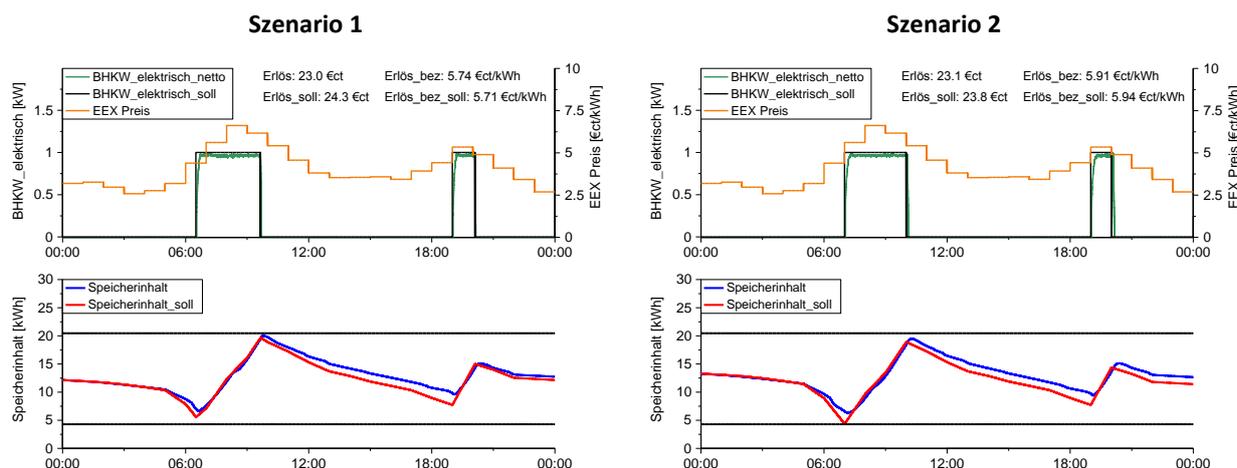


Abbildung 7-2: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 15 °C

Die erzielten Erlöse sind in beiden Szenarien geringer als angenommen. Dafür gibt es zwei Gründe: Einerseits erreicht das Whispergen BHKW erst nach ca. 7,5 Minuten (Tabelle 3-10) seine volle Leistung und andererseits ist die Nettostromerzeugung jederzeit kleiner als 1.000 Watt.

Wegen des verzögerten BHKW-Starts steigen in Szenario 2 die erzielten Durchschnittserlöse von 5,74 €/ct/kWh auf 5,95 €/ct/kWh. Der elektrische Wirkungsgrad und die Stromkennzahl sind in Szenario 1 wegen des längeren ersten BHKW-Zyklus etwas höher.

Tabelle 7-2: Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 15 °C

	$\xi_{th}$ [%]	$\xi_{el}$ [%]	$\xi_{ges}$ [%]	$\sigma$ [-]	$E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max}$ [kWh]	$\Delta E_{Sp}$ [kWh]
<b>Szenario 1</b>	84,2	10,2	94,4	0,121	6,64	20,04	13,40
<b>Szenario 2</b>	83,2	9,71	93,0	0,117	6,33	19,49	13,16

### Typtag 10 °C

Am Typtag 10 °C verringert sich die Zyklenzahl im zweiten Szenario von drei auf zwei. Dies kann dadurch erreicht werden, dass der Startenergieinhalt in Szenario 2 fast 20 kWh beträgt, womit die ersten fünf Stunden des Tages der Wärmeverbrauch komplett aus dem Speicher gedeckt werden kann.

Der Sollfahrplan kann wiederum nur im zweiten Szenario eingehalten werden. Beim ersten Szenario trifft der Speicherinhalt über eine Stunde vor dem geplanten BHKW-Stopp auf die maximale Speichergrenze, was zu deutlich geringeren Gesamterlösen führt.

Beide Szenarien zeichnen sich dadurch aus, dass die Heizkreis-Rücklauftemperatur bis zum Ende der Nachtabsenkung bei ca. 28 °C liegt. Ähnlich wie bei Warmwasserzapfungen führt dies zu einem langsameren Absinken des Speicherinhalts. In Szenario 2 wird diese Abweichung mit dem Start des BHKW behoben. Im ersten Szenario sind nach dem ersten Zyklus die Speichertemperaturen auch im unteren Bereich hoch, weshalb die nach dem ersten Zyklus entstandene positive Speicherdiffenz bestehen bleibt und zu oben beschriebener Abschaltung führt.

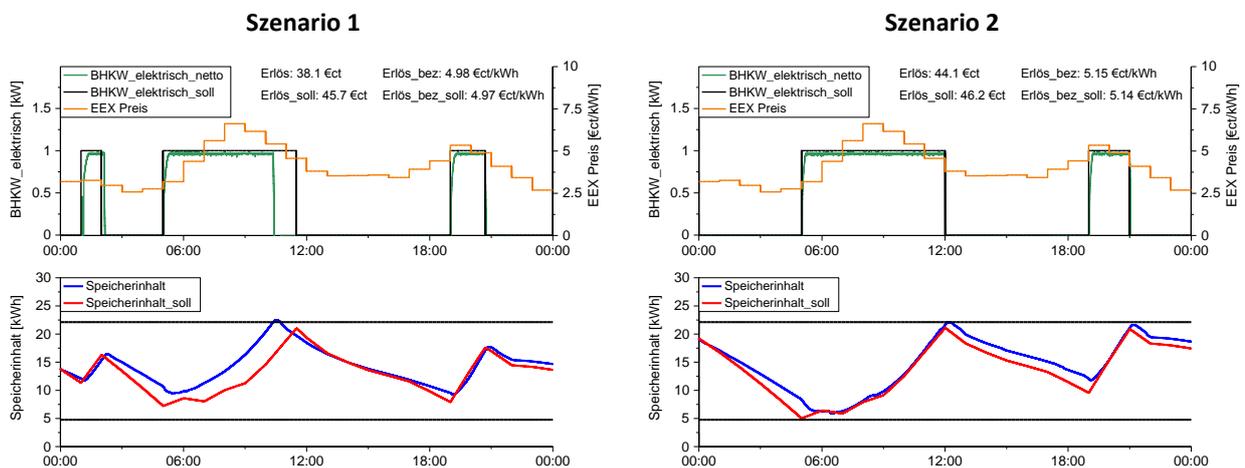


Abbildung 7-3: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 10 °C

Durch die reduzierte Startanzahl steigen die Nutzungsgrade im zweiten Szenario. Die Messergebnisse verweisen sowohl auf einen höheren thermischen als auch elektrischen Nutzungsgrad. Aufgrund dessen unterscheidet sich die Stromkennzahl der beiden Szenarien nur kaum (siehe Tabelle 7-3).

Der Speicherinhalt liegt in beiden Szenarien am Ende des Tages leicht über dem Sollinhalt. Die genutzte Speicherkapazität steigt in Szenario 2 erwartungsgemäß von 13,25 kWh auf 16,24 kWh. Die für diesen Typtag maximale Speicherkapazität (17,5 kWh) wird fast erreicht.

Tabelle 7-3: Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 10 °C

	$\xi_{th}$ [%]	$\xi_{el}$ [%]	$\xi_{ges}$ [%]	$\sigma$ [-]	$E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max}$ [kWh]	$\Delta E_{Sp}$ [kWh]
<b>Szenario 1</b>	84,1	9,61	93,7	0,114	9,26	22,51	13,25
<b>Szenario 2</b>	85,3	10,4	95,7	0,122	5,87	22,11	16,24

### Typtag 5 °C

Auch an Typtag 5 °C wird die BHKW-Zyklenzahl in Szenario 2 durch einen zu Beginn sehr vollen Speicher reduziert. In beiden Szenarien führen die langen Zyklen zu vergleichsweise hohen Wärmeeinträgen. Dies hat zur Folge, dass im ersten Szenario der maximale Inhalt erreicht und das BHKW vorzeitig abgeschaltet wird, weshalb der zweite Zyklus verspätet startet. In Szenario 2 sollte der Speicher am Ende des zweiten BHKW-Zyklus vollständig geladen sein. Da der gemessene Speicherinhalt über dem Sollfahrplan liegt, wird das BHKW beim Erreichen des maximalen Speicherfüllstands um 20.42 Uhr heruntergefahren; der Sollfahrplan kann nicht eingehalten werden. Die Folge sind in beiden Szenarien niedrigere Erlöse. Auf die durchschnittlichen Erlöse wirken sich die Abweichungen dagegen nicht aus. Aufgrund des relativ niedrigen EEX-Preises während der Abschaltungen ist der mittlere Erlös in beiden Fällen höher als erwartet.

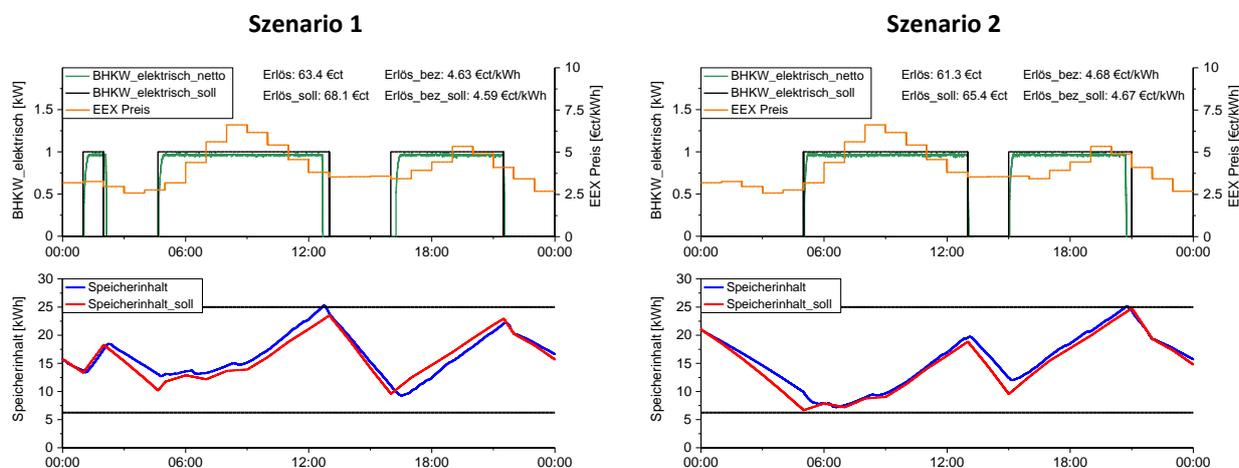


Abbildung 7-4: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 5 °C

Wie bereits im zweiten Szenario von Typtag 10 °C sinkt der gemessene Speicherinhalt zu Beginn des Tages weniger stark ab als geplant. Trotzdem ist die Speicherdifferenz am Vormittag nahe null. Erst mit dem BHKW-Nachlauf am Ende des ersten Zyklus steigt der gemessene Inhalt über den Sollinhalt. Diese Abweichung bleibt bis zum Erreichen des maximalen Füllstands erhalten.

Am Typtag 5 °C wird in beiden Szenarien der Speicher gut ausgenutzt (15,98 kWh bzw. 17,94 kWh). In Szenario 2 wird der Speicher morgens fast komplett entladen (7,21 kWh) und später der maximale Füllstand erreicht bzw. aufgrund des thermischen BHKW-Nachlaufs sogar kurzzeitig überschritten (25,15 kWh). Der gemessene Gesamtnutzungsgrad (Tabelle 7-4) ist in beiden Szenarien identisch. Aufgrund der geringeren Zyklenzahl ist der elektrische Nutzungsgrad im zweiten Szenario höher.

Tabelle 7-4: Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 5 °C

	$g_{th}$ [%]	$g_{el}$ [%]	$g_{ges}$ [%]	$\sigma$ [-]	$E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max}$ [kWh]	$\Delta E_{Sp}$ [kWh]
Szenario 1	86,3	10,2	96,5	0,118	9,27	25,25	15,98
Szenario 2	85,9	10,6	96,5	0,123	7,21	25,15	17,94

Typtag 0 °C

Am Typtag 0 °C (Abbildung 7-5) läuft in beiden Szenarien das BHKW sehr lange. In Szenario 1 läuft das BHKW ab 1.00 bis ca. 22.10 Uhr. In Szenario 2 ist das BHKW bereits in Betrieb und stoppt während des Strompreistiefs zwischen 3.00 und 4.00 Uhr. In beiden Fällen wird der Fahrplan fast exakt umgesetzt. Die erzielten Erlöse, die gemessenen Nutzungsgarde und die genutzte Speicherkapazität (Tabelle 7-5) entsprechen den in Kapitel 6.1 formulierten Erwartungen.

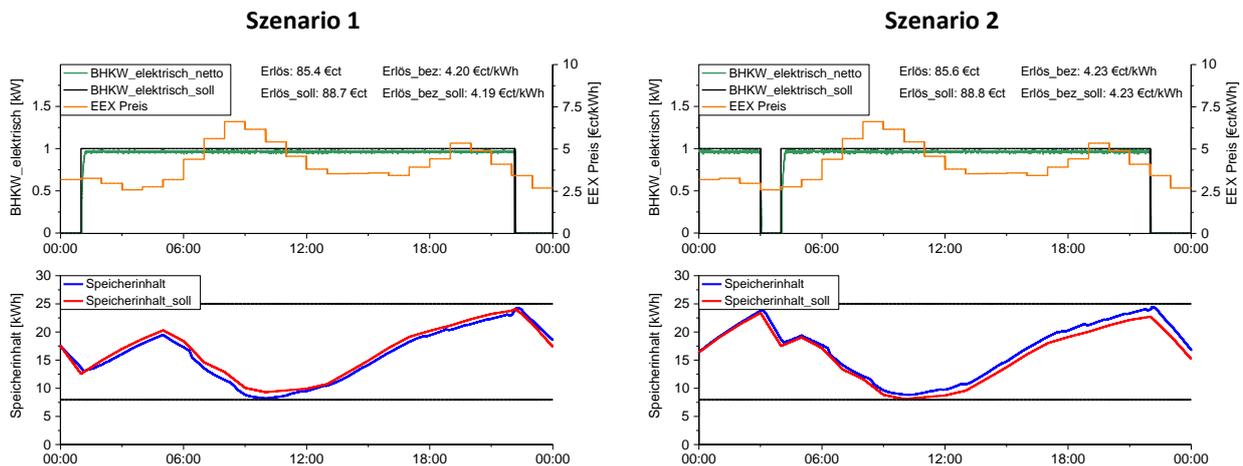


Abbildung 7-5: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 0 °C

Tabelle 7-5: Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 0 °C

	$g_{th}$ [%]	$g_{el}$ [%]	$g_{ges}$ [%]	$\sigma$ [-]	$E_{Sp,min}$ [kWh]	$E_{Sp,max}$ [kWh]	$\Delta E_{Sp}$ [kWh]
Szenario 1	85,5	10,8	96,3	0,126	8,19	24,27	16,08
Szenario 2	86,1	10,8	96,9	0,125	8,84	24,44	15,60

### Zusammenfassung der Prüfstandsmessungen der Szenarien 1 und 2

Bei Betrachtung der Messergebnisse kann zuallererst festgehalten werden, dass es möglich ist, ein BHKW mit Hilfe eines Fahrplans, der auf einer (perfekten) Wärmebedarfsprognose beruht, und eines Speichereinsatzplanes zu steuern. Obwohl mehrere Annahmen getroffen wurden (konstante BHKW-Leistung, Vernachlässigung des BHKW-An- und Ausschaltverhaltens), weicht der gemessene Speicherinhalt an keinem der gemessenen Typtage maßgeblich von dem prognostizierten Wert ab. Jedoch muss auch festgestellt werden, dass der gemessene Speicherinhalt am Beginn der Tage, an denen das BHKW erst spät gestartet wird, weniger abfällt als geplant. Erklären lässt sich dies durch das kalte Wasser, welches entweder aufgrund der abgesenkten Heizkreistemperatur oder infolge von Warmwasserzapfungen in den unteren Teil des Kombispeichers gelangt und nicht in die Speicherinhaltsberechnung einfließt (Gleichung (4.6)). Die daraus resultierende positive Speicherdifferenz baut sich jedoch meist nach dem BHKW-Start wieder ab, da zuerst der untere Teil des Speichers geladen wird und dies in der Inhaltsberechnung ebenfalls nicht vollständig auftaucht. Ist die Temperatur im Speicher überall größer als 42 °C, ist die Speichervorhersage gleich dem gemessenen Speicherinhalt. Eine weitere (positive) Speicherabweichung erfolgt am Ende der BHKW-Zyklen aufgrund der Restwärme, die vom BHKW nach dem Abschalten noch in den Speicher eingebracht wird. Sie bleibt bis zum erneuten BHKW-Start annähernd konstant und wird, wenn sich das BHKW nicht in der Nachtabenkungsphase befindet, durch das oben beschriebene Phänomen abgebaut. Im ersten Szenario der Typtage 10 °C und 5 °C ist dies nicht der Fall. Der einstündige BHKW-Betrieb inkl. Nachlauf sorgt auch im unteren Bereich des Speichers für hohe Temperaturen, die den „Ausgleichseffekt“ verhindern. Infolgedessen kommt es an diesen beiden Messtagen im anschließenden BHKW-Zyklus zum vorzeitigen Erreichen des Speichermaximums und daher zu einer verkürzten Laufzeit.

Eine Folge des ansonsten weitgehend exakten Eintretens des Speicherinhalts ist, dass die Speichergrenzen nur selten überschritten werden. Der minimale Speicherinhalt wurde in keiner der durchgeführten Messungen unterschritten. Die obere Speichergrenze wurde hingegen sowohl in beiden Szenarien am Typtag 5 °C als auch im ersten Szenario am Typtag 10 °C erreicht, was zum Abschalten des BHKW und verminderten Erlösen führte. Deutlich wird zudem, dass das Einhalten des BHKW-Sollfahrplans wesentlich durch die exakte Wärmeprognose und die genaue Bestimmung des Speicherinhalts begünstigt wird.

Im Hinblick auf die erzielten Erlöse (Tabelle 7-6) kann festgehalten werden, dass insbesondere an den wärmeren Tagen die Erlöse der beiden optimierten Szenarien gegenüber den Typtagversuchen stark ansteigen. Wegen der unterschiedlichen BHKW-Laufzeiten sind die Gesamterlöse im zweiten Szenario jedoch nicht höher als im ersten.

Besser schneidet Szenario 2 jedoch im Hinblick auf die Durchschnittserlöse ab. Diese steigen im Vergleich zur Whispergen Regelung um bis zu 43,7 % am Sommertyptag des Szenario 1. In Szenario 2 erhöhen sich die Durchschnittserlöse nochmals um mindestens 0,71 % (Typtag 0 °C) und maximal 5,2 % (Sommertyptag).

Tabelle 7-6: Strompreiserlöse an den Typtagen, WG-Reglung, Szenario 1 und 2

Typtag	Sommer	15 °C	10 °C	5 °C	0 °C
Erlös WG-Regelung [€ct]	9,48	18,7	36,5	65,6	83,7
Erlös Szenario 1 [€ct]	13,7	23,0	38,1	63,4	85,4
Erlös Szenario 2 [€ct]	13,1	23,1	44,1	61,3	85,6
durschn. Erlös WG-Regelung [€ct/kWh]	4,14	5,29	4,29	4,35	4,21
durschn. Erlös Szenario 1 [€ct/kWh]	5,95	5,74	4,98	4,63	4,20
durschn. Erlös Szenario 2 [€ct/kWh]	6,26	5,91	5,15	4,68	4,23

## 7.2 Messergebnisse bei Prognoseabweichungen

Zu überprüfen gilt es im folgenden Unterkapitel, wie sich Prognoseabweichungen auf die Messergebnisse auswirken. Die bisher in Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 theoretisch analysierten Prognosefehler werden nun realitätsnah am Prüfstand nachgestellt. Dafür werden der Sollfahrplan aus Szenario 2 und die Speicherparameter ( $E_{Sp,min}$ ,  $E_{Sp,max}$ ,  $E_{Sp,Start}$ ,  $E_{Sp,Ende}$ ) der Typtage beibehalten, während beim Amplitudenfehler der Wärmeverbrauch (WW und/oder Heizkreis) skaliert und beim Zeitfehler der Warmwasserverbrauch zeitlich verschoben wird. Um mit wenig Messaufwand die auftretenden Effekte besser darzustellen zu können, werden bei den Amplitudenfehlern für alle Typtage die jeweils größeren Abweichungen untersucht und bei den Zeitfehlern die  $\pm 2h$  Abweichungen vermessen.

### 7.2.1 Amplitudenfehler

#### Sommertyptag

In Abbildung 7-6 wird die gezapfte Warmwasserenergie am Sommertyptag um 50 % reduziert (linke Diagramme) bzw. erhöht (rechte Diagramme). In beiden Fällen läuft das BHKW während der Sollzeit und danach so lange, bis die Speicherdifferenz abgebaut ist. Am Ende des Tages verbleibt in beiden Versuchen eine positive Speicherdifferenz.

Im Gegensatz zu den theoretischen Überlegungen, wie sie Abbildung 6-13 (rechts) zeigt, wirkt sich der erhöhte Verbrauch in der Messung weniger stark aus, weshalb die untere Speichergrenze zu keiner Zeit erreicht und das BHKW auch nicht vorzeitig gestartet wird.

Da das Nachlaufen nicht mehr zur Zeit der Strompreisspitze stattfindet, ist der bezogene Erlös in beiden Messungen kleiner als erwartet. Bei erhöhtem Warmwasserbedarf fällt der Durchschnittserlös sogar auf 6,15 €ct/kWh.

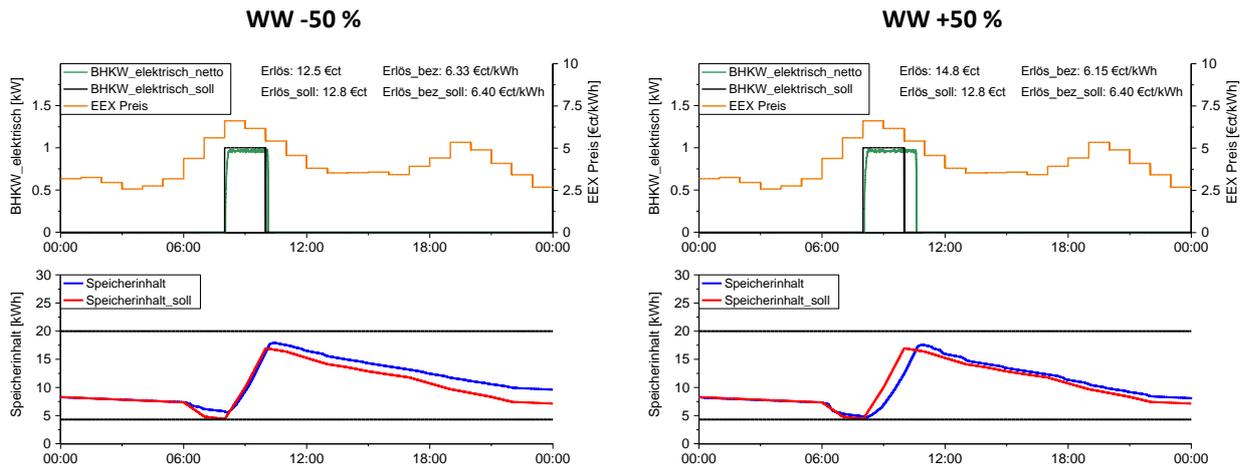


Abbildung 7-6: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Sommertypag

**Typtag 15 °C**

Abbildung 7-7 zeigt die Stromproduktion und den Speicherinhalt bei einer Fehlprognose von  $\pm 25\%$  für Heizung und Warmwasser am Typtag 15 °C. Bei geringerem Wärmeverbrauch erreicht der Speicherinhalt schon vor Ablauf des ersten BHKW-Sollzyklus die obere Speichergrenze, woraufhin das BHKW heruntergefahren wird. Da der gemessene Speicherinhalt bis zum zweiten BHKW-Start jederzeit größer als der Sollspeicherenergieinhalt ist, wird das BHKW erst gegen Mitte des zweiten BHKW-Sollzyklus zurückgesetzt (vgl. Kapitel 6.2.3). Die verbleibende Restlaufzeit ist nun jedoch kleiner als eine Stunde, weshalb das BHKW nicht mehr startet. Bei erhöhtem Verbrauch ergibt sich für beide BHKW-Zyklen eine nach hinten verlängerte Laufzeit, welche sich positiv auf die Gesamterlöse auswirkt. Der bezogene Erlös verhält sich bei Mehrverbrauch genau gegensätzlich und sinkt wegen der niedrigeren Preise in den Nachlaufzeiten. Demgegenüber steigen die Durchschnittserlöse bei verringertem Verbrauch, da der zweite Zyklus mit vergleichsweise niedrigem Strompreis weggefallen ist.

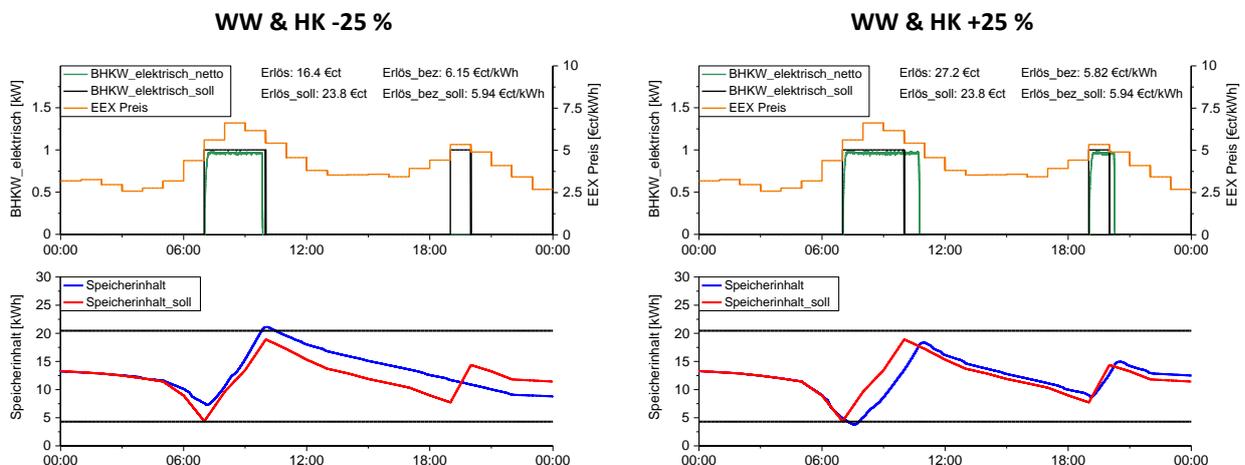


Abbildung 7-7: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 15 °C

### Typtag 10 °C

Bei einer Verbrauchsüberschätzung schaltet die Regelung das BHKW am Typtag 10 °C nach dem Erreichen der oberen Speichergrenze ab (Abbildung 7-8, links). Da  $E_{\text{Diff}}$  anschließend negativ ist, wird der BHKW-Stopp rückgesetzt, so dass das BHKW während des zweiten Sollzyklus planmäßig läuft. Der Erlös sinkt mit der Laufzeit, der erzielte Erlös entspricht den in Kapitel 6.3.1 ermittelten Erwartungen.

Ist der Heizwärmeverbrauch am Typtag 10 °C größer als angenommen (Abbildung 7-8, rechts), bleibt der Speicherinhalt längere Zeit unterhalb der Minimalgrenze. So fällt der Speicherinhalt ab 5.00 Uhr, also zu Beginn des Tagbetriebs, stark ab, weil die Speicherinhaltsbestimmung wegen der niedrigen Rücklauftemperaturen den Mehrverbrauch anfangs nicht registriert. Der Speicherinhalt unterschreitet um 5.23 Uhr  $E_{\text{Sp,min}}$  und sinkt anschließend bis auf 2,67 kWh.

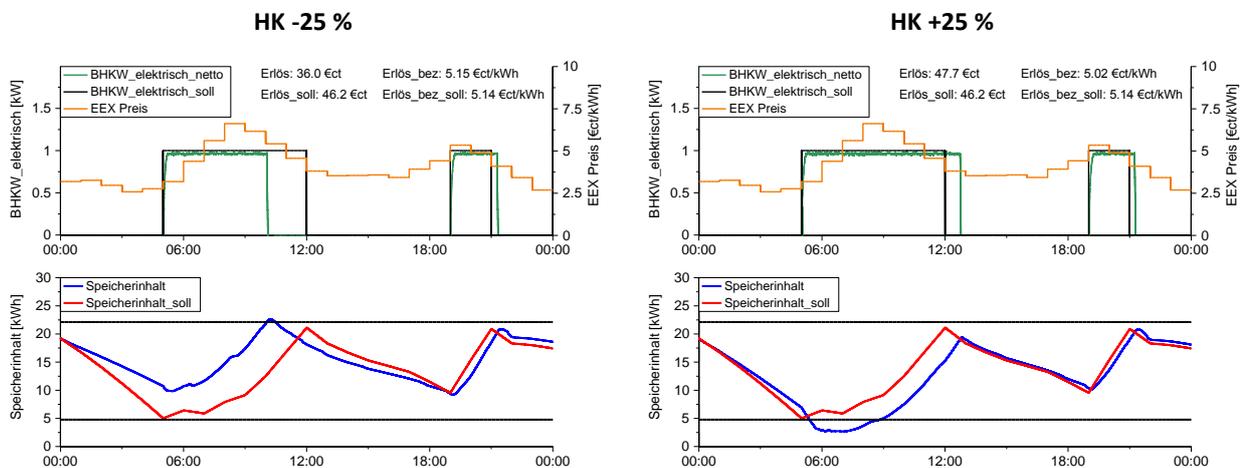


Abbildung 7-8: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 10 °C

Das Zusatzheizgerät trägt nicht dazu bei, den Speicherinhalt möglichst schnell über die minimale Speichergrenze zu bringen, da dieses erst bei 2,5 kWh aktiviert wird. Es stellt sich die Frage, ob trotz des „leeren“ Speichers die Nachfrage noch bedient werden kann (Abbildung 7-9). Bei Betrachtung der Solltemperaturen (Abbildung 7-9, mittleres Diagramm) erkennt man, dass die Heizkreisvorlauftemperatur am Speicher ( $T_{\text{HK,Sp,VL}}$ ) jederzeit über der Heizkreissolltemperatur bzw. Vorlauftemperatur nach dem Mischer liegt. Der Heizkreis wird also jederzeit mit ausreichend Leistung und Temperatur versorgt. Die Zapftemperatur am Hahn sinkt in der Zeit des kleinsten Speicherinhalts zwischen 6.00 und 7.00 Uhr (Abbildung 7-9, unten) auf 42 °C zu Beginn der dritten Zapfung. Mit dem höheren Durchfluss (Zapfung anstatt Zirkulation) steigt die Temperatur des gezapften Wassers jedoch auf über 43 °C und ist demnach sogar größer als die geforderte Mindesttemperatur.

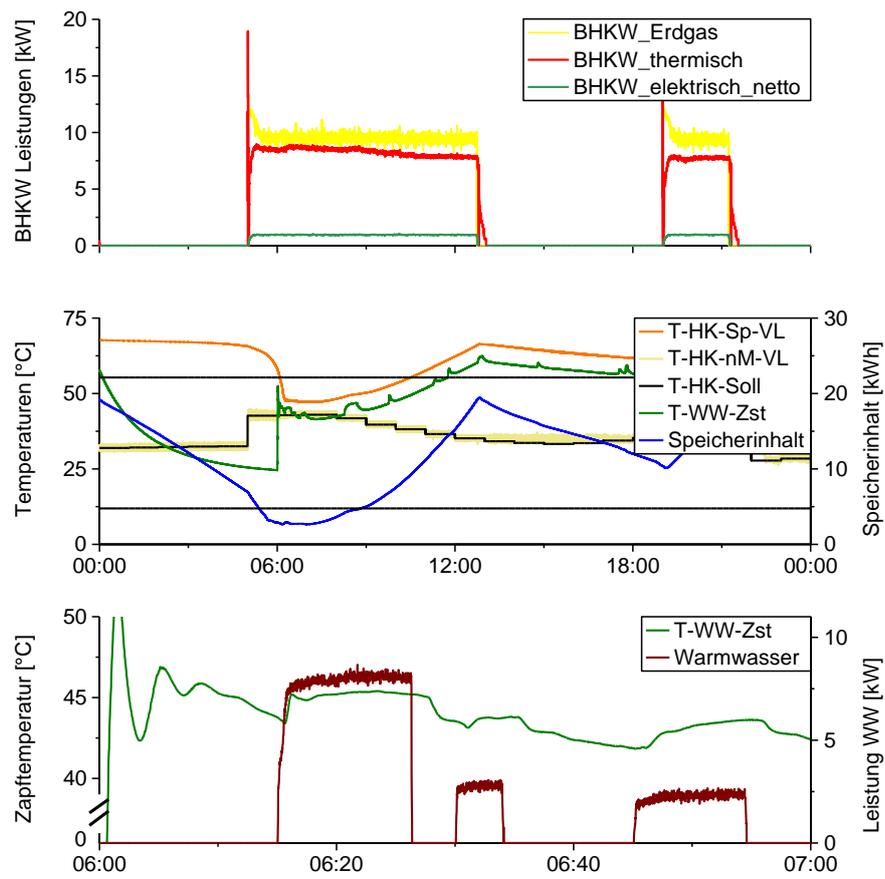


Abbildung 7-9: BHKW-Leistungen und Temperaturen am Typtag 10 °C, HK +25 %

### Typtag 5 °C

Abbildung 7-10 illustriert die BHKW-Fahrplanabweichung und die dazugehörigen Speicherinhalte am Typtag 5 °C. Ähnlich wie an den wärmeren Typtagen erreicht der Speicherinhalt im linken Diagramm die obere Speichergrenze, was dazu führt, dass in beiden BHKW-Zyklen das BHKW vorzeitig abgeschaltet wird. Obwohl beim zweiten Zyklus das BHKW ausgerechnet während der Abendspitze stillsteht, ist der bezogene Erlös nicht kleiner als erwartet.

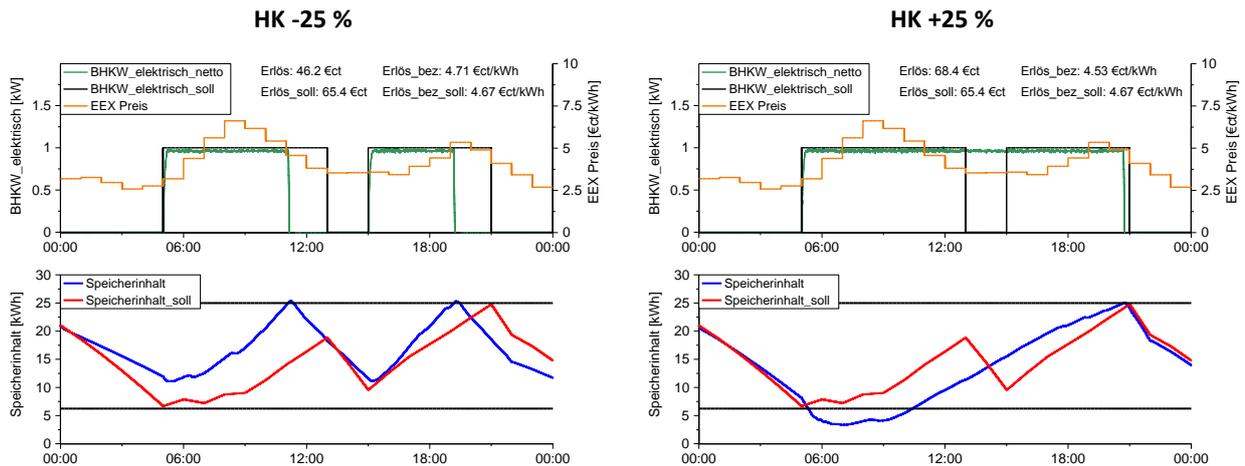


Abbildung 7-10: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 5 °C

Ist die Wärmebedarfsprognose zu niedrig, dann läuft das BHKW so lange nach, bis die Speicherdifferenz abgebaut ist. Zu diesem Zeitpunkt (14.07 Uhr) ist die Pausenzeit bis zum zweiten Zyklus kleiner als eine Stunde, weshalb das BHKW weiterläuft. Die Folge ist, dass während des zweiten Zyklus  $E_{Diff}$  jederzeit positiv ist, woraufhin die obere Speichergrenze erreicht und das BHKW vorzeitig gestoppt wird. Aufgrund der längeren Laufzeit steigen bei erhöhtem Verbrauch die Erlöse. Da aber das BHKW zu Zeiten niedriger Strompreise läuft und während eines hohen Preises abschaltet, sinken die mittleren Erlöse.

Auch am Typtag 5 °C +25 HK wird trotz Unterschreitung des minimalen Speicherfüllstands das ZHG nicht aktiviert (Abbildung 7-11, oben). Der Speicherinhalt bleibt über fünf Stunden unter der Minimalgrenze. Trotzdem wird sowohl der Heizkreis (Abbildung 7-11, Diagramm in der Mitte) als auch das Warmwassersystem (Abbildung 7-11, unten) jederzeit mit ausreichend warmem Wasser versorgt.

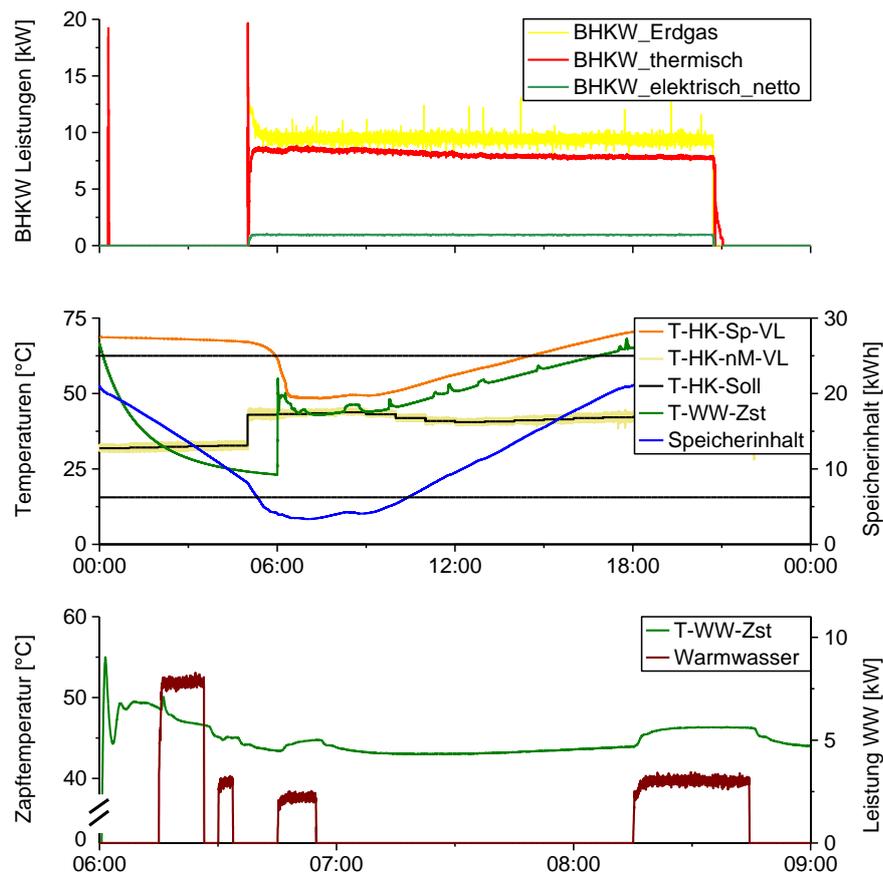


Abbildung 7-11: BHKW-Leistungen und Temperaturen am Typtag 5 °C, HK +25 %

### Typtag 0 °C

Am Typtag 0 °C tritt das in Kapitel 6.3.1 prognostizierte Verhalten ein: Bei einer Verbrauchsüberschätzung kommt es zu einem zusätzlichen BHKW-Start (Abbildung 7-12), bei einer Unterschätzung zum Start des Zusatzheizgeräts (Abbildung 7-13, oben). Jedoch reagiert das echte System deutlich träger als angenommen. In der Messung wird das BHKW nach Ende des dritten Zyklus erst um 21.11 Uhr freigegeben, wenn der Speicherinhalt unter 17,4 kWh fällt. Aufgrund der Mindestlaufzeit erfolgt demnach kein weiterer BHKW-Start. Im simulierten Beispiel in Kapitel 6.3.1 sind die Speicherinhaltsgradienten deutlich ausgeprägter, weshalb das BHKW in Abbildung 6-12 schon um 20.03 Uhr wieder frei gegeben wird und das BHKW startet.

Die BHKW-Pausenzeiten im linken Diagramm von Abbildung 7-12 liegen tendenziell eher bei niedrigen Strompreisen, weshalb bei insgesamt deutlich geringeren Gesamterlösen der bezogene Erlös von 4,23 €/ct/kWh auf 4,38 €/ct/kWh steigt. Beim Versuch „HK +25%“ läuft das BHKW am Ende des Tages bei sehr geringen Strompreisen, was eine minimale Steigerung der Gesamterlöse und niedrigere bezogene Erlöse mit sich bringt. Bei genauer Betrachtung der Stromproduktion am Typtag 0 °C, HK +25 % erkennt man, dass während des Zusatzbrennerbetriebs die Stromproduktion etwas geringer als am Rest des Tages ausfällt. Dies lässt sich durch den höheren Eigenstrombedarf erklären, den der Einsatz des ZHG mit sich bringt. Da der ZHG ausgerechnet zur morgendlichen Strompreisspitze zuschaltet, wirkt sich dies ebenfalls negativ auf die (bezogenen) Erlöse aus.

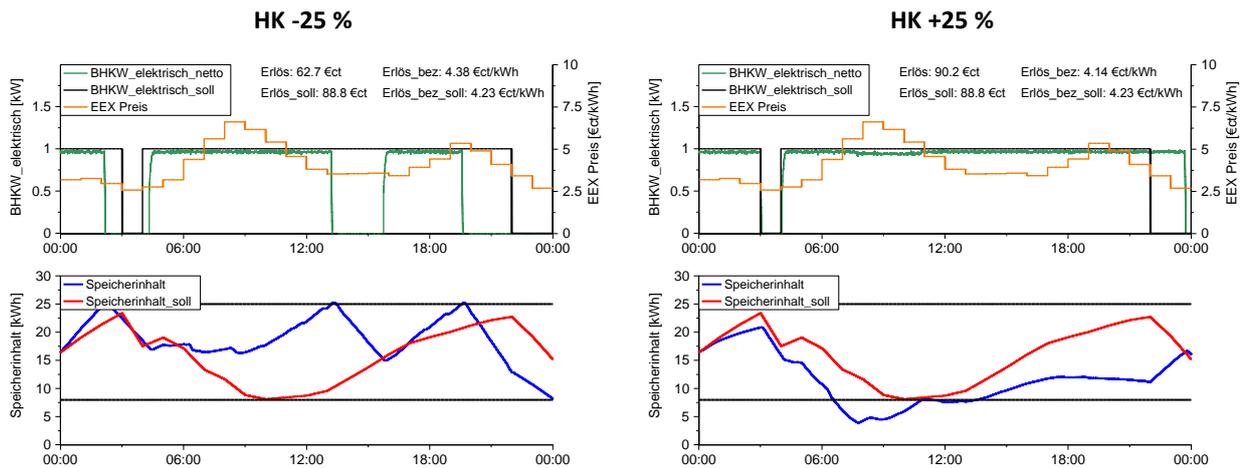


Abbildung 7-12: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 0 °C

Auch am Typtag 0 °C, HK +25% fällt der Speicherinhalt unter die minimale Grenze. In diesem Fall sinkt der Speicherinhalt jedoch unter  $\frac{E_{Sp,min}}{2}$ , woraufhin das Zusatzheizgerät angefordert wird. Da der minimale Speicherinhalt am Typtag 0 °C bei 8 kWh liegt, ist das gezapfte Wasser auch während der Morgenstunden ausreichend warm (Abbildung 7-13, unten). Aufgrund der niedrigen Außentemperatur am Typtag 0 °C steigt die Heizkreisvorlaufolltemperatur zwischen 6.00 und 9.00 Uhr auf über 50 °C. Bei Betrachtung des mittleren Diagramms in Abbildung 7-13 erkennt man, dass die Heizkreissolltemperatur nicht ganz erreicht wird. Allerdings beträgt die Differenz zur Solltemperatur maximal 1,3 °C, was erstens die Bewohner nicht einschränkt und zweitens deutlich weniger als im Standardbetrieb (3,8 °C) ist. Zusätzlich ist das ZHG schon in Betrieb und sorgt für einen raschen Anstieg des Speicherinhalts.

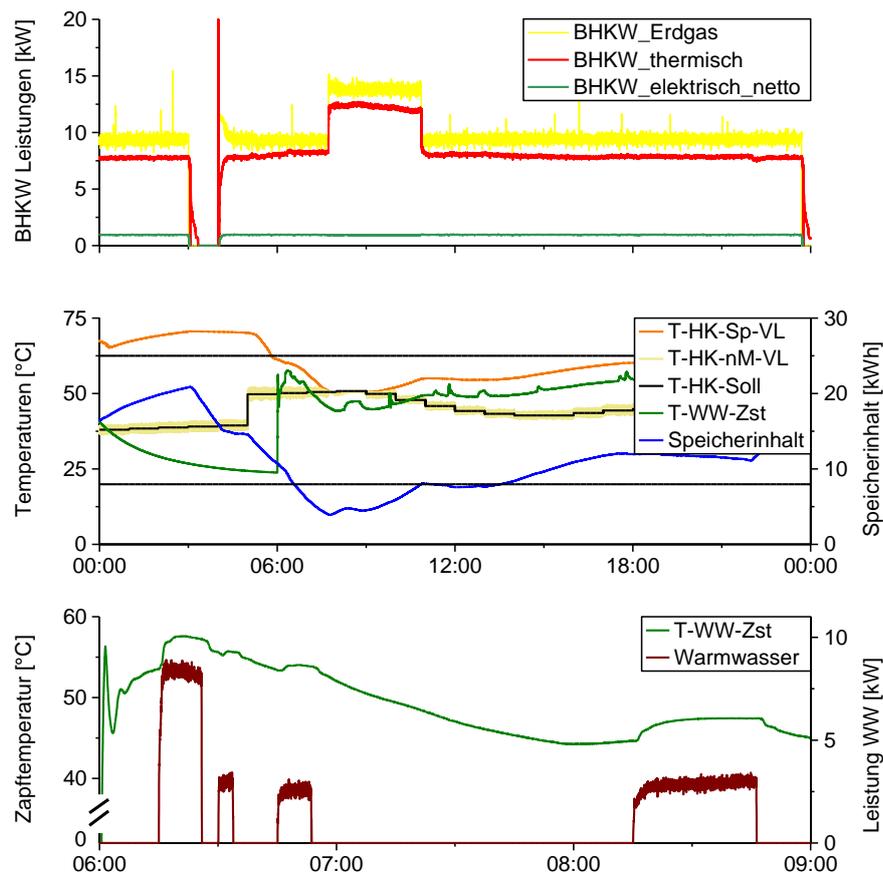


Abbildung 7-13: BHKW-Leistungen und Temperaturen am Typtag 0 °C, HK +25 %

### 7.2.2 Zeitfehler

#### Sommertypstag

An Tagen ohne Heizkreisverbrauch wird der BHKW-Sollfahrplan trotz zweistündiger Zeitprognosefehler eingehalten. Die verfrühten Warmwasserzapfungen lassen den Speicherinhalt zwar vorher sinken, die Kaltwassertemperaturen um 12 °C verhindern aber ein Abfallen des Speicherinhalts bis zur unteren Grenze (vgl. Abbildung 4-13). Folglich startet das BHKW planmäßig um 8.00 Uhr. Der Speicherinhalt steigt wegen des kalten Wassers im unteren Bereich des Speichers jedoch langsamer als erwartet. Da das BHKW erst stoppt, wenn die Speicherdifferenz abgebaut ist, läuft das BHKW fast eine halbe Stunde länger als prognostiziert. Treten die Zapfungen dagegen verspätet auf, wird der Fahrplan exakt umgesetzt.

Im Vergleich zu der erwarteten Stromproduktion (Kapitel 6.3.2) wird am Sommertypstag WW -2h die BHKW-Stromproduktion in der Messung, anstatt früher zu starten, nach hinten verlängert. Das führt zu erhöhten Erlösen einerseits, jedoch geringeren bezogenen Erlösen andererseits. Bei verspäteten Zapfungen entspricht das Messergebnis der Prognose.

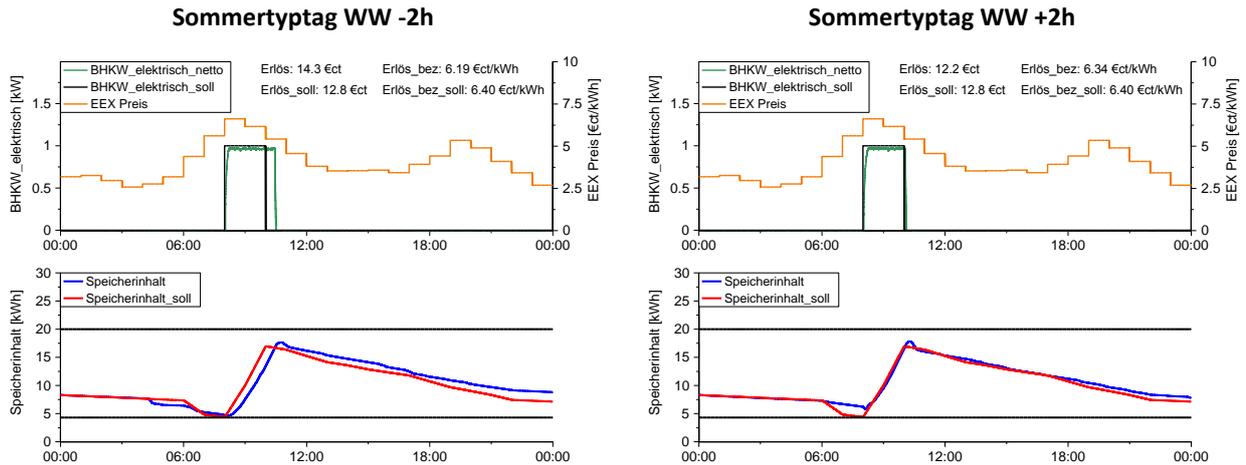


Abbildung 7-14: Prüfstandsmessungen mit Zeit-Prognosefehler, Sommertypstag

### Typtag 15 °C

Am Typtag 15 °C kommt es bei der Prüfstandsmessung mit Zeit-Prognosefehler zu einer schwerwiegenden Änderung im Vergleich zur Vorhersage. Bei verspäteter Zapfung führt das Einhalten des Sollfahrplans in jedem Fall zum Erreichen des Speichermaximums. In der Theorie fällt der Speicherinhalt bei den späteren Warmwasserverbräuchen zeitlich bereits vor dem zweiten BHKW-Start wieder unter den Sollwert. In der Messung gibt es hingegen zwei Effekte, die dies verhindern: Erstens steigt der Speicherinhalt wegen des BHKW-Nachlaufs weiter an und zweitens sinkt der Inhalt aufgrund des kalten Frischwassers weniger als geplant. Infolgedessen wird die BHKW-Startbedingung nicht zurückgesetzt (Tabelle 6-7) und der zweite BHKW-Zyklus entfällt. Im Vergleich zu den Ergebnissen am Sommertypstag münden verfrühte Zapfungen in verlängerten BHKW-Zyklen.

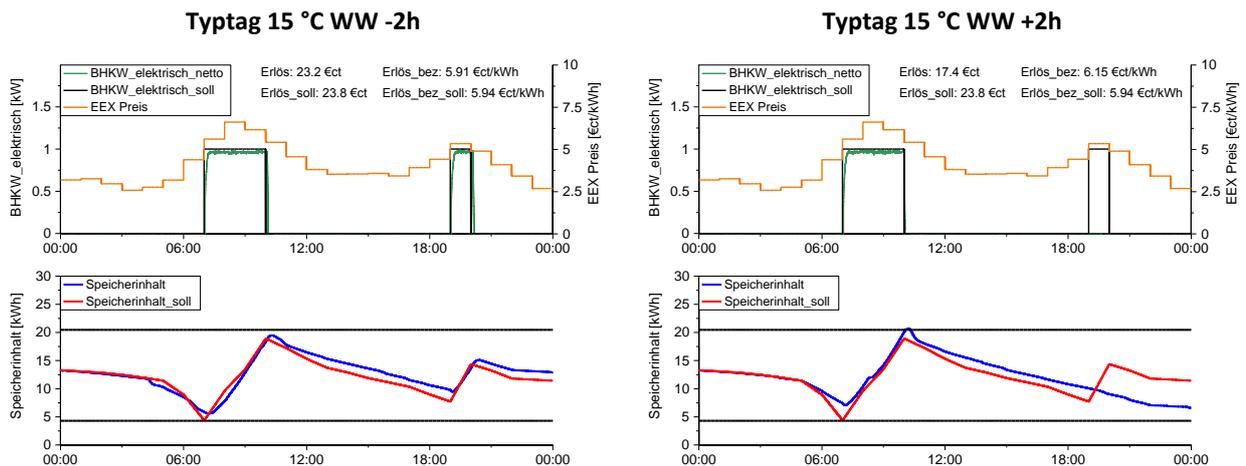


Abbildung 7-15: Prüfstandsmessungen mit Zeit -Prognosefehler, Typtag 15 °C

Wirtschaftlich betrachtet sinkt aufgrund der fehlenden Betriebsstunde der Gesamterlös am Typtag 15 °C WW +2h von 23,8 €ct auf 17,4 €ct, was aufgrund des geringeren Speicherenergieinhalts am Ende des Tages am Folgetag kompensiert werden kann.

### 7.2.3 Zusammenfassung der Messergebnisse

Bei der Gesamtanalyse der Messergebnisse mit Prognoseabweichungen müssen neben der Einhaltung des Sollfahrplans insbesondere die Sicherstellung des thermischen Komforts sowie eine mögliche Erhöhung der Zyklenzahl betrachtet werden. Für den Fall, dass der Wärmeverbrauch zu hoch oder zeitlich falsch prognostiziert wird, kommt es in keinem gemessenen Beispiel zum Erreichen der unteren Speichergrenze; die thermische Behaglichkeit ist demzufolge jederzeit sichergestellt. Dagegen wird bei erhöhtem Wärmeverbrauch das Speicherminimum, abgesehen vom Sommertypstag, immer unterschritten. Aufgrund der in Kapitel 5.3 gewählten thermischen Sicherheit führt dies nur am Typtag 0 °C zur Nichteinhaltung bzw. Unterschreitung des Heizkreissollwerts. Die gewünschte Zapftemperatur wird an allen Typtagen zu jeder Zeit erreicht.

Wirtschaftlich betrachtet wirken sich Prognoseabweichungen deutlich stärker aus. Bei erhöhtem oder verfrühtem Einsetzen des Wärmeverbrauchs wird der Sollfahrplan meist eingehalten und die jeweiligen BHKW-Zyklen bis zum Abbau der Speicherdiffenz verlängert. Nur der Typtag 5 °C, HK +25 % stellt hier eine Ausnahme dar. An diesem Tag dauert das Ausgleichen der Speicherdiffenz so lange, dass die notwendige Pausenzeit von einer Stunde unterschritten wird, weshalb das BHKW durchgehend läuft. Folge dessen ist ein vorzeitiges Abschalten (18 Minuten) am Ende des zweiten Zyklus.

Bei geringerer oder verspäteter Wärmenachfrage ist die Fahrplanumsetzung schwieriger. Aufgrund der programmierten Regelung startet das BHKW auch bei positiver Speicherdiffenz nach Fahrplan und schaltet beim Erreichen der oberen Speichergrenze ab. Bei relativ großen Abweichungen wird die Speichergrenze sehr schnell erreicht. Bei höheren Temperaturen kann der Speicher einen Großteil der überschüssigen Wärme aufnehmen, so dass der BHKW-Zyklus am Ende nur etwas verkürzt wird. An anderen Typtagen stoppt das BHKW während des Zyklus. Je nach Strompreisverlauf und Typtag kann es zu Pausenzeiten während Hochpreisphasen (Typtag 5 °C, HK -25 %) ebenso wie Niedrigpreisphasen (Typtag 0 °C, HK -25 %) kommen.

Technisch gesehen gewährleistet die programmierte Regelung, dass die Startanzahl auch bei größeren Prognoseabweichungen nicht signifikant erhöht wird. Zwar nimmt die Startanzahl am Typtag 0 °C, HK -25% zu, in drei anderen Fällen kann diese jedoch sogar reduziert werden: Typtag 15 °C, WW +2h, Typtag 15 °C, HK&WW -25% und Typtag 5 °C, HK +25%.

Insgesamt muss festgehalten werden, dass sich die realen Messungen bei Prognoseabweichungen im Vergleich zu den Abschätzungen von Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 positiver darstellen. Insbesondere bei Warmwasserzapfungen fällt wegen der in dieser Arbeit definierten Berechnungsvorschrift der Speicherinhalt bei den Messungen langsamer als bei der theoretischen Betrachtung.

Zusätzlich muss konstatiert werden, dass eine Verbrauchsüberschätzung, also eine zu geringe Wärmeproggnose, meist vorzuziehen ist. Bei erhöhtem Verbrauch wird der Fahrplan eingehalten und es gibt keine zusätzlichen Starts. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass die untere Speichergrenze erreicht wird, was bei schlechter Wahl der thermischen Sicherheit zu Einschränkungen in der Behaglichkeit führen kann. Bei Zeitfehlern in der Prognose ist die Abweichung zum Sollfahrplan gering. Nur bei Abweichungen größer zwei Stunden verändert sich die BHKW-Stromproduktion. Da jedoch die Kostenoptimierung den Speicher sehr oft an die untere Grenze bringt, sollte der Wärmeverbrauch zeitlich eher zu früh als zu spät geschätzt werden. Tabelle 7-7 fasst die Ergebnisse der

Prüfstandsmessungen mit und ohne Prognoseabweichungen hinsichtlich der BHKW-Starts, des Erreichens der Speichergrenzen sowie der erzielten (durchschnittlichen) Erlöse zusammen:

Tabelle 7-7: Vergleich der Messungen mit und ohne Prognoseabweichung

		Startanzahl [-]	Überschreiten von $E_{Sp,max}$ [-]	Unterschreiten von $E_{Sp,min}$ [-]	Erlös [€ct]	durschn. Erlös [€ct/kWh]
Sommer	WW -50%	1	0	0	12,5	6,33
	WW -2h	1	0	0	14,3	6,19
	Szenario 2	1	0	0	13,1	6,26
	WW +2h	1	0	0	12,2	6,34
	WW +50%	1	0	0	14,8	6,15
15 °C	HK&WW -25%	1	1	0	16,4	6,15
	WW -2h	2	0	0	23,2	5,91
	Szenario 2	2	0	0	23,1	5,91
	WW +2h	1	1	0	17,4	6,15
	HK&WW +25%	2	0	1	27,2	5,82
10 °C	HK -25%	2	1	0	36,0	5,15
	Szenario 2	2	0	0	44,1	5,15
	HK +25%	2	0	1	47,7	5,02
5 °C	HK -25%	2	2	0	46,2	4,71
	Szenario 2	2	1	0	61,3	4,68
	HK +25%	1	1	1	68,4	4,53
0 °C	HK -25%	2	3	0	62,7	4,38
	Szenario 2	1	0	0	85,6	4,23
	HK +25%	1	0	1	90,2	4,14

### 7.3 Ergebnis und Diskussion

In den Kapiteln 7.1 und 7.2 wurden die optimierten Fahrpläne inklusive der prognostizierten Speicherinhalte am Prüfstand nachgefahren. Es wurde deutlich, dass bei perfekter Wärmeprognose die Sollfahrpläne fast exakt umgesetzt werden können. Lediglich die Abweichungen bei der Speicherinhaltsberechnung, die in Kapitel 4.3 vorgestellt wurden, führen während der Nachtabenkung zu einem geringeren Absinken des Speicherinhalts. Die sich aufbauende Speicherdiffrenz klingt jedoch nach dem BHKW-Start allmählich ab. Die in der realen Anwendung nicht vermeidbaren Fehler in der Wärmebedarfsprognose werden durch die in Kapitel 6.2 vorgestellte BHKW-Regelung so ausgeglichen, dass das BHKW trotzdem effizient betrieben werden kann (kein Takten, keine kurzen Zyklen) und zusätzlich nur geringe Erlöseinbußen zu verzeichnen sind.

Die Notwendigkeit von Prüfstandsmessungen gegenüber reinen simulatorischen Ansätzen kann anhand der Robustheit des Mikro-KWK-Systems dargestellt werden. Warmwasserzapfungen und niedrige Heizkreissolltemperaturen schlagen sich nicht komplett in einer Reduzierung des Speicherinhalts nieder. Folglich wird die untere Speichergrenze später oder evtl. gar nicht erreicht, was faktisch einer Vergrößerung der Speicherkapazität entspricht. Der Anstieg des Speicherinhalts bei einer Speicherladung tritt ebenfalls zeitlich verzögert ein und verhindert ein vorzeitiges Erreichen der oberen Speichergrenze. Allgemein gesprochen sind das Einschwingverhalten und/oder die dynamischen Vorgänge im KWK-Speicher-Verbraucher-System träger als prognostiziert. Dies führt zu kleineren Gradienten und infolgedessen dazu, dass die Speichergrenzen oft nicht erreicht werden und es außerdem nicht zu vorgezogenen Starts oder Abschaltungen kommt. Zusammen mit der für die Einsatzplanung angepassten BHKW-Regelung können Fehlprognosen gut ausgeglichen werden, was zu einer bemerkenswerten Einhaltung des BHKW-Sollfahrplans bzw. bei größeren Prognoseabweichungen nur zu geringen Erlöseinbußen führt.

Ebenfalls verweisen der geringe Anstieg der BHKW-Starts bei Fehlprognosen (vgl. Tabelle 7-7) sowie die minimalen Erlöseinbußen bei den entsprechenden Prüfstandsversuchen auf die Zweckmäßigkeit der BHKW-Regelung.

Abbildung 7-6 und Tabelle 7-8 stellen beispielhaft für den Sommertypstag die theoretisch ermittelten und die bei den Prüfstandsmessungen erzielten Durchschnittserlöse für die untersuchten Szenarien (Standard, Szenario 1, Szenario 2, Szenario 2 inklusive Prognoseabweichung) gegenüber. Es zeigt sich, dass in den Szenarien 1 und 2 die durchschnittlichen Erlöse deutlich höher sind als im wärmegeführten BHKW-Standardbetrieb. Durch den variablen Speicherbeginn des Szenarios 2 können im Vergleich zu Szenario 1 weitere Erlöszugewinne realisiert werden. Bei den erzielten Erlösen der Messversuche muss beachtet werden, dass die elektrische Nennleistung erst einige Minuten nach dem Start erreicht wird. Zusätzlich läuft das BHKW am Ende des Zyklus kurze Zeit nach. Dies führt dazu, dass die mittleren Erlöse in der Praxis etwas niedriger ausfallen als die Ergebnisse der Optimierung vorhersagen. Die Funktionalität der entwickelten Regelung zeigen die Messergebnisse mit Prognoseabweichungen: Diese weisen immer noch deutlich höhere bezogene Erlöse im Vergleich zum Standardbetrieb und selbst bei starken Abweichungen nur geringfügige Verluste gegenüber den beiden Szenarien auf.

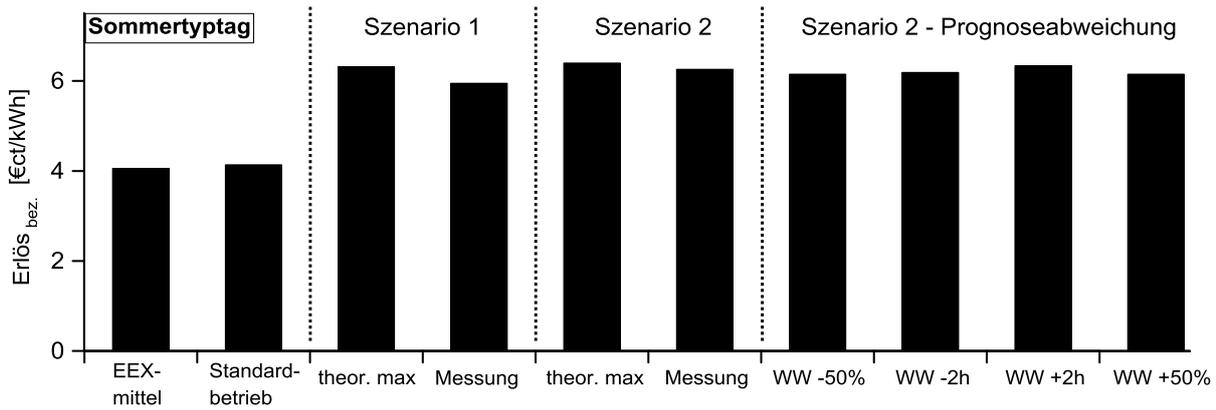


Abbildung 7-16: Durchschnittlicher Erlös am Sommertypstag

Tabelle 7-8: Durchschnittlicher Erlös am Sommertypstag

			Szenario 1		Szenario 2		Szenario 2 - Prognoseabweichung			
	EEX-mittel	Standard-Betrieb	theor. max	Messung	theor. max	Messung	WW -50%	Zeit -2h	Zeit +2h	WW +50%
<b>Sommer [€ct]</b>	4,06	4,14	6,32	5,95	6,40	6,26	6,15	6,19	6,34	6,15

Die Ergebnisse der anderen Typtage und deren Darstellung finden sich im Anhang (Abbildung A-8, Abbildung A-9 und Tabelle A-9 und Tabelle A-10).

Die Prüfstandsergebnisse machen jedoch auch deutlich, dass es noch Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich BHKW-Effizienz und der Erlösmaximierung gibt. Wird beispielsweise verlangt, dass die volle BHKW-Leistung zu einer bestimmten Stunde verfügbar sein soll, muss das BHKW früher gestartet werden. Je nach Gerät und dessen Anlaufverhalten dauert es unterschiedlich lange, bis die Nennleistung erreicht ist. Für das Whispergen BHKW würde sich ein um ca. 10 Minuten vorgezogener Start anbieten (vgl. Tabelle 3-10).

Bei den Messungen mit Fehlprognosen hat sich gezeigt, dass die implementierte Regelung mit einem zu niedrig prognostizierten Wärmebedarf besser umgehen kann als mit einem zu hoch angesetzten. Durch das vorzeitige Einschalten kann entsprechenden Komfortbedürfnissen beigegeben und der Soll-BHKW-Fahrplan umgesetzt werden.

Die BHKW-Regelung könnte aber auch so erweitert werden, dass bei einer positiven Speicherdiffenz der BHKW-Soll-Fahrplan verkürzt bzw. das BHKW später gestartet wird. Dafür müsste man jedoch wissen, ob es sich um eine langfristige Abweichung handelt oder ob der Wärmeverbrauch nur kurze Zeit später auftritt (Zeitabweichung) und sich noch während des BHKW-Zyklus ausgleicht. Dies zeigt, dass erstens eine möglichst exakte Wärmebedarfsprognose und zweitens eine darauf abgestimmte BHKW-Regelung unabdingbar für eine flexible BHKW-Stromerzeugung sind.

Für den Fall, dass der Wärmebedarf exakt prognostiziert werden kann, geben Abbildung 7-17 und Tabelle A-11 im Anhang die Ergebnisse der beiden Betriebsarten „Standard“ und Szenario 2 für ein

ganzes Jahr wieder (Wärmeverbrauch nach Kneuer [KNE 11], EEX-Preise 2012). Das flexible Szenario 2 ist in nahezu allen Kriterien dem Standardbetrieb überlegen. Nur der Wärmeverbrauch steigt wegen der höheren Speicherverluste um 264 kWh. Die daraus resultierende Heizwärmebedarfsminderung wurde jedoch nicht berücksichtigt.

Das bessere Abschneiden des zweiten, optimierten Szenarios hat zwei Ursachen: Erstens ist die eingesetzte (genutzte) Speicherkapazität größer. Zweitens erlaubt die Wärmebedarfsprognose eine Verschiebung der Stromproduktion. Die größere Kapazität wirkt sich vor allem auf die BHKW-Startanzahl aus. Diese reduziert sich um 28 % von 825 auf 598 Starts. Eine Wärmeproduktionsverlagerung vom Zusatzheizgerät hin zum BHKW findet ebenfalls statt. Das ZHG läuft in Szenario 2 nur an Tagen mit sehr niedrigen Außentemperaturen und konstant hohem Wärmebedarf. Im Standardbetrieb ist der Speicher am Ende der Nachtabsenkung oft leer, weshalb die morgendliche Spitze nur mit Hilfe des ZHG gedeckt werden kann.

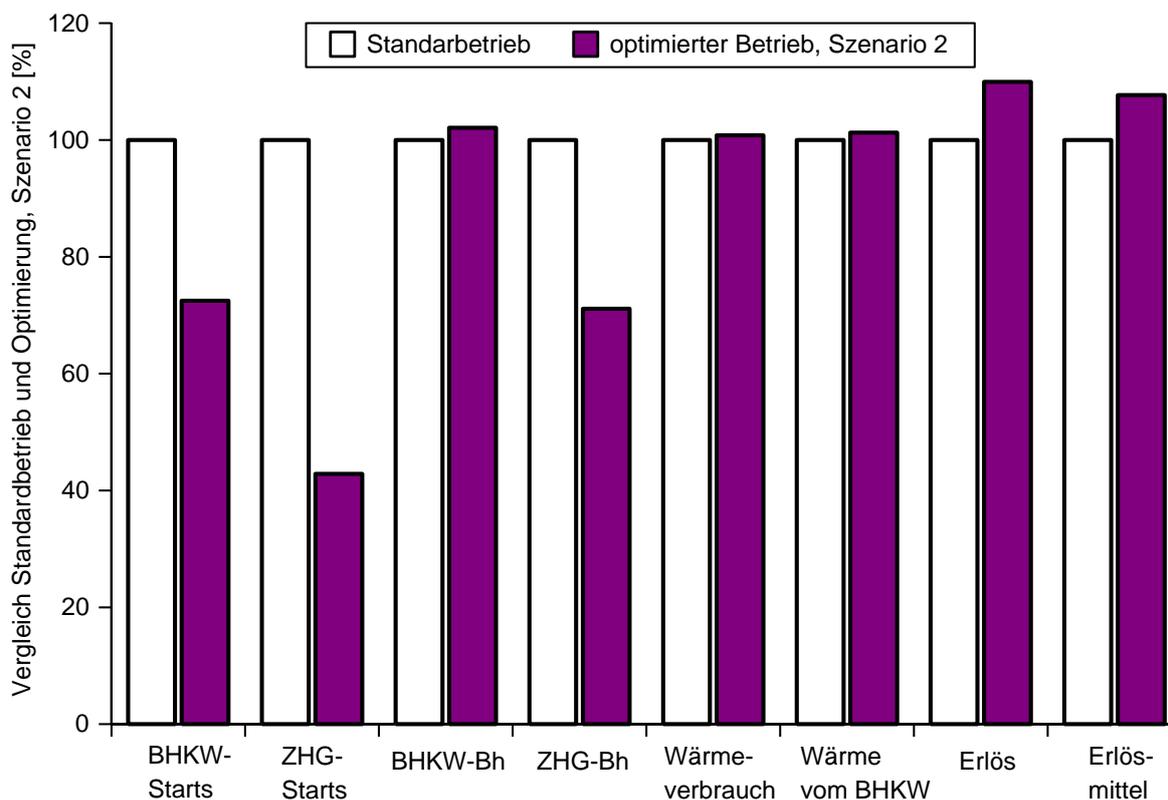


Abbildung 7-17: Jahresvergleich: Standardbetrieb - optimierter Betrieb nach Szenario 2

Wirtschaftlich betrachtet steigen sowohl die Erlöse als auch die Durchschnittserlöse stark an. Obwohl das BHKW auch wärmegeführt vergleichsweise hohe Erlöse erzielt (siehe Kapitel 5.1.3), können bei dem optimierten Szenario die Erlöse um knapp 10 % und die auf die erzeugte Strommenge bezogenen Erlöse um 7,7 % gesteigert werden.

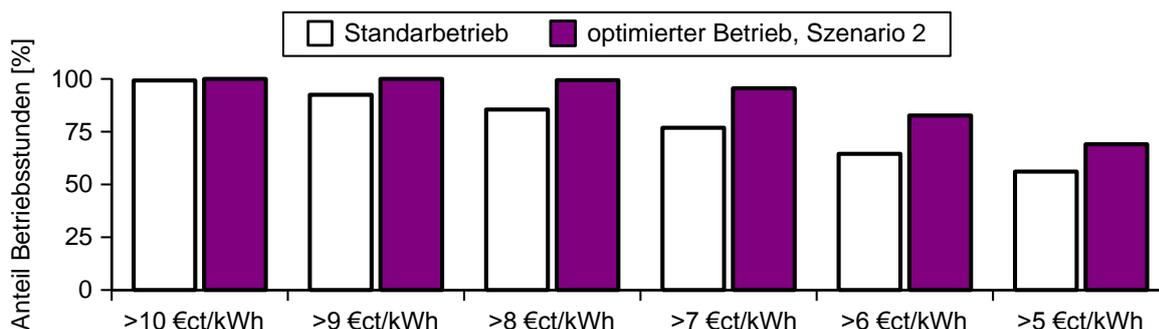
Betrachtet man nicht die Erlöse, sondern die jeweiligen Stunden, an denen der Börsenstrompreis hoch ist (Tabelle 7-9), dann lassen sich flexible Mikro-KWK-Anlagen als Spitzenlastkraftwerke auffassen.

Beispielsweise lag der Börsenstrompreis im Jahr 2012 an genau 107 Stunden über 9 €/kWh. Durch den flexiblen BHKW-Betrieb kann sichergestellt werden, dass das BHKW während dieser Stunden immer in Betrieb ist. Selbst bei Strompreisen größer 7 €/kWh ist das BHKW an mehr als 95 % der Stunden in Betrieb.

**Tabelle 7-9: Stunden, in denen das BHKW bei verschiedenen Mindest-Börsenstrompreisen in Betrieb ist**

	>10 €/kWh	>9 €/kWh	>8 €/kWh	>7 €/kWh	>6 €/kWh	>5 €/kWh
<b>Anzahl [h]</b>	71	107	190	453	1.229	2.828
<b>Standardbetrieb [h]</b>	70,5	99	162,5	348,2	793,6	1.587,6
<b>Szenario 2 [h]</b>	71	107	188,9	432,8	1.016	1.953
<b>Standardbetrieb [%]</b>	99,3%	92,5%	85,5%	76,9%	64,6%	56,1%
<b>Szenario 2 [%]</b>	100,0%	100,0%	99,4%	95,5%	82,7%	69,1%

Aufgrund des häufigen Zusammentreffens von hohen Strompreisen und Wärmebedarf (vgl. Kapitel 5.1.4) eignet sich auch der wärmegeführte Betrieb zur Abdeckung von Lastspitzen. In Stunden mit Preisen über 10 €/kWh ist das BHKW auch im Standardbetrieb fast immer in Betrieb. Da die Stunden mit hohen Börsenstrompreisen oft nebeneinander liegen, die Speicherkapazität begrenzt ist und keine Wärmeprognose eingesetzt wird, sinkt der Anteil der BHKW-Betriebsstunden während der Hochpreisphasen im Vergleich zu Szenario 2 jedoch rapide ab (Abbildung 7-18).



**Abbildung 7-18: Anteil der Stunden, in denen das BHKW bei verschiedenen Mindest-Börsenstrompreisen in Betrieb ist**

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

In Kapitel 1 dieser Arbeit wurden die Herausforderungen skizziert, mit denen sich das deutsche Stromsystem aktuell und in näherer Zukunft insbesondere aufgrund des Ausbaus der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien konfrontiert sieht. Daraus wurde geschlussfolgert, dass große Chancen, eine nicht zuletzt auch aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvolle Reaktion auf Stromnachfrage- und Stromangebotsschwankungen zu finden, in der Flexibilisierung der Stromerzeugung von Kleinst-KWK-Anlagen liegen. Diese kann über die Entkopplung von Wärmeverbrauch und Stromproduktion durch ein gesteuertes Speichermanagement unter Einbeziehung von Wärmebedarfsprognosen realisiert werden.

In Kapitel 2 wurden Grundlagen der KWK-Technologien, Wärmespeicherung, Regelungsstrategien und Dimensionierung dem aktuellen Stand der Technik gemäß vorgestellt, wobei die drei zuletzt genannten Aspekte in dieser Arbeit kritisch „auf dem Prüfstand standen“. Zudem wurden ökologische und ökonomische Betrachtungen von Kleinst-KWK-Technologien in die Potenzialabschätzung einbezogen.

Im dritten Kapitel wurden der Feldtest „Miesbach“ und der am IfE aufgebaute Prüfstand als Untersuchungsobjekte dieser Arbeit vorgestellt, das BHKW-Betriebs- und Regelungsverhalten untersucht und mittels Typtagversuchen Referenzfälle definiert, welche später zum Vergleich herangezogen werden konnten.

Kapitel 4 fokussierte auf den Speicher, d.h. auf das Speicherverhalten und den Speicherinhalt, da davon ausgegangen wird, dass dessen effektivere und gesteuerte (Aus-)Nutzung über ein Speichermanagementsystem wesentlich zu einer Flexibilisierung der Stromproduktion beiträgt. Gefunden wurde dann auch eine Speicherinhaltsdefinition, die allen nachfolgenden Analysen zugrunde lag. Die Speicherinhaltsdefinition wurde auf die Typtaganalyse angewendet, woraus sich ergab, dass die de facto genutzte Speicherkapazität wesentlich geringer als die potentielle ist.

Im fünften Kapitel wurden die drei Eingangsparameter (EEX-Preis, Wärmebedarfsprognose, Speicherkapazität) der Optimierungsfunktion eingeführt bzw. hergeleitet und in Kapitel 6 die Optimierungsfunktion, die BHKW-Fahrpläne und Speichereinsatzpläne sowie die intelligente Regelung vorgestellt. Zudem ließ sich deren Zusammenwirken und Funktionsweise (auch für den Fall von Prognoseabweichungen) theoretisch analysieren, bevor diese – wie im vorangehenden, siebten Kapitel präsentiert und diskutiert – in Prüfstandsversuchen getestet wurden.

Gezeigt werden konnte im Zuge dieser Arbeit, dass eine flexible Stromerzeugung durch eine Umstellung der Mikro-KWK-Regelung auf Energieführung möglich und sinnvoll ist, wenn man das Gesamtsystem in den Blick nimmt, eine kreative Speicherausnutzung vornimmt und den prognostizierten Wärmebedarf in die Regelung einbezieht. Es wurde deutlich, dass auch im Fall von Prognoseabweichungen die Regelung so weit optimiert werden kann, dass das Betriebsverhalten immer noch besser, als im „klassischen“ Wärmeführungsmodus ist. So hat die in dieser Arbeit an den EEX-Preisen ausgerichtete steuerbare Stromerzeugung den Vorteil, dass Mikro-KWK-Anlagen als Spitzenlastkraftwerke funktionieren können und zudem keinen Strom produzieren, wenn keine Nachfrage besteht. Verbesserte Speicherausnutzung

und Wärmeprognose befördern zudem einen effizienteren Betrieb der Anlage: diese taktet seltener und weist längere Zyklen auf, wodurch nicht zuletzt Verschleiß verringert werden kann. Was bislang noch aussteht, ist der notwendige nächste Schritt: die Erprobung der flexiblen Stromerzeugung im Rahmen eines Feldtests.

Neben einem Praxistest sind auch Möglichkeiten der Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit zu prüfen und näher auszuarbeiten. So kann, wie in Kapitel 2.2.4 angedeutet wurde, die entwickelte Methodik prinzipiell für alle KWK-Technologien eingesetzt werden. Vor- und ggf. Nachteile der anderen Technologien gilt es dann in die Überlegungen einzubeziehen: Im Falle von Verbrennungsmotor-BHKW lässt sich etwa feststellen, dass deren höhere Vorlauftemperaturen zu einer Vergrößerung der nutzbaren Speicherkapazität und demzufolge zu einer noch größeren Flexibilität führen.

Ein Einsatz verschiedener KWK-Technologien ist auch im Hinblick auf neue BHKW-Dimensionierungsmöglichkeiten sinnvoll. Während BHKW zurzeit auf mindestens 5.000 Betriebsstunden ausgelegt werden, könnte es sich zukünftig als sinnvoll erweisen, die BHKW-Laufzeit gezielt auf wenige Stunden zu begrenzen, die Anlagen dafür aber mit hohen (elektrischen) Leistungen zu dimensionieren. Damit Mikro-BHKW trotzdem möglichst viel Strom erzeugen, erscheint der Einsatz von KWK-Technologien mit hoher Stromkennzahl (z.B. größere Verbrennungsmotoren oder, bei Kostenreduzierung, Brennstoffzellen) erstrebenswert.

Größere (elektrische) Leistungen führen fast immer auch zu höheren thermischen Leistungen, was größere Speicher(-Volumen) unabdingbar macht. Eine höhere Speicherkapazität kann bei gleichem Volumen jedoch auch durch latente oder chemische Speicherung (vgl. Kap. 2.4) erreicht werden. Allerdings ist die hier gezeigte Methode zur Bestimmung des aktuellen Speicherenergieinhalts bei diesen Speicherarten nicht anwendbar. Demzufolge kann auch der Wärmeverbrauch nicht mit Speichertemperaturfühlern bestimmt werden, was zwangsläufig einen Bedarf an zusätzlicher Messtechnik mit sich bringt.

An dieser Stelle lohnt sich eine kurze Abschätzung, ob bzw. inwieweit Mikro-KWK-Anlagen im Haushaltsbereich unter Berücksichtigung vorherrschender KWK-Technologie und der Möglichkeiten einer (zukünftigen) Verbreitung nennenswerte Beiträge zur Unterstützung des Stromsystems in Deutschland leisten können. Unterscheiden lassen sich bspw. folgende drei Szenarien, wobei sich die maximale Zahl der installierten Anlagen an den von Prognos ermittelten 700.000 Mikro-KWK-Anlagen („oberes Szenario“ [PRO 13]; vgl. Kapitel 2.1) orientiert.

Im ersten Szenario („Mikro-Stirling“) wird vorausgesetzt, dass die Stirling Technologie einen Großteil des Mikro-KWK-Marktes, der 100.000 Anlagen umfasst, beherrscht. Das zweite Beispiel („Mikro-BHKW“) geht von einem Mix verschiedener KWK-Technologien und einer mittleren Verbreitung (400.000) aus. Da hier keine Technologie den Markt dominiert, ist die mittlere elektrische Leistung größer und die thermische Leistung kleiner als bei dem Mikro-Stirling Szenario. Im dritten Fall („Mini-BHKW“) wird unterstellt, dass BHKW mit noch höherer elektrischer Leistung (BHKW-Dimensionierung als Spitzenlastkraftwerke) und Stromkennzahl (beispielsweise durch eine hohe Durchdringungsrate von

BSZ) für die flexible Stromerzeugung zur Verfügung stehen und die von Prognos ermittelte Stückzahl von 700.000 vorliegt.

Mit zunehmender Anlagenzahl würden Mikro-BHKW auch in Gebäuden mit geringerem Wärmebedarf eingesetzt werden. In dieser Analyse beträgt der Wärmebedarf der Szenarien zwischen 25.000 und 15.000 kWh. Die mittlere BHKW-Laufzeit errechnet sich aus dem Wärmebedarf und der angenommenen thermischen Leistung.

Die aufsummierten elektrischen Leistungen (Tabelle 8-1) verweisen darauf, dass eine nennenswerte Leistung entweder durch eine hohe Anzahl oder durch eine hohe mittlere Leistung der BHKW erreicht werden kann. Im dritten Szenario, das beide Kriterien erfüllt, ergeben sich insgesamt 3,5 GW. Dagegen ist die erzeugte Strommenge (0,31 TWh bis 6,6 TWh) vergleichsweise gering, womit einmal mehr deutlich wird, dass BHKW in Ein- und Zweifamilienhäuser zwar nicht wesentlich zur Deckung des Stromverbrauchs in Deutschland beitragen könne, jedoch zur Spitzenlastabdeckung in Frage kommen.

**Tabelle 8-1: Abschätzung des Potenzials von flexiblen Mikro-KWK-Anlagen**

Szenario	Mikro-Stirling	Mikro-BHKW	Mini-BHKW
<b>Anlagenanzahl [-]</b>	100.000	400.000	700.000
<b>Leistung el. / th. [kW]</b>	1 / 8	2 / 5	5 / 8
<b>Wärmebedarf pro Gebäude [kWh]</b>	25.000	20.000	15.000
<b>BHKW-Laufzeit [h]</b>	3.125	4.000	1.875
<b>kumulierte el. Leistung [GW]</b>	0,10	0,80	3,5
<b>kumulierte Stromerzeugung [TWh]</b>	0,31	3,2	6,6
<b>th. Speicherkapazität [GWh]</b>	1,5	4,0	11

Nicht zuletzt ist für die Einbindung einer elektrischen Heizvorrichtung auch das nutzbare Speichervolumen entscheidend. Ausgehend von einer mittleren, immer zur Verfügung stehenden Speicherkapazität von 15 kWh ergibt sich für die 100.000 Mikro-Stirling Systeme eine Speicherkapazität von 1,5 GWh. Bei den anderen Szenarien wird vorausgesetzt, dass die mittlere Speicherkapazität mit der thermischen Leistung korreliert, was in Szenario 3 zu einer Kapazität von über 11 GWh führt. Wenn man darüber hinaus annimmt, dass die Speicher mit einer elektrischen Heizvorrichtung auf über 90 °C geladen werden können, würden sich die Kapazitäten nochmals verdoppeln.

Aus den Ergebnissen der vorangehenden Kapiteln lässt sich schlussfolgern, dass bei der für die Abschätzung gewählten BHKW-Dimensionierung, Anlagen-Hydraulik und den Mindesttemperaturen im Sommer an zwei (frei wählbaren) Stunden des Tages Strom erzeugt werden und somit der Spitzenlast begegnet werden kann. Im Winter kann die flexible bzw. geplante Stromproduktion sogar auf mehrere Stunden ausgeweitet werden.

Falls die berechnete Speicherkapazität als elektrische Last fungieren soll, steht im Sommer die gesamte (definierte) Speicherkapazität zur Verfügung. Letztgenannte bzw. das negative Potenzial ist je nach Ladeleistung der elektrischen Heizvorrichtung im Winter nochmals deutlich höher.

Im Vergleich zu anderen DSM-Maßnahmen in Haushalten (Geschirrspülmaschinen, Waschmaschinen und Trockner, Kühl- und Gefriergeräte), bei denen das theoretische Potenzial riesig, das tatsächlich verfügbare jedoch äußerst gering ist ([ROON 10]: theoretisch: +3,85GW / -13,42 GW; praktisch: +0,16GW / -0,73 GW) und nur kurzzeitig nachgefragt werden kann, ist das Potenzial von Mikro-KWK-Anlagen vergleichsweise hoch.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik ist nicht nur auf unterschiedliche Technologien anwendbar, sondern außerdem über Ein- oder Zweifamilienhäuser hinaus auf größere Wohngebäude oder Gebäude des GHD-Sektors übertragbar. Bedacht werden muss, dass in großen Wohngebäuden hohe Zapfleistungen erreicht werden müssen, weshalb meist die Hydraulikkonfiguration aus Kap. 2.4.2 verwendet wird. Aufgrund der hohen Warmwassersollwerte bzw. der dafür notwendigen Speicherladetemperaturen verliert der Pufferspeicher nutzbare Speicherkapazität. Für Gewerbebetriebe werden ebenfalls oft hohe Warmwassertemperaturen und -leistungen benötigt, was die Flexibilität in der Stromerzeugung einschränkt. Andere Gebäude des GHD-Sektors (öffentliche Gebäude, Bürogebäude) haben dagegen kaum Warmwasserbedarf, wodurch sich die Flexibilität erhöhen würde.

Die Ergebnisse der Arbeit können auch für andere Wärmeerzeuger im Gebäudebereich eingesetzt werden. Mittlerweile weit verbreitet sind Wärmepumpen. Wenn diese steuerbar betrieben werden, können sie als flexible Stromverbraucher bzw. als Stromnichtverbraucher betrachtet werden. Durch vom Netzbetreiber festgelegte Sperrzeiten ist eine gewisse Flexibilität bereits vorhanden. In der Regel werden die Sperrzeiten über das träge Verhalten der meist installierten Fußbodenheizungssysteme überwunden. Die Verwendung einer Wärmebedarfsprognose und zusätzlich installierte Pufferspeicher könnten die Anlagenflexibilität jedoch deutlich steigern. Bei weiteren Wärmeerzeugern, wie beispielsweise solarthermischen Anlagen, könnte ein Speichermanagement in Verbindung mit einer Wärmebedarfsprognose dafür sorgen, dass möglichst wenig Wärme vom Zusatzgerät erzeugt wird und die Effizienz sowie der Ertrag von Solaranlagen, z.B. durch niedrige Solarkreistemperaturen, gesteigert werden können. Auch eine Einbindung einer elektrischen Heizvorrichtung in Mikro-KWK-Systeme oder in anderen Wärmeerzeugern könnte im Zusammenspiel mit Speichermanagement und Wärmebedarfsprognose sinnvoll gestaltet werden. Nicht zu unterschätzen sind dabei die jeweils vergrößerten Wärmespeicherkapazitäten, da es elektrische Heizvorrichtungen erlauben, den Speicher bis auf ca. 95 °C aufzuheizen.

Die Maximierung der Stromerzeugung mittels EEX-Preise, wie sie in dieser Arbeit betrachtet wurde, kann durch andere Zielgrößen ersetzt werden. Dezentrale intelligente Systeme können auch Fahrpläne oder Anreize eines übergeordneten Systems, beispielsweise eines zentralen Energiemanagers eines virtuellen Kraftwerks, empfangen. Somit könnten die Vorteile eines vK genutzt werden, ohne dass der BHKW-Betreiber die Kontrolle über seine Anlage verliert (vgl. Kap. 1.3.2).

Flexible Stromerzeugung mit Mikro-KWK Anlagen könnte auch dazu verwendet werden, den (Strom-)Autarkiegrad eines Gebäudes zu erhöhen. Eine Integration dezentraler EE-Stromerzeuger (PV, Kleinwindanlage) könnte so erfolgen, dass die BHKW-Stromproduktion antizyklisch stattfindet. Darüber hinaus könnte mit einem intelligenten Gebäudeenergie-Managementsystem dafür Sorge getragen werden, dass alle Erzeuger, Verbraucher und evtl. auch elektrische Speicher miteinander interagieren und zusammen so betrieben werden, dass die Kosten (welcher Art auch immer) minimiert werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik kann an verschiedenen Stellen weiter verbessert werden. Neben einer genaueren Wärmebedarfsprognose könnte auch die Optimierung verfeinert werden. Zusätzlich ließe sich die Betrachtungsebene vergrößern, indem nicht nur das KWK-System sondern das gesamte Gebäude in den Fokus rückt.

Hinsichtlich der Prognosegenauigkeit könnten (in manchen Gebäuden) zusätzliche Kriterien dafür sorgen, dass sich die Prognosegüte verbessert. Bei Gebäuden mit hohem Fensteranteil führt das Hinzunehmen der solaren Einstrahlung bzw. des Bewölkungsgrades zu einer genaueren Prognose. Im Falle von einigen Wohngebäuden (bspw. mit berufstätigen Bewohnern) sowie bei Gewerbebetrieben könnte auch eine Einbeziehung des Wochentags, oder eine auf gewichtete Mittelwerte beruhende Prognoseerstellung, zu Verbesserungen führen. Um mit mehreren Kriterien eine möglichst exakte Prognose zu erhalten, bieten sich beispielsweise neuronale Netze an. Forschungsarbeiten hierzu laufen bereits.

Dem verwendeten Optimierungsalgorithmus könnten weitere Randbedingungen hinzugefügt werden. So könnten die Starts mit den Ergebnissen dynamischer Versuchsreihen aus Kap. 3.3.1 zusammengeführt werden und die Strafkosten sich somit aus der verminderten Effizienz und den Abnutzungseffekten des Motors zusammensetzen.

Das instationäre Betriebsverhalten könnte hinsichtlich der Stromerzeugung des Mikro-BHKW ebenso Eingang in die Optimierung finden. Des Weiteren könnten die sinkenden Wirkungsgrade (Abbildung 3-24) und die realen Speicherverluste in der Optimierung implementiert werden. Darüber hinaus gilt es zu prüfen, ob mögliche Komforteinschränkungen, wie geringe Warmwassertemperaturen oder zu geringe Heizkreistemperaturen, über eine geeignete Strafkostenfunktion abgebildet werden können.

Bei der Umsetzung am Prüfstand könnte der Fahrplan nicht nur verschoben werden, sondern eine kontinuierliche Optimierung (eine sogenannte Resttagsplanung) durchgeführt werden. Die Resttagsplanung könnte auch eine Beurteilung der auftretenden Fehlprognosen hinsichtlich systematischer Fehler beinhalten, bspw. wegen falscher Wetterprognosen oder Zeitfehler, da Bewohner später aufstehen.

Noch mehr Flexibilität in der Stromerzeugung könnte erreicht werden, wenn nicht nur der Speicher bzw.

das KWK-System im Mittelpunkt der Flexibilisierungsmaßnahmen steht, sondern auch die thermische Last (Heizkreis) flexibilisiert würde. In diesem Fall stellt auch das Gebäude eine Art (thermischen) Speicher dar. Die Raumtemperatur kann beispielsweise innerhalb der thermischen Behaglichkeitskriterien (Luftfeuchte, Raumtemperatur) variiert werden. Neben der Variabilität der Sollraumtemperatur können durch intelligente Belegungspläne auch einzelne Zimmer oder sogar das ganze Gebäude (temperatur-)abgesenkt werden. Bei einem gefüllten thermischen Speicher könnte es sich in manchen Fällen (i.d.R. bei gut gedämmten Gebäuden) sogar lohnen, Räume über die Solltemperatur aufzuheizen, sofern auf eine BHKW-Stromerzeugung nicht verzichtet werden kann.

## A. Anhang

### A.1 Ergänzende Abbildungen

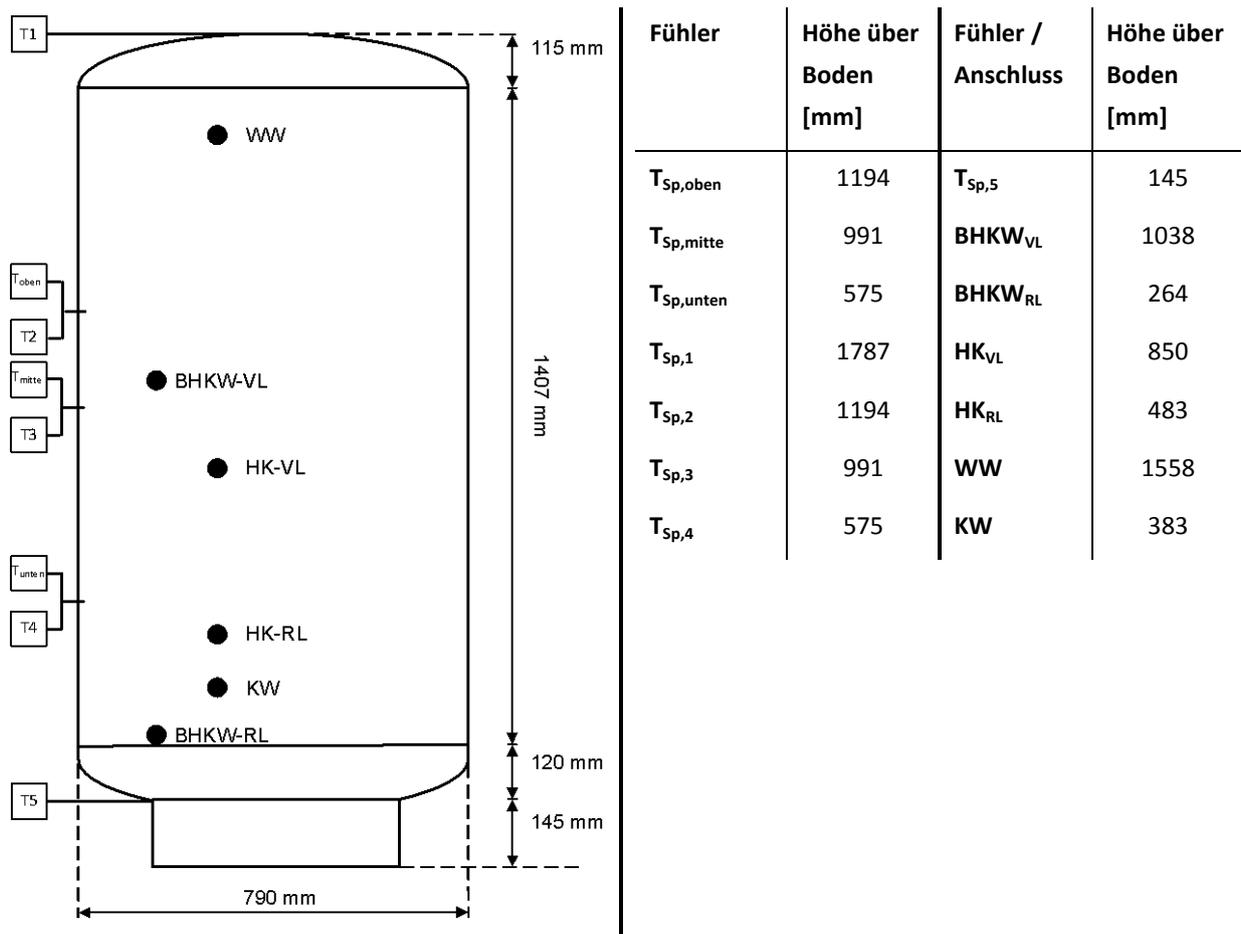


Abbildung A-1: Schematische und tabellarische Darstellung der Anschlusshöhen und Positionierung der Speichertemperaturfühler am Vitocell 340-M, [VIE 13-b]

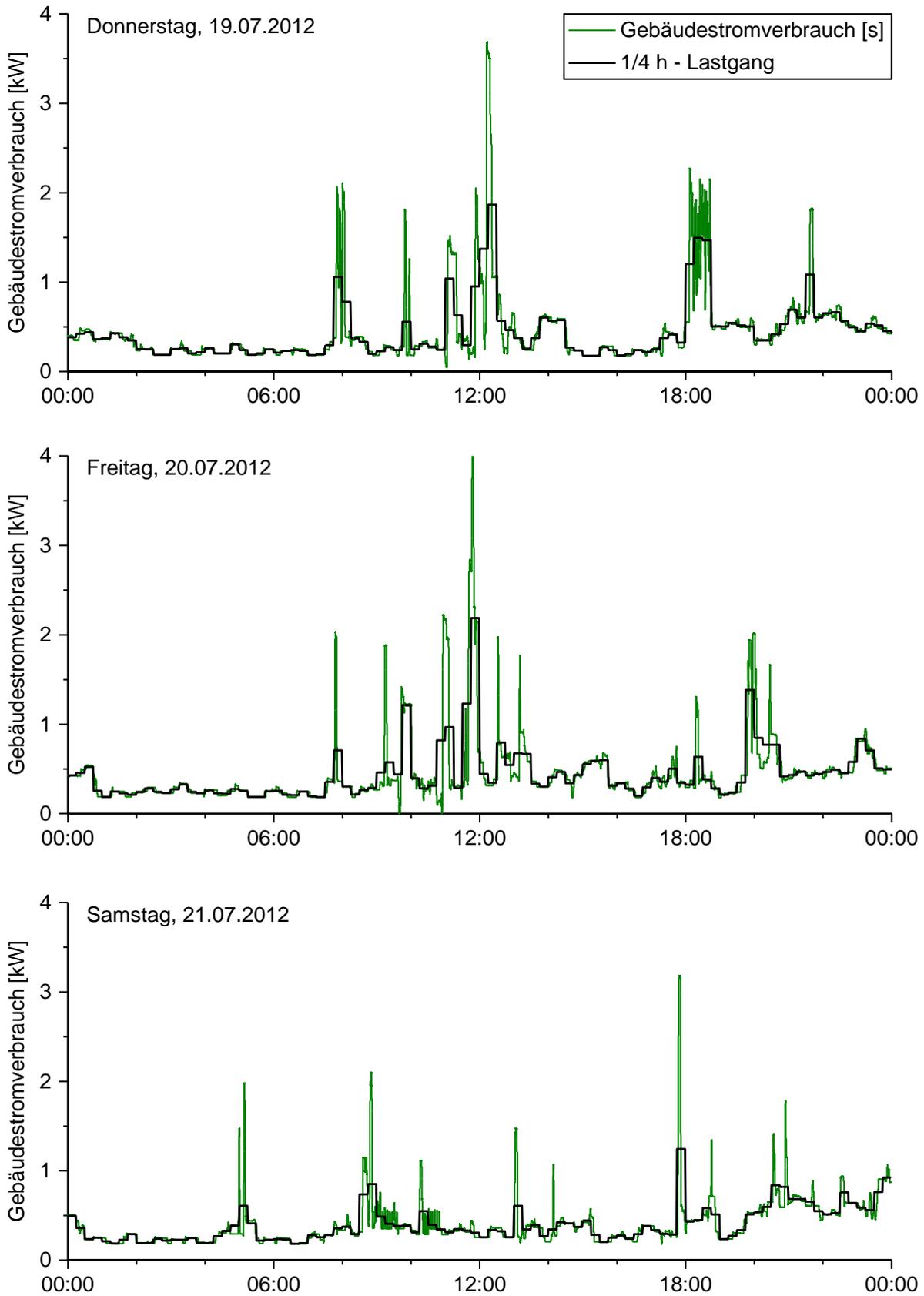


Abbildung A-2: Stromverbrauch in Miesbach vom 19.07. bis 21.07.2012, Detailansicht

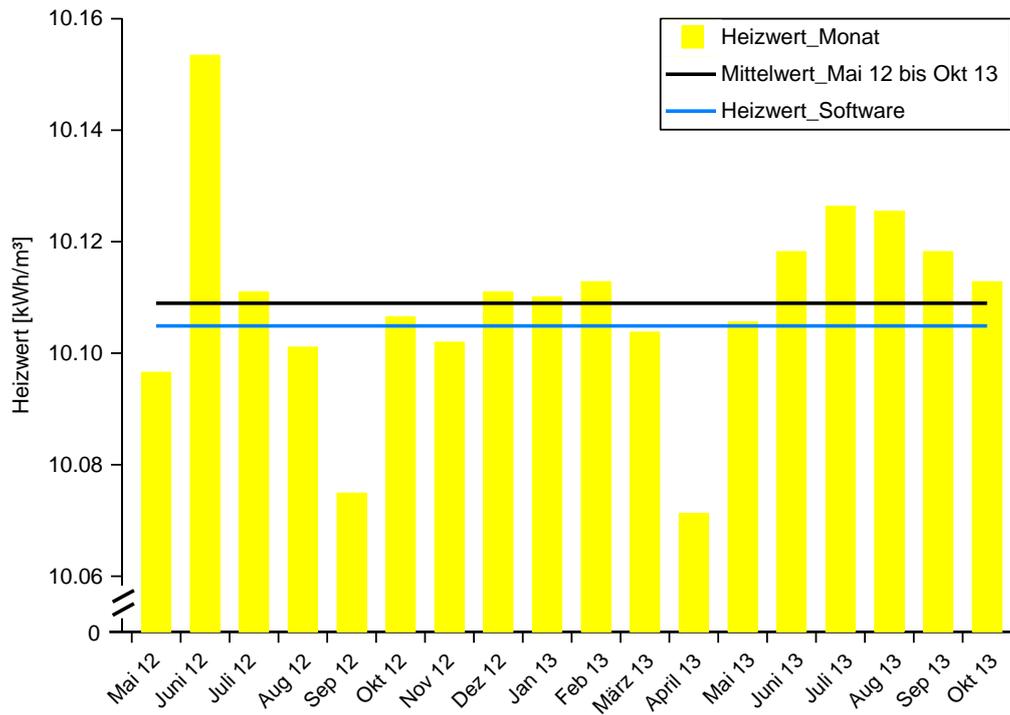


Abbildung A-3: Abrechnungsheizwerte der Stadtwerke München, Mai 2012 bis Oktober 2013

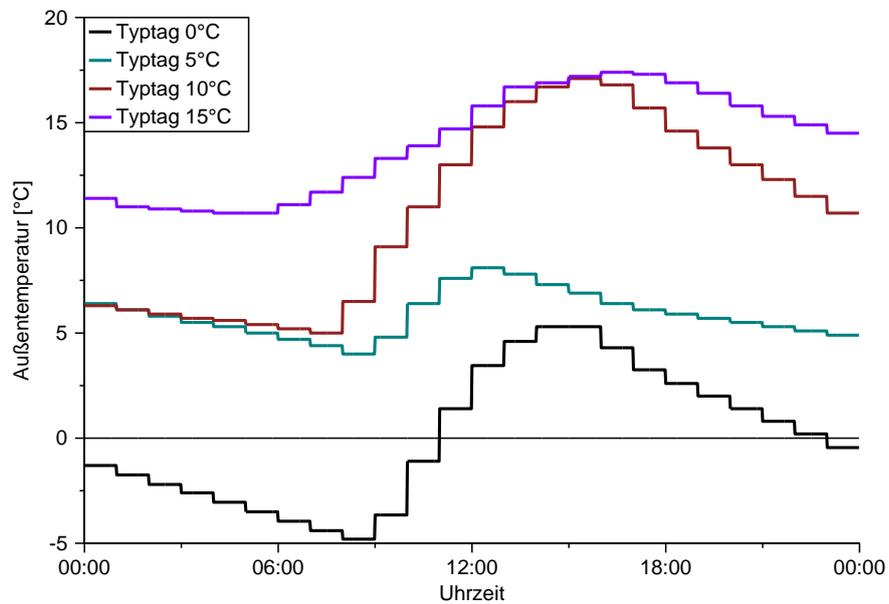


Abbildung A-4: Außentemperaturverlauf an den Typtagen

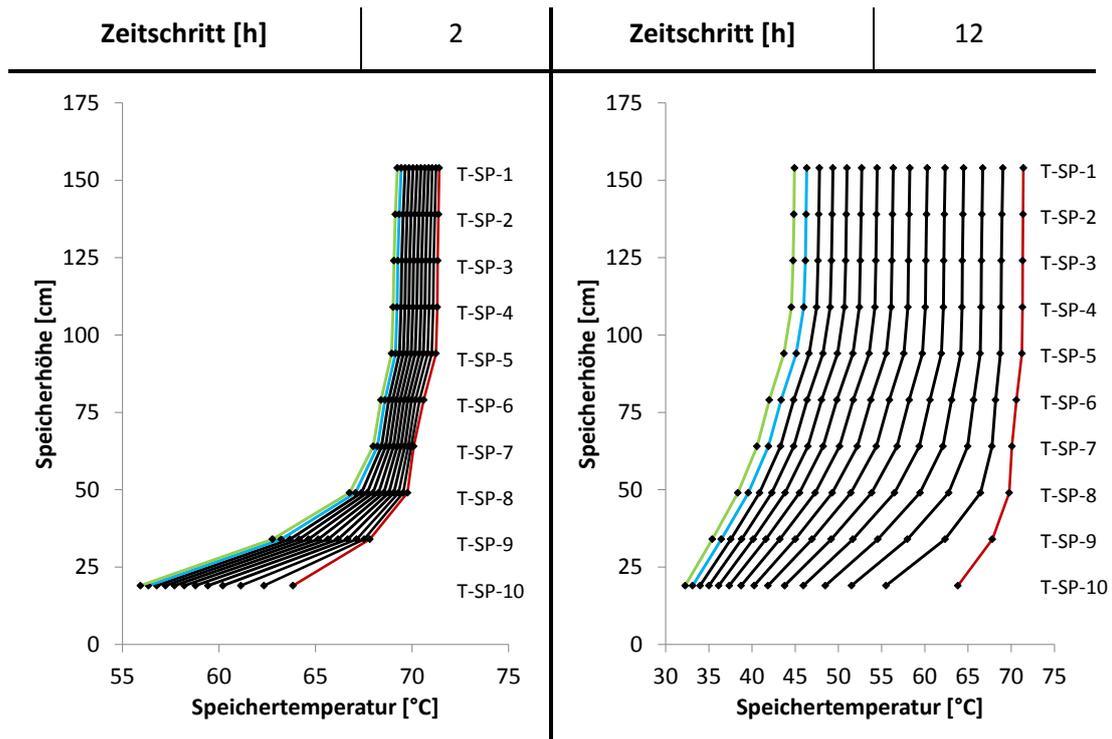


Abbildung A-5: Speicherabkühlkurven II

$\dot{Q}_{HK,nM}$ [kW]	7,6
$T_{HK,vL}$ [°C]	47,5
$\dot{V}_{HK,nM}$ [l/s]	0,16
Zeitschritt [min]	30

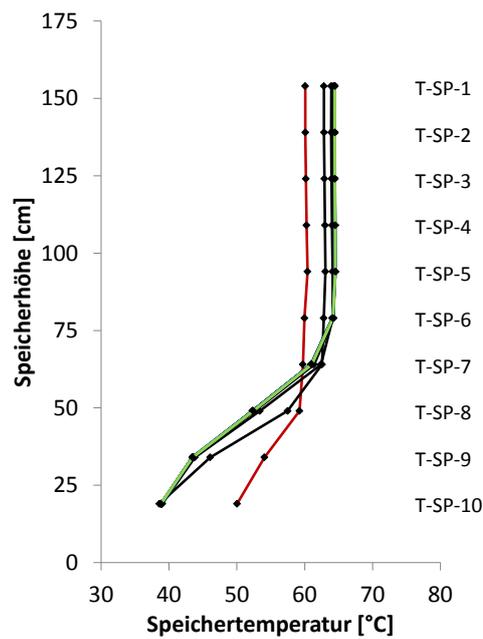


Abbildung A-6: Gleichzeitiges Laden und Entladen, Heizkreisverbrauch identisch zur BHKW Leistung

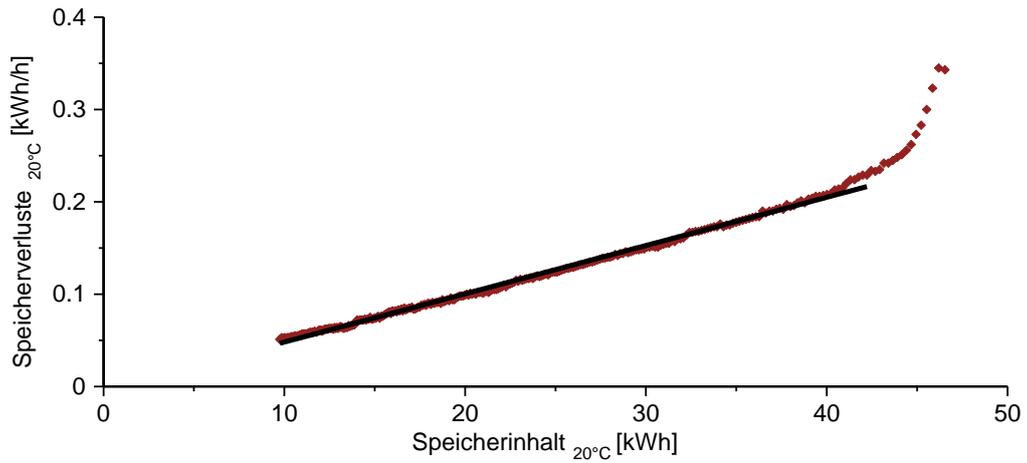


Abbildung A-7: Speicherverluste in Abhängigkeit des Energieinhalts<sub>20°C</sub>

$$\dot{E}_{Sp,V,20^{\circ}C} = 0,0052 * \frac{E_{Sp,20^{\circ}C}}{1 h} + 0,004 \frac{kWh}{h} \tag{A.1}$$

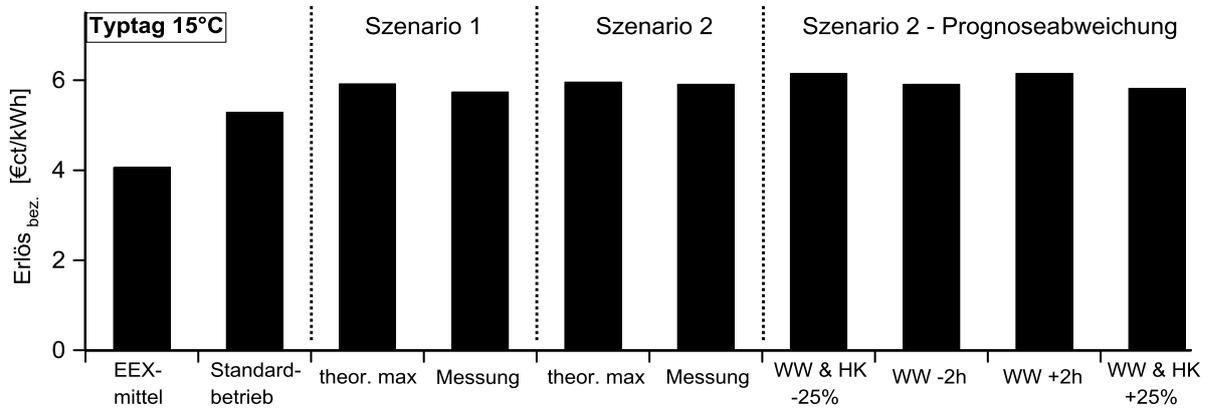


Abbildung A-8: Durchschnittlicher Erlös am Typtag 15 °C

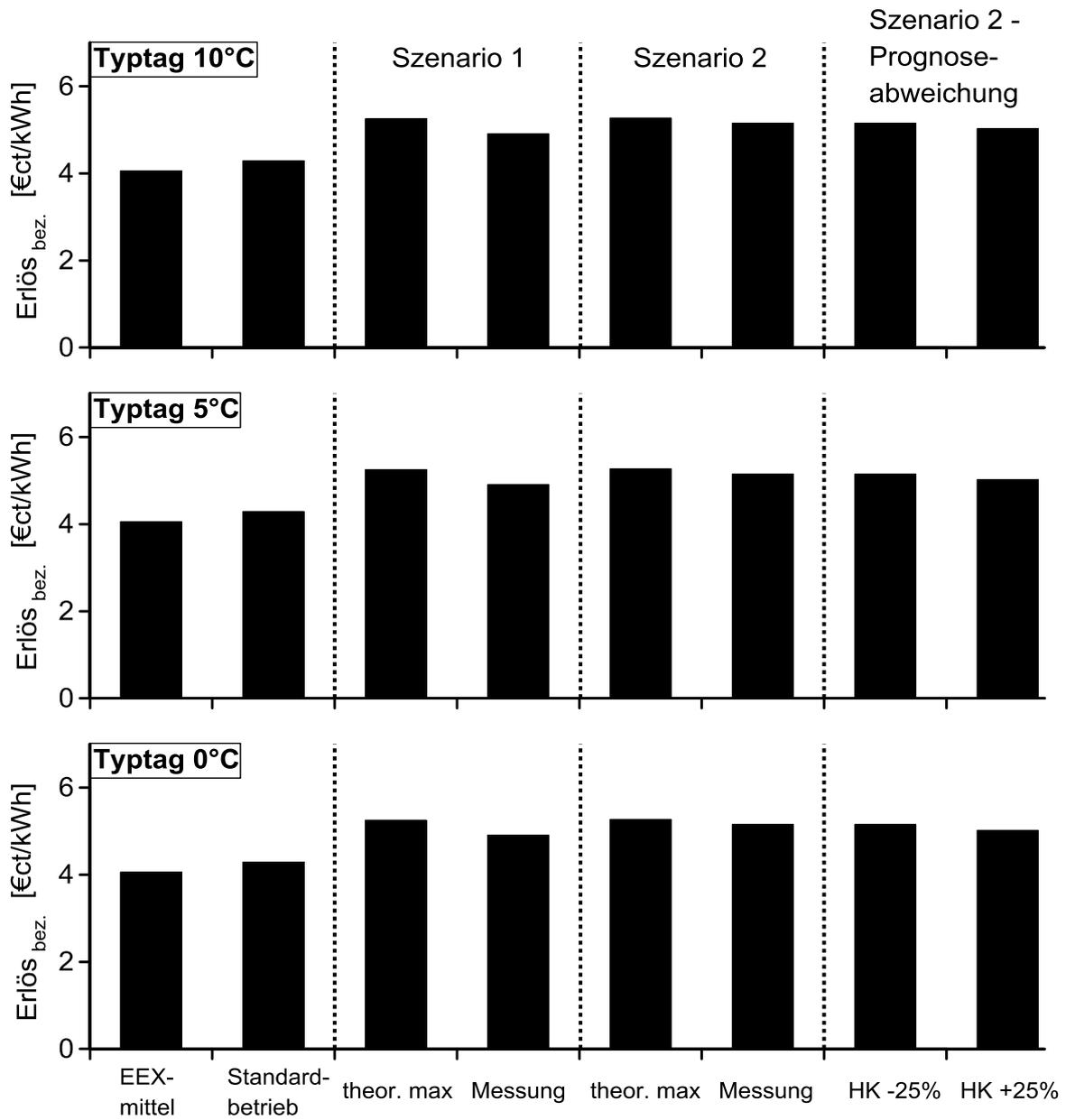


Abbildung A-9: Durchschnittlicher Erlös an den Typtagen 10 °C, 5 °C und 0 °C

## A.2 Ergänzende Tabellen

Tabelle A-1: Basisförderung für Klein-KWK-Anlagen, Mini-KWK-Impulsprogramm, [BMU 08]

Förderbetrag über die Leistungsstufen [€/kW <sub>el</sub> ]	1.550	775	250	125	50
Leistungsstufe [kW <sub>el</sub> ]	0-4	4-6	6-12	12-25	25-50

Tabelle A-2: Fixdaten zur BHKW-Ökonomie

BHKW <sub>thermisch</sub> [kW]	5,0	vNNE [€ct/kWh <sub>eingespeist</sub> ]	1,0
BHKW <sub>elektrisch</sub> [kW]	1,0	Zins [%]	0
BHKW <sub>Gas</sub> [kW]	6,5	Kalkulationsdauer [a]	10
Nutzungsgrad GBWG [%]	90,0	ESRE [€ct/kWh <sub>Gas</sub> ]	0,511
Wartungsmehrkosten [€ct/Bh]	4,0		

Tabelle A-3: Einstellmöglichkeiten für den Betreiber eines Viessmann Mikro-BHKW

	Einstellbereich	eingestellter Wert bei Inbetriebnahme	Anmerkungen
Heizbetrieb [hh:mm]	00:00-24:00	06:00-22:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>bis zu 3 Heizkreise</li> <li>3 Komfortzeiten</li> </ul>
Komfortwert [°C]	4 - 35	22	auf den Raumfühler bezogen
reduzierter Wert [°C]	4 - 35	14	s.o., deutliche Nachtabsenkung
Steigung Heizkurve [-]	0,1 - 4	1,2	
Sommer-/Winterheizgrenze [°C]	8-30	18	Heizkreis wurde meist manuell deaktiviert
Warmwasserbetrieb [hh:mm]	00:00-24:00	06:00-22:00	
Sollwert [°C]	8 - 80	50	
reduzierter Sollwert [°C]	8 - 80	40	

Tabelle A-4: Einstellmöglichkeiten für den Betreiber eines Whispergen Mikro-BHKW

	Einstellbereich	eingestellter Wert	Anmerkungen
<b>Heizbetrieb [hh:mm]</b>	00:00-24:00	05:00-22:00	<ul style="list-style-type: none"> <li>jeder Wochentag separat einstellbar</li> <li>bis zu 3 Heizkreise</li> </ul>
Steigung Heizkurve [-]	0,1 – 2,0	1,3	
Niveau <sup>49</sup> [°C]	15 - 25	20	Heizkreisregelung erfolgt durch den Prüfstand
Nachtabsenkung [°C]	0 - 20	10	
Abschaltung HK bei T <sub>A</sub> [°C]	0 - 25	20	
<b>Warmwasserbetrieb [hh:mm]</b>	00:00-24:00	05:00-22:00	jeder Wochentag separat einstellbar
Sollwert [°C]	20 - 65	50	
Nachtabsenkung [°C]	0 - 15	10	
<b>Zirkulationsbetrieb [hh:mm]</b>	00:00-24:00	-	
Sollwert [°C]	20 - 65	-	Zirkulation wird vom Prüfstand geregelt
Nachtabsenkung [°C]	0 - 15	-	

Tabelle A-5: Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, 0 °C

	HK -25%	HK -12,5%	Basis	HK +12,5%	HK +25%
<b>BHKW – Bh [h]</b>	16,12	17,82	21,00	23,25	24,00
<b>ZHG – Bh [h]</b>	0	0	0	0	2,95
<b>Erlös [€ct]</b>	69,4	77,3	88,8	95,5	97,5
<b>Erlös<sub>bez</sub> [€ct/kWh]</b>	4,31	4,34	4,23	4,11	4,06

<sup>49</sup> Das Niveau entspricht der Soll-Vorlauftemperatur bei einer Außentemperatur von 20 °C.

Tabelle A-6: Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, 5 °C

	HK -25%	HK -12,5%	Basis	HK +12,5%	HK +25%
BHKW – Bh [h]	10,30	12,65	14,00	15,43	16,87
Erlös [€ct]	48,3	59,3	65,4	70,4	75,0
Erlös <sub>bez</sub> [€ct/kWh]	4,69	4,69	4,67	4,56	4,45

Tabelle A-7: Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, 15 °C

	HK & WW -25%	HK & WW -12,5%	Basis	HK & WW +12,5%	HK & WW +25%
BHKW – Bh [h]	2,60	2,88	4,00	4,33	4,67
Erlös [€ct]	15,9	17,7	23,8	25,3	26,8
Erlös <sub>bez</sub> [€ct/kWh]	6,13	6,13	5,94	5,84	5,75

Tabelle A-8: Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, Sommer

	WW -50%	WW -25%	Basis	WW +25%	WW +50%
BHKW – Bh [h]	2,00	2,00	2,00	2,48	2,60
Erlös [€ct]	12,8	12,8	12,8	15,3	15,7
Erlös <sub>bez</sub> [€ct/kWh]	6,40	6,40	6,40	6,14	6,03

Tabelle A-9: Durchschnittlicher Erlös am Typtag 15 °C

	EEX- mittel	Standard- Betrieb	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 2 - Prognoseabweichung			
			theor. max	Messung	theor. max	Messung	WW&HK -25%	Zeit -2h	Zeit +2h	WW&HK +25%
Typtag 15 °C [€ct]	4,06	5,29	5,92	5,74	5,96	5,91	6,15	5,91	6,15	5,82

Tabelle A-10: Durchschnittlicher Erlös an den Typtagen 10 °C, 5 °C und 0 °C

	EEX- mittel	Standard- Betrieb	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 2 - Prognoseabweichung	
			theor. max	Messung	theor. max	Messung	HK -25%	HK +25%
Typtag 10 °C [€ct]	4,06	4,29	5,25	4,98	5,27	5,15	5,15	5,02
Typtag 5 °C [€ct]	4,06	4,35	4,68	4,63	4,75	4,68	4,71	4,53
Typtag 0 °C [€ct]	4,06	4,21	4,19	4,20	4,26	4,23	4,38	4,14

Tabelle A-11: Vergleich Standardbetrieb - optimierter Betrieb, Jahr 2012

	Standardbetrieb	Betrieb nach Szenario 2
BHKW-Starts [-]	825	598
ZHG-Starts [-]	203	87
BHKW-Bh [h]	4.118,5	4.204,7
ZHG-Bh [h]	356,8	253,8
BHKW_thermisch [kWh]	31.301	31.956
ZHG_thermisch [kWh]	1.355,8	964,4
Wärmeverbrauch [kWh]	32.656	32.920
BHKW_thermisch/ Wärmeverbrauch [%]	95,8	97,1
Erlös [€]	191,69	210,79
durchschn. Erlös [€/kWh]	4,65	5,01

### A.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Stromproduktion und zugehöriger Speicherinhalt bei einer Klein-KWK-Anlage im Wärmeführungsmodus.....	5
Abbildung 1-2: Nachfrageangepasste Stromproduktion einer Klein-KWK-Anlage und zugehöriger, flexibler Speicherinhalt.....	7
Abbildung 1-3: Chronologie des Forschungsprozesses.....	12
Abbildung 1-4: Ablaufdiagramm des Prozesses hin zur flexiblen Stromproduktion .....	13
Abbildung 2-1: Entwicklung der KWK-Nettostromerzeugung, Daten aus [BMU 12].....	15
Abbildung 2-2: Installierte Anlagen und Leistungen von Klein-KWK Anlagen in den Jahren 2009 bis 2012, Daten aus [BAFA 14-a] .....	18
Abbildung 2-3: Zustandsänderungen im idealisierten Stirlingkreisprozess, Abbildung nach [REM 13] ..	21
Abbildung 2-4 Microgen Stirlingmotor [VIE 13-a].....	22
Abbildung 2-5: Whispergen Stirlingmotor [SAN 13] .....	22
Abbildung 2-6: Einfluss der BHKW- und der Referenzwirkungsgrade auf die Primärenergieeinsparung .....	26
Abbildung 2-7: CO <sub>2</sub> -Reduktion verschiedener KWK-Anlagen in Abhängigkeit von der Referenzstromerzeugung .....	28
Abbildung 2-8: Sensitivitätsanalyse der Einflussgrößen auf den wirtschaftlichen Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen .....	32
Abbildung 2-9: BHKW-Anlagenkonfiguration mit einem Warmwasserspeicher .....	33
Abbildung 2-10: BHKW-Anlagenkonfiguration mit Puffer- und Warmwasserspeicher .....	34
Abbildung 2-11: BHKW-Anlagenkonfiguration mit indirekter Pufferspeicherladung und Frischwasserstation .....	35
Abbildung 2-12: BHKW-Anlagenkonfiguration mit indirekt geladenem Kombispeicher .....	36
Abbildung 2-13: Stromverbrauch in Miesbach vom 19.07. bis 21.07.2012 .....	38
Abbildung 2-14: BHKW-Auslegung anhand der Jahresdauerlinie .....	39
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Mikro-KWK-Systems in Miesbach.....	43
Abbildung 3-2: Viessmann Vitotwin Mikro-BHKW, [ESB 13].....	43
Abbildung 3-3: Heizwärme- und Warmwasserverbrauch im Jahr 2012, Miesbach.....	45
Abbildung 3-4: BHKW Verbrauch und Erzeugung im Jahr 2012, Miesbach .....	46
Abbildung 3-5: Energieflussdiagramm, Miesbach 2012.....	46
Abbildung 3-6: Heizkreisverbrauch an den Übergangstypen, Miesbach Feldtest .....	48
Abbildung 3-7: Heizkreisverbrauch an den Wintertypen, Miesbach Feldtest .....	49

Abbildung 3-8: Thermische BHKW-Leistung an den Übergangstypstagen, Miesbach Feldtest .....	49
Abbildung 3-9: Thermische BHKW-Leistung an den Wintertypstagen, Miesbach Feldtest .....	50
Abbildung 3-10: Typische Warmwasserverbräuche, Miesbach Feldtest .....	51
Abbildung 3-11: Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch und mittlerer Außentemperatur, Miesbach 2012.....	52
Abbildung 3-12: Zusammenhang zwischen Wärmeverbrauch und mittlerer Außentemperatur, 2 Regressionsgeraden, Miesbach 2012 .....	53
Abbildung 3-13: Mikro-KWK-Prüfstand am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik...	54
Abbildung 3-14: Schematische Darstellung des Mikro-KWK Prüfstands .....	55
Abbildung 3-15: Whispergen Mikro-BHKW, [EHE 10] .....	58
Abbildung 3-16: Schematische und tabellarische Darstellung der Anschlusshöhen und Positionierung der Speichertemperaturfühler am Whispergen Speicher, [SAN 13] .....	59
Abbildung 3-17: Warmwasserverbrauch und Zirkulationsverluste .....	64
Abbildung 3-18: Heizkreisbedarf der Typtage.....	65
Abbildung 3-19: Heizkurven und Warmwassersollwerte.....	66
Abbildung 3-20: Leistungen des Whispergen Mikro-BHKW.....	69
Abbildung 3-21: Kalt- und Warmstart des Whispergen-BHKW.....	70
Abbildung 3-22: Anfahrvorgang Whispergen BHKW.....	71
Abbildung 3-23: Leistungen des Whispergen Mikro-BHKW beim Ausschalten .....	72
Abbildung 3-24: Leistungen und Wirkungsgrade des Whispergen Mikro-BHKW bei verschiedenen Rücklauftemperaturen, Messung am 12.08.2013 .....	73
Abbildung 3-25: Leistungen und Wirkungsgrade des Whispergen Mikro-BHKW bei verschiedenen Rücklauftemperaturen, Messung am 15.11.2012 .....	74
Abbildung 3-26: BHKW Versuchsreihe zur Analyse des Taktverhaltens .....	75
Abbildung 3-27: Effizienz des Whispergen BHKW bei verschiedenen Zykluszeiten .....	76
Abbildung 3-28: Wiedereinschaltvorgang des Whispergen BHKW.....	77
Abbildung 3-29: Whispergen Standardregelung („10 Minuten / 3 °C“), Typtag 10 °C.....	78
Abbildung 3-30: Speichertemperaturen beim An- und Ausschalten des BHKW, Whispergen Standardregelung .....	79
Abbildung 3-31: Soll- und Ist-Temperaturen während des ZHG-Zyklus.....	80
Abbildung 3-32: Whispergen Regelung, Sommertypstag.....	81
Abbildung 3-33: Whispergen Regelung, Typtag 15 °C.....	82
Abbildung 3-34: Whispergen Regelung, Typtag 10 °C.....	83
Abbildung 3-35: Whispergen Regelung, Typtag 5 °C.....	84
Abbildung 3-36: Einhaltung der Solltemperaturen, Whispergen Regelung, Typtag 5 °C.....	85
Abbildung 3-37: Whispergen Regelung, Typtag 0 °C.....	86

Abbildung 3-38: Speichertemperaturen während der ZHG-Zyklen, Whispergen Regelung, Typtag 0 °C..	87
Abbildung 4-1: Bestimmung der thermischen Bilanz am Speicher durch die Verlagerung der Mischzone bzw. die Wanderung des Wendepunkts einer an die Speichertemperaturen adaptierten Sigmoidkurve, nach [HUHN 07] und [WEH 12].....	92
Abbildung 4-2: Mischzonen nach der 90/10 % Methode für drei typische Temperaturverläufe im Kombispeicher .....	93
Abbildung 4-3: Speichertemperaturen während der Speicherladung.....	94
Abbildung 4-4: Speichertemperaturen während einer Warmwasserzapfung.....	95
Abbildung 4-5: Zapfstellentemperatur und Zapfleistung während einer Warmwasserzapfung .....	96
Abbildung 4-6: Speichertemperaturverläufe, Heizkreisentladung .....	97
Abbildung 4-7: Speichertemperaturverläufe, Zirkulationsentladung.....	98
Abbildung 4-8: Speicherabkühlkurven I .....	99
Abbildung 4-9: Gleichzeitiges Laden und Entladen: Heizkreis .....	101
Abbildung 4-10: Gleichzeitiges Laden und Entladen: Warmwasser .....	102
Abbildung 4-11: Vergleich der Speicherinhaltsänderung und der BHKW Leistung .....	106
Abbildung 4-12: Vergleich der Speicherinhaltsänderung und der Zapfleistung .....	106
Abbildung 4-13: Speicherinhalt und WW-Leistungen während und anschließend eines Zapfvorgangs ..	107
Abbildung 4-14: Vergleich der Speicherinhaltsänderung und der Heizkreisleistung.....	108
Abbildung 4-15: Speicherverluste in Abhängigkeit des Energieinhalts.....	108
Abbildung 4-16: Tagesminima und -maxima des Speicherenergieinhalts, Miesbach .....	110
Abbildung 4-17: Speichertemperaturen, -inhalt sowie Speicherbeladung und -entladung in Miesbach am 11.11.2012 .....	111
Abbildung 4-18: Speicherinhalt Sommertyptag.....	111
Abbildung 4-19: Speicherinhalt Typtag 15 °C.....	112
Abbildung 4-20: Speicherinhalt Typtag 10 °C.....	112
Abbildung 4-21: Speicherinhalt Typtag 5 °C.....	113
Abbildung 4-22: Speicherinhalt Typtag 0 °C.....	113
Abbildung 5-1: Ablaufdiagramm des Prozesses hin zur flexiblen Stromproduktion mit Fokus auf EEX-Preis, Wärmebedarfsprognose und Speicherkapazität.....	115
Abbildung 5-2: EEX-Börsenpreise, Jahr 2012 .....	117
Abbildung 5-3: Stündliche EEX Börsenpreise, Jahr 2012.....	117
Abbildung 5-4: Wochentags-EEX-Börsenpreise, Jahr 2012.....	118
Abbildung 5-5: Repräsentativer EEX-Preisverlauf vom 28.09.2012.....	119
Abbildung 5-6: Stündliche Stromproduktion in Miesbach 2012.....	120
Abbildung 5-7: BHKW-Stromproduktion an Tagen mit extremen Börsenpreisen, Miesbach 2012 .....	122
Abbildung 5-8: Stündliche Stromproduktion der Typtage .....	124

Abbildung 5-9: Grafische Darstellung des „Trend“- und „Stützpunkt 20 °C“-Verfahrens.....	127
Abbildung 5-10: Kumulierter Wärmeverbrauchsprognosefehler des Wärmeverbrauchs für die Methoden „Stützpunkt 20 °C“ und „Trend“, Miesbach 2012.....	128
Abbildung 5-11: Absoluter Vorhersagefehler mit der „Trend-Prognose“, Betrachtungszeitraum 7 Tage, Miesbach 2012 .....	130
Abbildung 5-12: Relativer Vorhersagefehler mit der „Trend-Prognose“, Betrachtungszeitraum 7 Tage, Miesbach 2012 .....	130
Abbildung 5-13: Stündlicher Wärmeverbrauch in der ersten Januarwoche, Miesbach 2012 .....	131
Abbildung 5-14: Korrelationskoeffizienten des Wärmeverbrauchs, Miesbach 2012 .....	132
Abbildung 5-15: Minimaler und maximaler Speicherenergieinhalt in Abhängigkeit der Außentemperatur .....	134
Abbildung 6-1: Ablaufdiagramm des Prozesses hin zur flexiblen Stromproduktion mit Fokus auf Erlösoptimierung, Einsatzpläne, BHKW Regelung inkl. Prognoseabweichung.....	135
Abbildung 6-2: Fahrplanerstellung Szenario 1, Typtag 5 °C .....	139
Abbildung 6-3: Sollfahrpläne der Typtage (Szenario 1).....	140
Abbildung 6-4: Sollfahrplan und Speichersollinhalt, Typtag Sommer, Szenario 1 .....	141
Abbildung 6-5: Verschiedene Speicherinhalte bei gleicher BHKW Betriebszeit, Typtag Sommer, Szenario 2.....	142
Abbildung 6-6: Stromproduktion während hoher Börsenstrompreise, Szenario 2 .....	143
Abbildung 6-7: Sollfahrpläne der Typtage, Szenario 2 .....	144
Abbildung 6-8: Speichersollinhalt an den Typtage in den Szenarien 1 und 2 .....	145
Abbildung 6-9: EEX Preis, Fahrplan und Speicherinhalt an einem Sommerwochenende.....	147
Abbildung 6-10: Regelverhalten einer Abweichung vom Sollspeicherenergieinhalt.....	149
Abbildung 6-11: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Verbrauchsabweichung, Typtag 10 °C.....	152
Abbildung 6-12: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Verbrauchsabweichung, Typtage: 0 °C und 5 °C .....	153
Abbildung 6-13: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Verbrauchsabweichung, Typtage: 15 °C und Sommer .....	154
Abbildung 6-14: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Zeitfehler in der Prognose, Sommertyptag .....	156
Abbildung 6-15: Auswirkung auf das BHKW Betriebsverhalten durch Zeitfehler in der Prognose, Typtag 15 °C.....	158
Abbildung 7-1: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario1 und Szenario 2, Sommertyptag..	160
Abbildung 7-2: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario1 und Szenario 2, Typtag 15 °C.....	161
Abbildung 7-3: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario1 und Szenario 2, Typtag 10 °C.....	162

Abbildung 7-4: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario1 und Szenario 2, Typtag 5 °C .....	163
Abbildung 7-5: Vergleich der Prüfstandsmessungen von Szenario1 und Szenario 2, Typtag 0 °C .....	164
Abbildung 7-6: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Sommertypstag .....	167
Abbildung 7-7: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 15 °C .....	167
Abbildung 7-8: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 10 °C .....	168
Abbildung 7-9: BHKW-Leistungen und Temperaturen am Typtag 10 °C, HK +25 % .....	169
Abbildung 7-10: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 5 °C .....	170
Abbildung 7-11: BHKW-Leistungen und Temperaturen am Typtag 5 °C, HK +25 % .....	171
Abbildung 7-12: Prüfstandsmessungen mit Prognoseabweichung, Typtag 0 °C .....	172
Abbildung 7-13: BHKW-Leistungen und Temperaturen am Typtag 0 °C, HK +25 % .....	173
Abbildung 7-14: Prüfstandsmessungen mit Zeit-Prognosefehler, Sommertypstag .....	174
Abbildung 7-15: Prüfstandsmessungen mit Zeit -Prognosefehler, Typtag 15 °C .....	174
Abbildung 7-16: Durchschnittlicher Erlös am Sommertypstag .....	178
Abbildung 7-17: Jahresvergleich: Standardbetrieb - optimierter Betrieb nach Szenario 2 .....	179
Abbildung 7-18: Anteil der Stunden, in denen das BHKW bei verschiedenen Mindest- Börsenstrompreisen in Betrieb ist .....	180
Abbildung A-1: Schematische und tabellarische Darstellung der Anschlusshöhen und Positionierung der Speichertemperaturfühler am Vitocell 340-M, [VIE 13-b] .....	A-1
Abbildung A-2: Stromverbrauch in Miesbach vom 19.07. bis 21.07.2012, Detailansicht .....	A-2
Abbildung A-3: Abrechnungsheizwerte der Stadtwerke München, Mai 2012 bis Oktober 2013 .....	A-3
Abbildung A-4: Außentemperaturverlauf an den Typtagen .....	A-3
Abbildung A-5: Speicherabkühlkurven II .....	A-4
Abbildung A-6 Gleichzeitiges Laden und Entladen, Heizkreisverbrauch identisch zur BHKW Leistung .....	A-4
Abbildung A-7: Speicherverluste in Abhängigkeit des Energieinhalts <sub>20°C</sub> .....	A-5
Abbildung A-8: Durchschnittlicher Erlös am Typtag 15 °C .....	A-5
Abbildung A-9: Durchschnittlicher Erlös an den Typtagen 10 °C, 5 °C und 0 °C .....	A-6

## A.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Verbesserungspotenziale von Mikro-KWK-Anlagen hin zu einer flexiblen Stromproduktion .....	5
Tabelle 2-1:	Klassifizierung der Klein-KWK-Anlagen bis 50 kW <sub>el</sub> .....	16
Tabelle 2-2:	Schadstoffgrenzwerte nach der TA-Luft [TAL 02], bezogen auf 5 % Restsauerstoff im Abgas.....	29
Tabelle 3-1:	Daten zum Feldtestgebäude in Miesbach .....	42
Tabelle 3-2:	Technische Daten Viessmann Vitotwin Mikro-BHKW, [VIE 13-c] .....	43
Tabelle 3-3:	Technische Daten Whispergen Mikro-BHKW, [EHE 10] .....	58
Tabelle 3-4:	Eingesetzte Messtechnik und deren relativer Fehler .....	61
Tabelle 3-5:	Relative und absolute Fehler bei der der Leistungs- und Wirkungsgradbestimmung des Whispergen Mikro-BHKW .....	63
Tabelle 3-6:	Daten des simulierten Gebäudes.....	64
Tabelle 3-7:	Tages- und Jahreswärmeverbrauch des simulierten Gebäudes.....	65
Tabelle 3-8:	Voreinstellungen des Heizungs- und Warmwassersystems .....	66
Tabelle 3-9:	Digitale und analoge Ausgangssignale des Mikro-KWK Prüfstands .....	67
Tabelle 3-10:	Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustands .....	71
Tabelle 3-11:	Voreinstellung bei der Typtaganalyse .....	77
Tabelle 3-12:	Berechnete WG-Speichertemperaturen (Fehler: ±0,3 °C) beim An- und Ausschalten, Typtag 10 °C.....	79
Tabelle 3-13:	Erzeugte und verbrauchte Energien am Typtag 15 °C, Whispergen Regelung.....	82
Tabelle 3-14:	Erzeugte und verbrauchte Energien am Typtag 10 °C, Whispergen Regelung.....	83
Tabelle 3-15:	Erzeugte und verbrauchte Energien am Typtag 5 °C, Whispergen Regelung.....	84
Tabelle 3-16:	BHKW Betriebsverhalten an den Typtagen .....	88
Tabelle 3-17:	Verbesserungspotenziale von Mikro-KWK-Anlagen im Wärmeführungsmodus, „betreiberoptimal“ .....	89
Tabelle 3-18:	Kriterien für ein verbessertes Miko-BHKW-Betriebsverhalten .....	90
Tabelle 4-1:	Speicher- und BHKW-Temperaturen beim Abschalten wegen Übertemperatur .....	94
Tabelle 4-2:	Speichertemperaturen bei T-WW-Zst = 42,0 °C .....	96
Tabelle 4-3:	Zeitkonstanten der Speichertemperaturen.....	100
Tabelle 4-4:	Kumulierte Zapfenergie gemessen und berechnet .....	107
Tabelle 4-5:	Speicherinhaltsanalyse bei den verschiedenen Typtagmessungen .....	114
Tabelle 5-1:	Wert des erzeugten KWK Stroms, Miesbach 2012.....	121

Tabelle 5-2:	Erlöse an den Tagen mit extremen EEX-Preisen.....	122
Tabelle 5-3:	BHKW Erlöse an den Typtagen .....	125
Tabelle 5-4:	Überblick über die Korrelationskoeffizienten des Wärmeverbrauchs in Miesbach.....	133
Tabelle 6-1:	Speicherinhalt und Zielgröße der drei Szenarien .....	136
Tabelle 6-2:	Speichergrenzen und Speichersollinhalte in Szenario 1.....	138
Tabelle 6-3:	Strompreiserlöse in Szenario 1 .....	140
Tabelle 6-4:	Geplante Strompreiserlöse in Szenario 2 .....	144
Tabelle 6-5:	Speicherausnutzung in Szenario 1 und Szenario 2 .....	145
Tabelle 6-6:	Abstände zu den jeweiligen Speichergrenzen.....	146
Tabelle 6-7:	Voraussetzungen zum Rücksetzen des Ausschalt- und Einschaltbefehls des BHKW ....	150
Tabelle 6-8:	Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, Typtag 10 °C .....	152
Tabelle 6-9:	Betriebsstunden und Erlöse bei Zeitabweichung, Sommertypstag .....	157
Tabelle 6-10:	Betriebsstunden und Erlöse bei Zeitabweichung, Typtag 15 °C.....	157
Tabelle 7-1:	Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Sommertypstag ...	161
Tabelle 7-2:	Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 15 °C.....	162
Tabelle 7-3:	Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 10 °C.....	163
Tabelle 7-4:	Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 5 °C.....	164
Tabelle 7-5:	Ergebnis der Prüfstandsmessungen von Szenario 1 und Szenario 2, Typtag 0 °C.....	164
Tabelle 7-6:	Strompreiserlöse an den Typtagen, WG-Reglung, Szenario 1 und 2.....	166
Tabelle 7-7:	Vergleich der Messungen mit und ohne Prognoseabweichung.....	176
Tabelle 7-8:	Durchschnittlicher Erlös am Sommertypstag.....	178
Tabelle 7-9:	Stunden, in denen das BHKW bei verschiedenen Mindest-Börsenstrompreisen in Betrieb ist.....	180
Tabelle 8-1:	Abschätzung des Potenzials von flexiblen Mikro-KWK-Anlagen .....	183
Tabelle A-1:	Basisförderung für Klein-KWK-Anlagen, Mini-KWK-Impulsprogramm, [BMU 08] .....	A-7
Tabelle A-2:	Fixdaten zur BHKW-Ökonomie .....	A-7
Tabelle A-3:	Einstellmöglichkeiten für den Betreiber eines Viessmann Mikro-BHKW .....	A-7
Tabelle A-4:	Einstellmöglichkeiten für den Betreiber eines Whispergen Mikro-BHKW .....	A-8
Tabelle A-5:	Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, 0 °C .....	A-8
Tabelle A-6:	Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, 5 °C .....	A-9
Tabelle A-7:	Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, 15 °C .....	A-9
Tabelle A-8:	Betriebsstunden und Erlöse bei Verbrauchsabweichung, Sommer .....	A-9
Tabelle A-9:	Durchschnittlicher Erlös am Typtag 15 °C .....	A-9
Tabelle A-10:	Durchschnittlicher Erlös an den Typtagen 10 °C, 5 °C und 0 °C.....	A-10
Tabelle A-11:	Vergleich Standardbetrieb - optimierter Betrieb, Jahr 2012.....	A-10

## Quellenverzeichnis

- [ALT 13] Alt, Helmut: Energie Fakten - Wie funktioniert die deutsche Strombörse? Aufgerufen am 16.07.2013. [www.energie-fakten.de/pdf/stromboerse.pdf](http://www.energie-fakten.de/pdf/stromboerse.pdf).
- [AME 13] Ametek: Advanced Temperature Calibrator. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://www.testequipmentdepot.com/ametek/temperaturecalibrator/atc156b.htm>.
- [ARGE 11] Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen (ARGE): Wohnungsbau in Deutschland – 2011. Modernisierung oder Bestandsersatz. Kiel, 2011.
- [ARN 08] Arndt, Ulli: Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandsgestützter Simulation. Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [ASUE 10] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.: BHKW-Grundlagen. Berlin, 2010.
- [BAD 13] Badenhop, Thomas: Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung. In: Töpler, Johannes; Lehmann, Jochen (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektive. Springer Verlag: Berlin, 2013. S. 133-146.
- [BAFA 13-a] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Kennzahlen zur BAFA-Förderung für Mini-KWK-Anlagen. Aufgerufen am 10.09.2013. [http://www.bafa.de/bafa/de/presse/pressemitteilungen/2013/23\\_mkwk.html](http://www.bafa.de/bafa/de/presse/pressemitteilungen/2013/23_mkwk.html).
- [BAFA 13-b] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Antrag zur Aufnahme einer hocheffizienten KWK-Anlage bis 50 kW<sub>el</sub> in die Typenliste zur Allgemeinverfügung nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Aufgerufen am 08.11.2013. [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/stromverguetung/kwk-anlagen\\_bis\\_50kw/formulare/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/stromverguetung/kwk-anlagen_bis_50kw/formulare/index.html).
- [BAFA 13-c] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Merkblatt Wärme- und Kältespeicher. Aufgerufen am 11.11.2013. [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/waerme\\_und\\_kaeltespeicher/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/waerme_und_kaeltespeicher/index.html).
- [BAFA 14-a] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Förderung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Aufgerufen am 14.01.2014. [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/publikationen/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/publikationen/index.html).
- [BAFA 14-b] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Liste förderfähiger Mini-KWK-Anlagen bis einschließlich 20kW<sub>el</sub>. Aufgerufen am 22.01.2014. [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft\\_waerme\\_kopplung/mini\\_kwk\\_anlagen/publikationen/index.html](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/mini_kwk_anlagen/publikationen/index.html).

- 
- [BECK 12] Beck, Christoph: Ganzheitliche Betriebsanalyse von Mikro-BHKW im Feldtest. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2012.
- [BHKW 13-a] BHKW Infozentrum: Definition des „üblichen Preises“ für eingespeisten BHKW-Strom nach dem KWK-Gesetz (KWKG 2012). Aufgerufen am 11.11.2013. [http://www.bhkw-infozentrum.de/statement/ueblicher\\_preis\\_bhkw.html](http://www.bhkw-infozentrum.de/statement/ueblicher_preis_bhkw.html).
- [BHKW 13-b] BHKW Infothek: BHKW Infothek – Einbindung eines BHKW. Aufgerufen am 17.07.2013. <http://www.bhkw-infothek.de/bhkw-informationen/technische-grundlagen/einbindung-eines-bhkw/>.
- [BHKW 13-c] BHKW Infothek: Auch sanevo ist insolvent: Das Aus für den WhisperGen? Aufgerufen am 09.09.2013. <http://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/10601/2013-02-18-auch-sanevo-ist-insolvent-das-aus-fur-den-whispergen/>.
- [BHKW 14] BHKW Infothek: Einsparungen und Einnahmen. KWK-Zuschlag und vNNE. Aufgerufen am 15.01.2014. <http://www.bhkw-infothek.de/bhkw-informationen/wirtschaftlichkeit-foerderung/einsparungen-und-einnahmen/>.
- [BHKW 14-b] BHKW Infothek: Der SOLO Stirling 161 kommt noch 2012 in neuem Gewand! Aufgerufen am 22.01.2014. <http://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/6701/2012-01-16-der-solo-stirling-161-kommt-noch-2012-in-neuem-gewand/>.
- [BHP 14] BHKW-Prinz.de: Beiträge der Kategorie '3,0-7,5 kW Klasse'. Aufgerufen am 22.01.2014. <http://www.bhkw-prinz.de/category/bhkw-hersteller/mini-bhkw-klein>.
- [BIM 13] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG). Berlin, 2013.
- [BMU 05] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Kleine Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz. Berlin, 2005.
- [BMU 08] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Richtlinien zur Förderung von Mini-KWK-Anlagen. Berlin, 2008.
- [BMU 12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Berlin, 2012.
- [BMW 07] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Verordnung über den energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). Berlin, 2007.
- [CAL 13] Callux: Callux, Praxistest Brennstoffzelle fürs Eigenheim. Aufgerufen am 12.11.2013. <http://www.callux.net/>.
- [CAN 12] Candic, Armin: Analyse des Warmwasserverbrauchs und der Zirkulationsverluste in realen Gebäuden. Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2012.

- [CFC 13] Ceramic Fuel Cells Limited: BlueGen – das hocheffiziente Mikrokraftwerk. Aufgerufen am 04.12.2013. [www.akvt.de/ft2011/unterlagen/A3-CFC.pdf](http://www.akvt.de/ft2011/unterlagen/A3-CFC.pdf).
- [CLE 14] Cleanenergy: Cleanergy CHP Engines. Aufgerufen am 22.01.2014. <http://www.cleanenergy.com/chp/>.
- [DIN 4708] Deutsche Norm DIN 4708 - Teil 2: Zentrale Wassererwärmungsanlagen. Regeln zur Ermittlung des Wärmebedarfs zur Erwärmung von Trinkwasser in Wohngebäuden. 1994.
- [DIN 12831] Deutsche Norm DIN EN 12831: Heizungsanlagen in Gebäuden. Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. 2003.
- [DWD 12] Deutscher Wetterdienst: Pressemitteilung. Deutschlandwetter im Februar 2012. Aufgerufen am 30.01.2014. [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=dwdwww\\_menu2\\_presse&T98029gsbDocumentPath=Navigation%252FPresse%252FPressemitteilungen\\_\\_2012\\_\\_node.html%253F\\_\\_nnn%253Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_presse&T98029gsbDocumentPath=Navigation%252FPresse%252FPressemitteilungen__2012__node.html%253F__nnn%253Dtrue).
- [E+H 10] Endress+Hauser: Technische Information. Proline Promag 50H, 53H. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://www.de.endress.com/#product/50W>.
- [ECKL 07] Eckl, Robert: Messung und Modellierung lokaler Phänomene in Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen. Dissertation, Technische Universität München, 2007.
- [ECO 11] Ecofys; Prognos: Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strommarkt und zur Netzintegration erneuerbarer Energien. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://www.bmwi.de/DE/Mediathek/publikationen,did=459232.html>.
- [EEN 13] Verbundprojekt E-Energy: E-DeMa: Entwicklung und Demonstration dezentral vernetzter Energiesysteme hin zum E-Energy-Marktplatz der Zukunft. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://www.e-dema.de/de/ergebnisse.html>.
- [EEX 14] European Energy Exchange AG (EEX). Aufgerufen am 13.02.2014. <http://www.eex.com/de#/de>.
- [EHE 10] Efficient Home Energy: WhisperGen Mikro-BHKW. Installation und Wartung. Tolosa, 2010.
- [ELS 13-a] Elster Instromet: Technisches Datenblatt: Experimentiergaszähler – Trockene Bauart. Aufgerufen am 20.11.2013. <http://docuthek.kromschroeder.com/doclib/main.php?language=2&folderid=400054>.
- [ELS 13-b] Elster Instromet: Technisches Datenblatt: Experimentiergaszähler – Nasse Bauart. Aufgerufen am 20.11.2013. <http://docuthek.kromschroeder.com/doclib/main.php?language=2&folderid=400053>.

- 
- [ENE 14] Energinet.dk: Time-of-day tariff for local CHP units. Aufgerufen am 24.01.2014. <http://www.energinet.dk/EN/El/Engrosmarked/Tariffer-og-priser/Sider/Treledstariffen.aspx>.
- [EPEX 14] EPEX Spot: Marktdaten. Auktionshandel. Aufgerufen am 13.02.2014. <http://www.epexspot.com/de/marktdaten/auktionshandel/auction-table/>.
- [EQU 14] E-quad Power Systems: Technische Datenblätter. C30 Erdgas/Flüssiggas MicroTurbine. Aufgerufen am 16.01.2014. [http://www.microturbine.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=51&Itemid=56](http://www.microturbine.de/index.php?option=com_content&view=article&id=51&Itemid=56).
- [ESB 13] Energie Südbayern: KWK-Heizgeräte. Aufgerufen am 09.09.2013. [http://www.esb.de/energieeffizienz/neue-technologien/blockheizkraftwerke/geraetebeispiele/?tx\\_esbdownload\\_pi1\[file\]=Infobroschuere\\_Remeha\\_eVita\\_.pdf&tx\\_esbdownload\\_pi1\[action\]=force&tx\\_esbdownload\\_pi1\[controller\]=Downloads](http://www.esb.de/energieeffizienz/neue-technologien/blockheizkraftwerke/geraetebeispiele/?tx_esbdownload_pi1[file]=Infobroschuere_Remeha_eVita_.pdf&tx_esbdownload_pi1[action]=force&tx_esbdownload_pi1[controller]=Downloads).
- [EU 04] Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG. Aufgerufen am 17.12.2013. [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/energy\\_efficiency/l27021\\_de.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/l27021_de.htm).
- [FFE 07] Mühlbacher, Helmut; Geiger, Bernd; Tzscheutschler, Peter: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung – Teil B. München, 2007.
- [FFE 12] Steck, Michael et al.: DEA – Verbund dezentraler Erzeugungsanlagen. Teilprojekt des Forschungsvorhabens „EnEff:Stadt – Chancen und Risiken von KWK im Rahmen des IEKP“. München, 2012.
- [FFE 13] Buber, Tim; Gruber, Anna; Hünecke, Marie; von Roon, Serafin: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Berlin, 2013.
- [GRO 00] Grohmann, Jürgen: Lastanalyse und -synthese zur Optimierung leitungsgebundener Energiesysteme. IfE Schriftenreihe Heft 41. Energie & Management Verlag: Herrsching, 2000.
- [GROß 12] Groß, Sebastian: Untersuchung der Speicherfähigkeit von Fernwärmenetzen und deren Auswirkungen auf die Einsatzplanung von Wärmeerzeugern. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2012.
- [HEC 13] Hecht, Rasmus: Energiewirtschaftliche Bewertung der Kombination Mini-BHKW und Photovoltaik. Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2013.
- [HEL 03] Hellwig, Mark: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile. Dissertation, Technische Universität München, 2003.

- [HÖH 09] Höhle, Bernd; Nitsch, Joachim; Carpetis, Constantin: Energie und Schadstoffbilanzen von Brennstoffzellensystemen. In: Forschungsverbund Sonnenenergie Nachhaltigkeit und Energie 98/99. Köln, 1999. S. 99-108.
- [HON 13] Honda: Honda Cogeneration. Aufgerufen am 12.07.2013. <http://world.honda.com/cogenerator/index.html>.
- [HUB 13] Huber, Matthias; Sänger, Florian; Hamacher, Thomas: Coordinating Smart Homes in Microgrids: A Quantification of Benefits. 2013.
- [HUHN 07] Huhn, Robert: Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007.
- [IIN 13] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien: GEMIS 4.8. Aufgerufen am 08.11.2013. <http://www.iinas.org/gemis-download-de.html>.
- [IÖW 12] Institut für ökologische Wirtschaftsforschung: Überarbeitung der Vergabegrundlagen für die Umweltzeichen „Klein-BHKW-Module für gasförmige Brennstoffe“ (RAL-UZ 108) sowie „Klein-BHKW-Module für flüssige Brennstoffe“ (RAL-UZ 109). Berlin, 2012.
- [IWU 06] Institut Wohnen und Umwelt: Gebäudetypologie Bayern. 2006.
- [IZES 13] Institut für Zukunftssysteme: Aktionsprogramm flexible Kapazitäten. Die nächsten Schritte zum Erhalt der Strom-Versorgungssicherheit. Saarbrücken, 2013.
- [KIN 12] Kinninger, Luitpold: Einsatzplanung einer Heizungsanlage anhand von Prognosen für das Wetter und den Strompreis. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2012.
- [KNE 11] Kneuer, Sebastian: Einfluss der Nachtabsenkung auf den Betrieb von Mikro-KWK Anlagen. Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2011.
- [KOR 12] Koros, Christian: Dimensionierung und Anbindung eines Wärmespeichers für ein Fernwärmenetz. Semesterarbeit, Technische Universität München, 2012.
- [KRE 04] Krewitt, Wolfram et al.: Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung. Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale (Beiträge zur Umweltgestaltung A 156). Erich Schmidt Verlag: Berlin, 2004.
- [KUHN 12] Kuhn, Philipp: Iteratives Modell zur Optimierung von Speicherausbau und -betrieb in einem Stromsystem mit zunehmend fluktuierender Erzeugung. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [KUR 09] Kurscheid, Eva Marie: Zur Bereitstellung positiver Minutenreserve durch dezentrale Klein-KWK-Anlagen. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2009.
- [KWKG 09] Bundesministerium der Justiz: Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz). Berlin, 2009.

- 
- [KWKG 12] Bundesministerium der Justiz: Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz). Berlin, 2012.
- [LIC 10] Lichtblick: SchwarmStrom – die Energie der Zukunft. Hamburg, 2010.
- [LIC 14] Lichtblick: Das Mini-BHKW von LichtBlick – Deutschlands intelligenteste Heizung. Aufgerufen am 27.01.2014. <http://www.lichtblick.de/privatkunden/bhkw/>.
- [LIN 12] Lingauer, Andreas: Energiewirtschaftliches Potenzial der Einbindung einer elektrischen Heizvorrichtung in ein Fernwärmesystem. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2012.
- [LION 13] Lion-Energy: Der neue lion-Powerblock. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://www.powerblock.eu/de/services/downloads.php>.
- [LIPP 09] Lipp, Josef; Wehmhörner, Urs: Blockheizkraftwerke für die Hausenergieversorgung. Stand des Projekts und energetische Bewertung nach Ablauf des ersten Betriebsjahres. München, 2009. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://www.esb.de/energieeffizienz/neue-technologien/blockheizkraftwerke/bhkw-praxisberichte/>.
- [LIPP 10] Lipp, Josef et al: Mikro-BHKW im Ein- und Zweifamilienhaus. Jahresbericht 2010. München, 2010. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://www.esb.de/energieeffizienz/neue-technologien/blockheizkraftwerke/bhkw-praxisberichte/>.
- [LIPP 11] Lipp, Josef; Jungwirth, Johannes: Field Test with Stirling Engine Micro-CHP-Units in Residential Buildings. MICRoGEN II. 2nd International Conference in Microgeneration and Related Technologies in Buildings. Glasgow 4. - 6. April 2011.
- [LIPP 13-a] Lipp, Josef; Sängler, Florian; Tzscheutschler, Peter: Mikro-KWK im Gewerbe. Abschlussbericht Teilprojekt F BayFORETA. Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, 2013.
- [LIPP 13-b] Lipp, Josef; Sängler, Florian: Potential of power shifting using Micro-CHP units and heat storages. MICRoGEN III. 3rd International Conference in Microgeneration and Related Technologies in Buildings. Neapel 15. - 17. April 2013.
- [LIPP 13-c] Lipp, Josef: Field test with Stirling Engine Micro-CHP-Units in residential buildings. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Februar 2013, S. 43-52.
- [LUI 12] Luibl, Andreas: Entwicklung von Zukunftsszenarien für einen zeitlich variablen Stromtarif. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2012.
- [M+Z 09] Müller+Ziegler: Betriebsanleitung / Technische Daten für Wirkleistungs-Umformer der Typen Pw-MU, Pz-MU, Pnz-MU, Pd-MU, Pdr-MU, Gunzenhausen, 2009. Aufgerufen am 17.12.2013. [mueller-ziegler.de/Wirkleistungs-MU.pdf](http://mueller-ziegler.de/Wirkleistungs-MU.pdf).
- [MAR 11] Marth, Hans; Breitschopf, Barbara: Auswirkung von Politikmaßnahmen auf das Innovationsgeschehen im Bereich der Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung. Karlsruhe, 2011.

- [MET 14] Ludwig-Maximilians-Universität München. Fakultät für Physik. Meteorologie: Wetter in München. Messung. Aufgerufen am 11.02.2014. <http://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/dokuwiki/doku.php?id=wetter:stadt:messung>.
- [MIC 13] Microgen Engine Corporation: Welcome at Microgen Engine Corporation. Aufgerufen am 12.07.2013. <http://www.microgen-engine.com/>.
- [MÜH 07] Mühlbacher, Helmut: Verbrauchsverhalten von Wärmeezeugern bei dynamischen variierten Lasten und Übertragungskomponenten. Dissertation, Technische Universität München, 2007.
- [MÜH 13] Mühlstein, Jan: BHKW-Ranking: Erdgas vor Biogas. In: Energie & Mangement, 15. November 2013, S. 25-32.
- [NI 13-a] National Instruments: Datenblatt NI 9203. Aufgerufen am 22.11.2013. <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-189/lang/de>.
- [NI 13-b] National Instruments: Datenblatt NI 9421. Aufgerufen am 22.11.2013. <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-87/lang/de>.
- [NI 13-c] National Instruments: Systemdesignsoftware NI LabVIEW. Aufgerufen am 03.12.2013. <http://www.ni.com/labview/d/>.
- [NIS 97] Nissen, Volker: Einführung in Evolutionäre Algorithmen. Optimierung nach Vorbild der Evolution. Vieweg Verlag: Braunschweig, 1997.
- [PIE 10] Pielke, Magnus: Technisch-wirtschaftliche Systembetrachtung zur netzorientierten Integration von Mini-Blockheizkraftwerken. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [POW 07] PowerPlus Technologies, Planungsinformation Blockheizkraftwerk 2007. Aufgerufen am 17.12.2013. <http://s384011137.website-start.de/app/download/5776740004/Planungshandbuch.pdf>.
- [PRO 13] Prognos: Maßnahmen zur nachhaltigen Integration von Systemen zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung in das neue Energieversorgungssystem. Berlin, 2013.
- [REC 08] Recknagel, Hermann; Schramek, Ernst-Rudolf; Sprenger, Eberhard: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 2009/10. 74. Aufl. Oldenbourg Industrieverlag: München, 2009.
- [REM 13] Remeha: eVita. Technische Daten. Aufgerufen am 18.12.2013. <http://www.remeha.de/191/5959/Remeha+eVita+28c+%28KOMBI%29>.
- [ROON 10] von Roon, Serafin; Gobmaier, Thomas; Huck, Malte: Demand Side Management in Haushalten. Analyse des praktischen Potenzials zur Bereitstellung von Reserveleistung bis 2020. München, 2010.
- [ROON 12] von Roon, Serafin: Auswirkungen von Prognosefehlern auf die Vermarktung von Windstrom. Dissertation, Technische Universität München, 2012.

- 
- [RUD 08] Rudolph, Manfred; Wagner, Ulrich: Energienanwendungstechnik. Wege und Techniken zur effizienteren Energienutzung. Springer, Berlin, 2008.
- [SAC 09] Sachs, Michael: Wahrscheinlichkeit und Statistik: Carl Hanser Verlag: München, 2009.
- [SAN 11-a] sanevo: Produktdatenblatt Zubehör. sanevo Multihygiene Pufferspeicher 800 L.
- [SAN 11-b] sanevo: Home Energy Control. Offenbach, 2011.
- [SAN 13] sanevo: sanevo – Whispergen Funktionsprinzip. Aufgerufen am 23.11.2012. [www.sanevo.de](http://www.sanevo.de).
- [SÄN 13] Sänger, Florian: 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. Neapel 15. - 17. April 2013.
- [SCH 07] Schrüfer, Elmar: Elektrische Messtechnik. 9. Aufl. Carl Hanser Verlag: München, 2007.
- [SEN 09] SenerTec: Der Dachs – Technische Daten. Schweinfurt, 2009.
- [SEN 13] SenerTec: Der Dachs. Die Kraft-Wärme-Kopplung von SenerTec. Aufgerufen am 12.07.2013. [www.derdachs.de](http://www.derdachs.de).
- [SHE 13] Shell BDH Hauswärme-Studie: Klimaschutz im Wohnungssektor – wie heizen wir morgen? Fakten, Trends und Perspektiven für Heiztechniken bis 2030. Köln, 2013.
- [SOL 13] Solvis Newsletter 01/2012: Thema: Zuverlässiger Kalkschutz der Solvis-Frischwasserstation (Plattenwärmetauscher). Aufgerufen am 17.07.2013. [www.solvis-analyse.de/resources/NEWS-Letter-Kalkschutz-01-2012.pdf](http://www.solvis-analyse.de/resources/NEWS-Letter-Kalkschutz-01-2012.pdf).
- [STA 13] statista: Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2012 (in Gramm pro Kilowattstunde). Aufgerufen am 11.11.2013. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>.
- [SWM 13-a] Stadtwerke München: M-Strom Kompakt. Aufgerufen am 11.11.2013. <http://www.swm.de/privatkunden/m-strom/m-strom-kompakt.html>.
- [SWM 13-b] Stadtwerke München: M-Erdgas M Basis. Aufgerufen am 11.11.2013. <http://www.swm.de/privatkunden/m-erdgas/m-erdgas-muenchen/m-erdgas-m-basis.html>.
- [SWM 13-c] Stadtwerke München: Erdgasqualität im Verteilungsnetz des Großraumes München, Januar 2013. Aufgerufen am 14.11.2013. [www.swm.de/dms/swm/dokumente/schulen/.../erdgas-qualitaet.pdf](http://www.swm.de/dms/swm/dokumente/schulen/.../erdgas-qualitaet.pdf).
- [SWM 13-d] Stadtwerke München: Abrechnungsbrennwerte. Aufgerufen am 19.11.2013. [http://www.swm-infrastruktur.de/content/brennwerte/Abrechnungsbrennwerte\\_0001.pdf](http://www.swm-infrastruktur.de/content/brennwerte/Abrechnungsbrennwerte_0001.pdf).

- [TAL 02] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). 24.07.2002.
- [TAL 86] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). 27.02.1986 (aufgehoben).
- [THO 07] Thomas, Bernd: Mini-Blockheizkraftwerke. Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten. Vogel Verlag: Würzburg, 2007.
- [TRN 14] Transsolar: TRNSYS – Das universelle Werkzeug für Klimaengineering. Aufgerufen am 15.01.2014. <http://www.transsolar.com>.
- [TRY 04] Christoffer, Jürgen; Deuschländer, Thomas; Webs, Monika: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY. Selbstverlag Deutscher Wetterdienst: Offenbach, 2004.
- [UBA 13] Umweltbundesamt: Anteil KWK-Nettostromerzeugung an der Gesamtnettostromerzeugung. Aufgerufen am 12.09.2013. <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2323>.
- [ÜNB 14] EEG/KWK-G Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber: Transparenz der Vermarktungstätigkeiten. Aufgerufen am 29.01.2014. <http://www.eeg-kwk.net/de/Transparenzanforderungen.htm>.
- [VAI 11-a] Vaillant: Technisches Datenblatt ecoPOWER 4.7. Aufgerufen am 17.12.2013. [http://www.powerplus-systeme.de/stepone/data/downloads/88/00/00/datenblatt\\_ecopower-4.7.pdf](http://www.powerplus-systeme.de/stepone/data/downloads/88/00/00/datenblatt_ecopower-4.7.pdf).
- [VAI 11-b] Vaillant: Technisches Datenblatt ecoPOWER 1.0. Aufgerufen am 17.12.2013. [http://www.powerplus-systeme.de/stepone/data/downloads/86/00/00/datenblatt\\_ecopower-1.0.pdf](http://www.powerplus-systeme.de/stepone/data/downloads/86/00/00/datenblatt_ecopower-1.0.pdf).
- [VAL 09] Valkanov, Kostadin: Bewertung und Optimierung von Mini-BHKW in Haushalten. Masterarbeit, Technische Universität München, 2009.
- [VAT 12] Vattenfall: Das Virtuelle Kraftwerk. Windstrom trifft Wärme. Berlin, 2012.
- [VAT 13] Vattenfall: Virtuelles Kraftwerk. Aufgerufen am 04.12.2013. <http://www.vattenfall.de/de/virtuelles-kraftwerk.htm>.
- [VDE 08] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik: Smart Distribution 2020 - Virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen. Frankfurt am Main, 2008.
- [VDI 2067] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2067, Blatt 12: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung. 2000.
- [VDI 4655] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 4655: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen. 2008.

- 
- [VDI 6003] Verein Deutscher Ingenieure, VDI 6003: Trinkwassererwärmungsanlagen. Komfortkriterien und Anforderungsstufen für Planung, Bewertung und Einsatz. 2012.
- [VIE 13-a] Viessmann: Viessmann MediaService. Aufgerufen am 21.11.2013. [http://www.viessmann.com/mediaservice/Sites/#1385044852959\\_0](http://www.viessmann.com/mediaservice/Sites/#1385044852959_0).
- [VIE 13-b] Viessmann: Datenblatt Vitocell 340-M/360-M. Aufgerufen am 17.12.2013. [http://www.viessmann.de/de/Industrie-Gewerbe/Produkte/speicher-wassererwaermer/Vitocell\\_340-M\\_360-M.html](http://www.viessmann.de/de/Industrie-Gewerbe/Produkte/speicher-wassererwaermer/Vitocell_340-M_360-M.html).
- [VIE 13-c] Viessmann: Vitotwin 300-W. Aufgerufen am 17.12.2013. [http://www.viessmann.de/de/ein-\\_zweifamilienhaus/produkte/mikro-kwk/Vitotwin\\_300-W.html](http://www.viessmann.de/de/ein-_zweifamilienhaus/produkte/mikro-kwk/Vitotwin_300-W.html).
- [VOGT 11] Vogt, Christoph: Analyse des Einfluss von Smart-Metering auf den Strombedarf von privaten Haushalten. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2011.
- [WEH 12] Wehmhörner, Urs: Multikriterielle Regelung mit temperaturbasierter Speicherzustandsbestimmung für Mini-KWK-Anlagen. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [WER 04] Werner, Claudia: Vergleichende Untersuchungen zu KWK-Systemen im Leistungssegment bis 30 kW elektrischer Leistung. Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 2004.
- [WILD 12] Wild, Tobias: Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandes für Mikro-KWK-Anlagen. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2012.
- [ZFK 13-a] Zeitung für kommunale Wirtschaft: Weltrekord für Wind und Sonne am Wochenende. Aufgerufen am 19.06.2013. <http://www.zfk.de/unternehmen/energiemarkt/beschaffung-handel/artikel/weltrekord-fuer-wind-und-sonne-am-wochenende.html>.
- [ZFK 13-b] Zeitung für kommunale Wirtschaft: Lichtblick: Steuerungs--Software regelt Mini-BHKW. Aufgerufen am 20.06.2013. <http://www.zfk.de/energieeffizienz/artikel/lichtblick-steuerungs-software-regelt-mini-bhkw.html>.