

Kraftwerke des 21. Jahrhunderts Teilprojekt E2

**Kleine KWK-Systeme im Kraftwerksverbund -
Prüfstandsuntersuchungen und
energiewirtschaftliche Bewertung der
disponiblen Regelleistung**

Kraftwerke des 21. Jahrhunderts

Teilprojekt E2

**Kleine KWK-Systeme im Kraftwerksverbund -
Prüfstandsuntersuchungen und
energiewirtschaftliche Bewertung der disponiblen
Regelleistung**

Auftraggeber:	E.ON Energie AG Bayerische Forschungsstiftung
FfE-Auftragsnummer:	065.3
Bearbeiter/in:	Dipl. Wi.-Ing. Serafin von Roon Dipl.-Ing. Ulli Arndt Dipl.-Ing. Thomas Gobmaier Dipl.-Ing. Anna Gruber Dipl.-Ing. Tomás Mezger
Fertigstellung:	Oktober 2008

Impressum:

Kurzbericht
der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
(FfE)

zum Projekt:

Kraftwerke des 21. Jahrhunderts

Teilprojekt E2

Kleine KWK-Systeme im Kraftwerksverbund -
Prüfstandsuntersuchungen und
energiewirtschaftliche Bewertung der
disponiblen Regelleistung

Auftraggeber:

E.ON Energie AG

Bayerische Forschungsstiftung

Kontakt:

Am Blütenanger 71
80995 München
Tel.: +49 (0) 89 158121-0
Fax: +49 (0) 89 158121-10
E-Mail: info@ffe.de
Internet: www.ffe.de

Wissenschaftlicher Leiter:

Prof. Dr.-Ing. U. Wagner

Geschäftsführer:

Prof. Dr.-Ing. W. Mauch

Projekt-Manager:

Dipl.-Phys. R. Corradini

Inhalt

1	Ausgangssituation	1
2	Projektziele.....	1
3	Untersuchungsgegenstand	1
3.1	KWK-Systeme.....	1
3.2	Verbrauchslastgänge.....	2
3.3	Regelleistungsmarkt.....	3
4	Messtechnische Untersuchungen.....	5
5	Simulation	8
5.1	Aufbau	8
5.2	Validierung der Simulation auf Basis der Prüfstandsuntersuchungen	8
6	Potenzial zur Bereitstellung von Regelleistung.....	11
6.1	Methoden	11
6.2	Technisches und wirtschaftliches Potenzial der Minutenreserve.....	12
6.3	Technisches und wirtschaftliches Potenzial der Sekundärregelleistung.....	13
6.4	Modifikationen des KWK-Systems	14
6.5	Weitere Konzepte für die Regelleistungsbereitstellung mit Mikro-KWK-Anlagen	16
7	Energiewirtschaftliche Bewertung.....	16
8	Veröffentlichungen.....	17
9	Quellen	17

1 Ausgangssituation

Aufgrund der hohen Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird politisch das Ziel verfolgt, dass ein wesentlicher Anteil der zukünftigen Stromerzeugung aus KWK stammt. Das integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung /IEKP/ plant eine Verdopplung der KWK-Stromerzeugung bis 2020. Hiermit ergibt sich auch für dezentrale KWK-Anlagen zur Gebäudeenergieversorgung die Chance, einen Beitrag zur Deckung der durch altersbedingte Kraftwerksabschaltung und den geplanten Kernenergieausstieg bedingten Kapazitätslücke zu leisten. Neben der verbrauchsnahe Erzeugung von Strom und Wärme werden Konzepte zur Einbindung dieser dezentralen Erzeugungsanlagen als virtuelles Kraftwerk in diversen Projekten untersucht. Ziel ist es, dezentrale Erzeugungsanlagen informationstechnisch untereinander so zu vernetzen und extern zu regeln, dass über die verbrauchsnahe Versorgung hinausgehende energiewirtschaftliche Leistungen bereitgestellt werden können. Eine Aufgabe kann die Bereitstellung von Regelleistung und -energie sein. Im Rahmen des Projektes E2 wurde die Eignung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) in Wohngebäuden als virtuelles Regelleistungskraftwerk untersucht.

2 Projektziele

Ziel des Teilprojekts war die Bestimmung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials messtechnisch untersuchter KWK-Systeme zur Regelleistungsbereitstellung unter den aktuellen Rahmenbedingungen. Des Weiteren sollte ermittelt werden, inwiefern das technische Potenzial durch Modifikation des KWK-Systems, wie z. B. Regelung und Speichergröße, erweitert werden kann. Aus energiewirtschaftlicher Sicht wurde die Bereitstellung von Regelleistung aus Mikro-KWK-Anlagen hinsichtlich Primärenergie- und CO₂-Bilanz sowie Leistungs- und Arbeitssubstitution bewertet.

3 Untersuchungsgegenstand

3.1 KWK-Systeme

Für die Gebäudeenergieversorgung kamen grundsätzlich motorische Blockheizkraftwerke, Mikrogasturbinen, Brennstoffzellen und Stirling-Motoren als technische Optionen für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in Frage. Die Leistungsdaten, Speicherdimensionierungen sowie eine typische hydraulische Verschaltung der untersuchten Systeme sind im Sachstandsbericht 2006 /FFE-08 06/ dargestellt.

Das KWK-System zur Gebäudeenergieversorgung bestand in der Regel neben der KWK-Anlage aus einem Zusatzkessel zur Deckung thermischer Leistungsspitzen, einem Puffer- und einem Warmwasserspeicher sowie der Systemregelung. Eine wesentliche Randbedingung für den energiewirtschaftlich sinnvollen Einsatz von KWK-Systemen

war die vollständige Nutzung der erzeugten Wärme im Objekt. Auf der elektrischen Seite glich das allgemeine Stromnetz zwischen der Stromerzeugung der KWK-Anlage und dem Bedarf des Gebäudes aus.

3.2 Verbrauchslastgänge

Die betrachteten KWK-Anlagen werden in Mehrfamilienhäusern mit einem entsprechenden Heizwärme-, Warmwasser- und Strombedarf eingesetzt. Es wurden mehrere Typgebäude nach Dämmstandard und Größe definiert. Das Referenzgebäude für die Untersuchung wies die in **Tabelle 1** dargestellten Kennwerte auf.

Tabelle 1: Kennwerte des Referenzgebäudes

		Einheit	10 MFH
Region			TRY 08 (München)
Dämmstandard			saniert nach WSV '95
Anzahl Wohnungen			10
Bewohner pro Wohnung			2,2
Raumheizung	Jahresheizwärmebedarf	kWh/a	62.893
Warmwasser	Zapfmenge	l/(Pers·d)	67
	Zapfenergie	kWh/(Pers·a)	17.383
Strom	Jahresverbrauch (netto)	kWh/a	31.014

Die auf dem Prüfstand nachgefahrenen charakteristischen Verbrauchslastgänge wurden im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens ISOTEG aus messtechnischen Untersuchungen an verschiedenen Wohngebäuden und aus Gebäudesimulationen entwickelt /MUE-01 07/. Die Messungen am Prüfstand basierten auf dem Heizwärmebedarf eines typischen Winter-, Übergangs- und Sommertag. In **Abbildung 1** sind exemplarisch die Verbrauchslastgänge für einen Wintertag dargestellt.

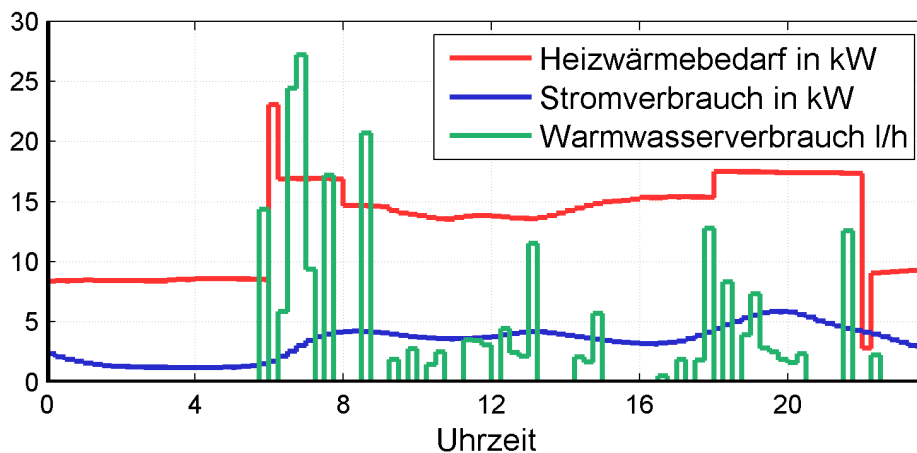


Abbildung 1: Heizwärme, Stromverbrauch und Zapfprofil für einen Wintertag

Im Rahmen des Projektes E2 wurde eine von der FfE entwickelte Simulation genutzt, um Jahreslastgänge der Region 8 der Testreferenzjahre (TRY) /DWD 04/ für den Heizwärmebedarf für verschiedene Gebäude zu generieren. Die den messtechnischen

Untersuchungen zugrunde gelegten Warmwasserzapfprofile wurden entsprechend der Gebäudegröße skaliert und für die Jahresbetrachtung statistisch variiert. Für die Stromlastgänge wurden die standardisierten Bedarfs-Ganglinien für Haushaltskunden des Verbandes der Netzbetreiber (VdN) verwendet /VDEW 85/, /FUE 99/.

3.3 Regelleistungsmarkt

Ziel dieses Projektes war, das Potenzial zur Regelleistungsbereitstellung unter den geltenden Marktbedingungen auszuweisen. Im Projektbearbeitungszeitraum haben sich die Ausschreibungsbedingungen mehrmals geändert und der Umfang der von den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) zur Verfügung gestellten Daten hat zugenommen. Den in diesem Bericht präsentierten Ergebnissen lagen die im Sommer 2008 geltenden Rahmenbedingungen zugrunde. Die durchgeführten Jahressimulationen basierten auf den Preisen und Regelleistungsabrufen des Jahres 2007.

- Entscheidend für die Analyse des Potenzials der Regelleistungsbereitstellung mit Mikro-KWK-Anlagen waren
- die von den ÜNB gestellten Anforderungen zur Bewertung der technischen Machbarkeit,
- die zu erzielenden Preise bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse und
- die Abrufcharakteristik zur Bewertung der veränderten Betriebsweise mit den entsprechenden Folgen für Wirtschaftlichkeit, CO₂-Emissionen, Primärenergieverbrauch und Starthäufigkeit.

Im Sachstandsbericht 2006 /FFE-08 06/ wurden bereits die Regelleistungsarten und deren Einsatzreihenfolge und energiewirtschaftliche Aufgaben erläutert. Die technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen der Regelleistungsbereitstellung auf Basis des TransmissionCodes wurden zusammengefasst /VDN 03/. Aus Sicht eines Betreibers eines virtuellen Kraftwerks sind die Mindestleistung, die Aktivierungsgeschwindigkeit, die Zeitverfügbarkeit und die Ausschreibungszeiträume von besonderem Interesse. Die Mindestleistung wurde bei der Minutenreserve (MR) von 30 MW auf 15 MW und bei der Sekundärregelleistung (SRL) von 30 MW auf 10 MW reduziert. Bei diesen Regelleistungsarten ist eine Poolung zur Erreichung der Mindestleistung zulässig. Bei der MR muss die volle Leistung innerhalb von 15 Minuten und bei der SRL innerhalb von 5 Minuten erbracht werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass die MR ein Fahrplanprodukt ist, das über Viertelstundenintervalle per Telefon abgerufen wird. Die Kraftwerke zur Erbringung von SRL sind in den Regelkreis des Regelzonenverantwortlichen mit eingebunden und der Abruf erfolgt automatisch. Die Zeitverfügbarkeit gibt an, welchen Anteil der vertraglich vereinbarten Bereitstellungszeit die Regelleistungskraftwerke mindestens zur Verfügung stehen müssen. Bei der MR wird eine Zeitverfügbarkeit von 100 % und bei der SRL von 95 % gefordert.

Für **Abbildung 2** wurden die Regelleistungs- und EEX-Preise von Dezember 2007 bis Juni 2008 ausgewertet. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da erst seit Dezember 2007 die neuen Ausschreibungsregeln für die SRL gelten.

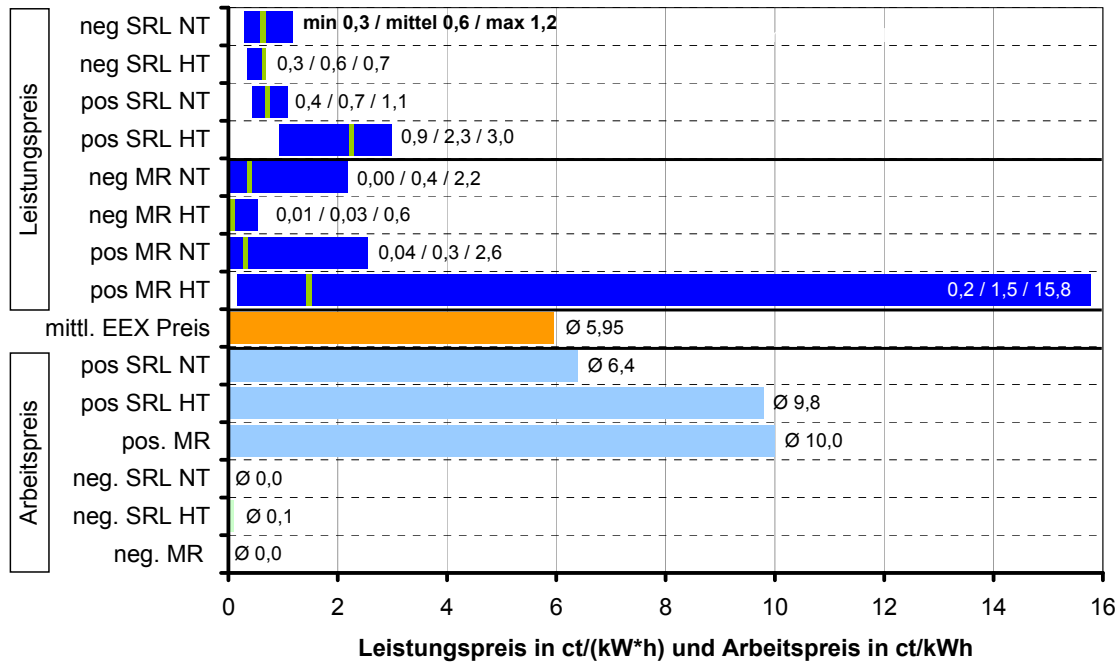


Abbildung 2: Leistungs- und Arbeitspreise für SRL und MR

Die Ausschreibung für SRL erfolgt seit dem 1.12.2007 monatlich für einen HT- und einen NT-Zeitblock. Die MR wird seit dem 1.12.2006 täglich für den Folgetag ausgeschrieben und es kann für sechs unabhängige Vierstundenblöcke angeboten werden. Die Ausschreibungen erfolgen gemeinsam für die vier Regelzonen. Der Abruf der Regelleistung erfolgt jedoch jeweils nur durch den Regelzonenbetreiber, dem der Regelleistungsanbieter zugeordnet wurde.

Von jeder Ausschreibung wurde der gewichtete mittlere Preis ermittelt. Für den Auswertungszeitraum wurden jeweils der minimale, der mittlere und der maximale Wert der so berechneten Preise dargestellt. Die sechs Zeitblöcke der MR wurden für den Vergleich gleichfalls wie die SRL in lediglich zwei Zeitblöcken (HT und NT) umgerechnet.

Bereits im Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/ wurde mit Hilfe von Rasterdiagrammen die Abrufcharakteristik von MR und das Regelzonensaldo, als Indikator für den Abruf von SRL, ausgewertet. Ein wichtiges Ergebnis war, dass MR relativ selten und in den einzelnen Regelzonen mit stark verschiedener Charakteristik abgerufen wurde. Daher wurden die abschließenden Auswertungen sowohl für die Regelzone von E.ON als auch von RWE durchgeführt. Für die wirtschaftliche Bewertung des Abrufs von MR wurden folgende Annahmen getroffen. Jeder MR-Abruf in der Regelzone entsprach einem Abruf bei den betrachteten Mikro-KWK-Anlagen, falls zu dieser Zeit Regelleistung angeboten wurde. Die Arbeitspreise für negative MR lagen i. d. R. bei etwa 0 ct/kWh. Dies bedeutete, dass ein Kraftwerk, trotz Leistungsreduktion zur Bereitstellung negativer MR den gemeldeten Fahrplan einhält und die vollen Zahlungen von seinen vertraglichen Abnehmern bekommt. Im Rahmen dieser Studie wurde für den Abruf negativer Minutenreserve, d. h. fahrplanmäßige Arbeit ohne tatsächliche physikalische Arbeit, der übliche Preis ohne KWK-Bonus vergütet. Für die Vergütung des Abrufs positiver MR wurde der minimale Arbeitspreis aller mit einem Zuschlag bedachten Angebote plus

KWK-Bonus und vermiedener Netznutzungsentgelte angesetzt. Seit März 2008 werden Daten zum Einsatz von SRL veröffentlicht. In **Abbildung 3** ist der Einsatz von SRL im Netzgebiet von E.ON als Rasterdiagramm dargestellt.

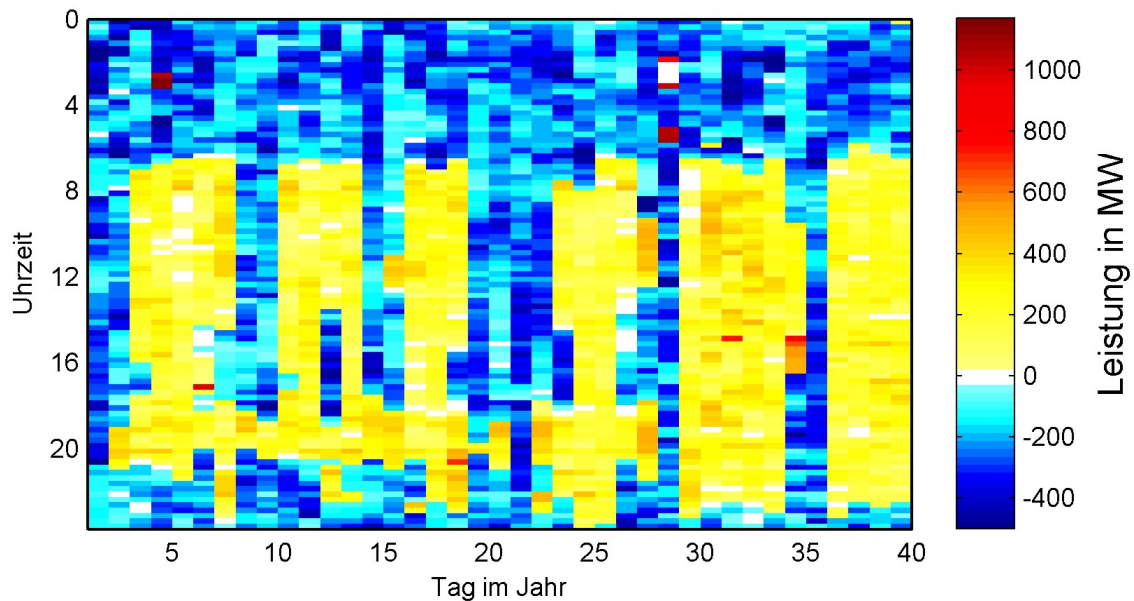


Abbildung 3: *Einsatz von SRL im Netzgebiet von E.ON vom 01.03.2008 bis zum 11.04.2008*

Das Rasterdiagramm zeigt ein ausgeprägtes Tages- und Wochenprofil. In Schwachlastzeiten wird vorrangig negative Leistung und in Hochlastzeiten vorrangig positive Leistung eingesetzt. Auffällig ist, dass nahezu konstant SRL eingesetzt wird. Die im Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/ getroffenen Rückschlüsse zum Einsatz von SRL auf Basis des Regelzonensaldos konnten bestätigt werden.

4 Messtechnische Untersuchungen

Am Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik an der TU München wurden vier KWK-Systeme unter realitätsnahen Bedingungen vermessen. Es kamen zwei verbrennungsmotorische Systeme von Senertec und Ecopower, sowie ein Stirlingmotor von Solo und ein Brennstoffzellensystem von Vaillant auf den Prüfstand. Hierbei wurden die ersten drei Anlagen als gesamtes System und die letzte lediglich als Einzelanlage messtechnisch erfasst. Eine detaillierte Darstellung des Prüfstands sowie der messtechnischen Untersuchungen findet sich in /FFE-12 07/. Es wurden jeweils die Typtage Wintertag, Übergangstag und Sommertag genau vermessen.

Im Rahmen dieses Projektes dienten die Messergebnisse im Wesentlichen der Validierung der Simulation und der Identifikation von praktischen Hürden von KWK-Anlagen zur Regelleistungsbereitstellung, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Neben den Leistungswerten der KWK-Anlage und des Spitzenlastkessels wurden die entsprechenden Vor- und Rücklauftemperaturen sowie Volumenströme zeitlich hoch aufgelöst erfasst. Hierdurch konnte das Verhalten der einzelnen Anlagenkomponenten realitätsnah in der Simulation abgebildet werden. Im Folgenden wurden

die für Regelleistungsbereitstellung besonders wichtigen technischen Eigenschaften der untersuchten KWK-Systeme zusammengefasst.

Der Kalt- oder Warmstart gibt Auskunft darüber, ob die KWK-Anlage in der Lage ist, Regelleistung in der vorgegebenen Zeitspanne (Einsatzbereitschaft) von fünf (SRL) bzw. 15 Minuten (MR) bereitzustellen. **Abbildung 4** zeigt die gemessene thermische und elektrische Leistung eines motorischen KWK-Systems an einem Übergangstag.

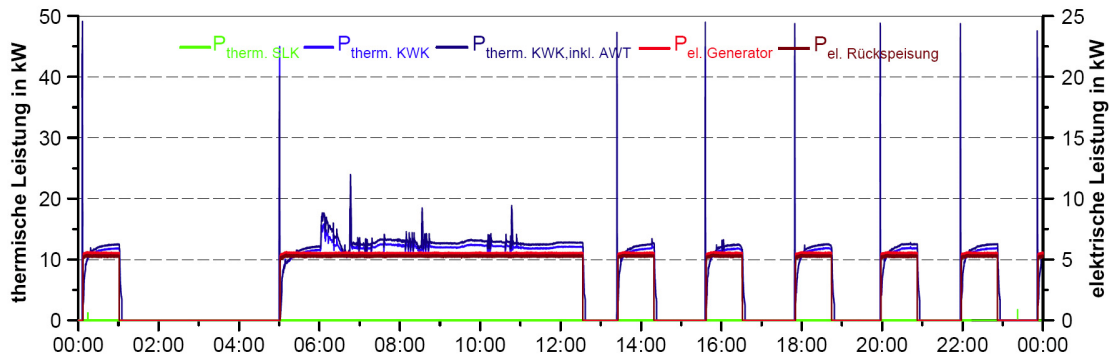


Abbildung 4: Kaltstart eines motorischen KWK-Systems /FFE-12 07/

Ein Kaltstart wurde mit einer vorangegangenen Mindeststillstandszeit von 1,5 Stunden definiert. Daher konnte beispielsweise der Start um 5.00 Uhr nach einem Stillstand von vier Stunden als Kaltstart gewertet werden. Es ist gut zu erkennen, dass die elektrische Nennleistung sehr schnell erreicht wurde und dann in etwa konstant blieb. Die thermische Leistung wies zunächst eine hohe Spitze auf, benötigte etwas länger zur Erreichung der Nennleistung und hatte einen etwas un stetigen Verlauf. Die anfängliche Leistungsspitze entstand rechnerisch durch die noch vorhandene Wärme in der KWK-Anlage aus der sich eine hohe Temperaturdifferenz zum nachströmenden kalten Wasser ergab. Entscheidend für Regelleistungsbereitstellung ist die elektrische Leistung. **Abbildung 5** vergleicht die gemessene elektrische Leistung eines Kalt- und Warmstarts des motorischen KWK-Systems.

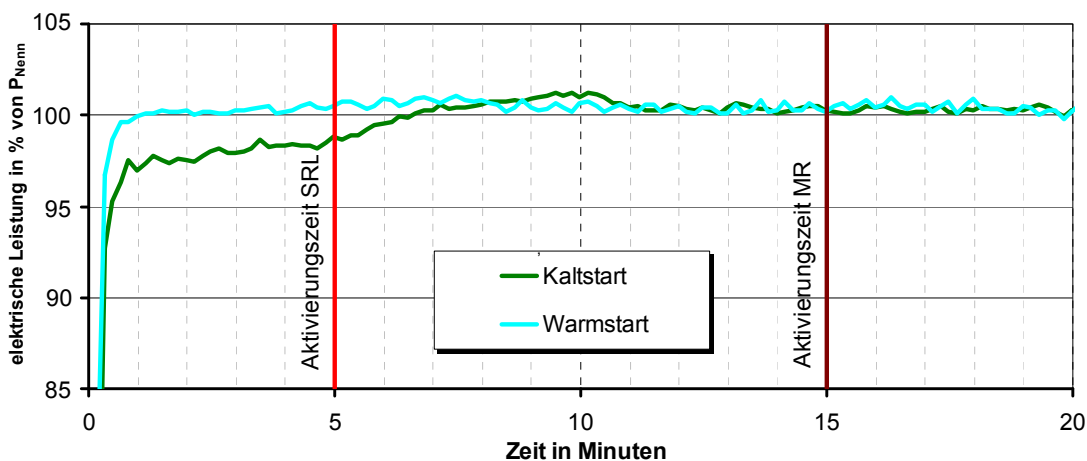


Abbildung 5: Kalt und Warmstart eines motorischen KWK-Systems nach /FFE-12 07/

Die elektrische Nennleistung (P_N) stand bei einem Warmstart nach ca. einer Minute zur Verfügung. Die Anlage erfüllte in diesem Betriebszustand die geforderte Akti-

vierungsgeschwindigkeit sowohl für MR als auch für SRL. Bei einem Kaltstart wurde die P_N erst nach ca. sieben bis acht Minuten erreicht und es wurde somit auch für diesen Fall die Bedingung des Marktes für MR erfüllt. Nach der für die SRL notwendigen Aktivierungszeit von fünf Minuten standen etwa 97 % von P_N zur Verfügung. Bei einem Start wurde aufgrund der benötigten Hilfsenergie zunächst Strom aus dem Netz bezogen. Im Falle der Senertec-Anlage wurden hierfür lediglich 4 Wh benötigt, so dass dies kein Hindernis für die Regelleistungsbereitstellung darstellen sollte. Die Analyse des Stoppverhaltens zeigte, dass die Leistung nach dem Stoppsignal sehr schnell auf Null zurückgeht. Somit wurden die in der Praxis geforderten Aktivierungsgeschwindigkeiten erfüllt.

Abbildung 6 zeigt die thermische und elektrische Leistung eines modulierenden KWK-Systems. Die Reduktion der Leistung von P_N auf Null erfolgte in etwa zwei Minuten. Es ist zu erkennen, dass die elektrische Leistung beim Start zügig Teillast und nach weniger als fünf Minuten P_N erreichte. Die thermische Leistung schwankte in den ersten zehn Minuten, ist aber auch in diesem Fall für die Regelleistungsbereitstellung nicht direkt relevant.

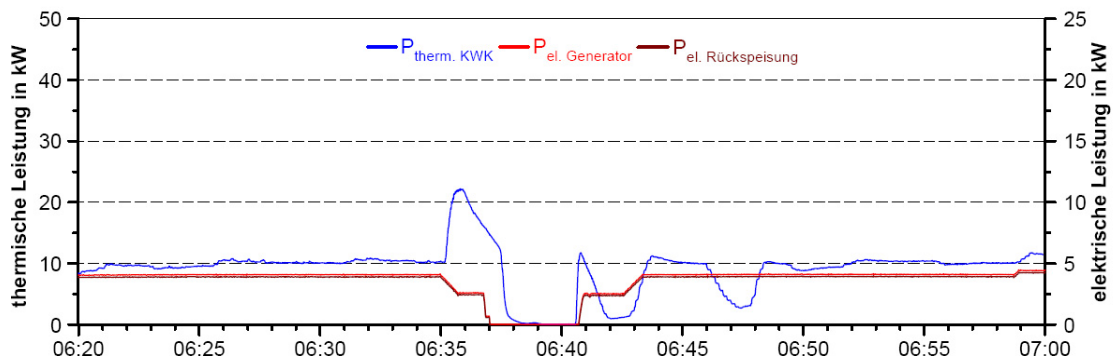


Abbildung 6: Warmstart eines modulierenden motorischen KWK-Systems /FFE-12 07/

Beim Kaltstartversuch wurde erst nach acht Minuten die volle Nennleistung erreicht. Die Auswertung der Typtaguntersuchungen zeigte, dass die Anlage i. d. R. nie länger als fünf Stunden außer Betrieb war. Nach einer Betriebspause von fünf Stunden konnten die notwendigen Aktivierungszeiten für SRL und MR erreicht werden. Die Auswertung des Start- und Stoppverhalten des untersuchten Stirlingmotors zeigte, dass die Aktivierungszeit für die Bereitstellung von MR eingehalten und für SRL knapp verfehlt wurde. Die Startzeiten der untersuchten Brennstoffzelle waren für eine Teilnahme am Regelleistungsmarkt zu lang. Ein Lastwechsel von 4,5 kW auf 1,5 kW bzw. von 1,5 kW auf 4,5 kW erfolgt innerhalb von etwa drei Minuten, womit sich grundsätzlich das Konzept der Regelleistungsbereitstellung realisieren ließe. Des Weiteren wurde die übliche Anzahl an Startvorgängen an einem Tag untersucht, mit der die zusätzliche Belastung vermehrter Starts durch die Regelleistungsbereitstellung abgeschätzt werden konnte.

In **Tabelle 2** sind Auswertungsergebnisse des Start- und Stoppverhaltens sowie die maximalen Startvorgänge an den drei Typtagen zusammengefasst.

Tabelle 2: *Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen*

	SenerTec verbrennungs- motorisches BHKW	Ecopower verbrennungs- motorisches BHKW	Solo Stirlingmotor
Aktivierungszeit für SRL / MR	erfüllt	erfüllt	nur für MR erfüllt
max. Start/Stoppvorgänge bei wärmegeführtem Betrieb an einem "Typtag"	8	2	5
Stoppzeit in Minuten	< 1	ca. 2	ca. 3
besondere Charakteristik	nicht modulierender Betrieb	modulierender Betrieb	modulierender Betrieb
	neg. Leistung bei Start/Stoppvorgang	neg. Leistung bei Start/Stoppvorgang	neg. Leistung bei Start/Stoppvorgang

Die Simulation der Regelleistungsbereitstellung wurde mit den KWK-Systemen Senertec und Ecopower durchgeführt. Diese erfüllten die Anforderungen des Regelleistungsmarktes und ermöglichen einen Vergleich zwischen einem modulierenden und einem nicht modulierenden System.

5 Simulation

5.1 Aufbau

Die im Projekt „Innovative KWK-Systeme“ entwickelten Algorithmen waren Grundlage für die Simulation. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in der Dissertation von Ulli Arndt /ARN-01 08/. Die Simulation ermöglichte die Darstellung und Analyse der dynamischen Vorgänge bei der Interaktion der einzelnen Elemente des KWK-Systems untereinander und der Reaktion des KWK-Systems auf die Anforderungen aus Heizwärme-, Warmwasser- und elektrischer Last. Mit der Simulation waren dynamische Vorgänge zeitlich hoch aufgelöst darstellbar. Es konnten sowohl einzelne interessante Zeitbereiche (z. B. Tage) wie auch ein ganzes Jahr simuliert werden. Die Modellierung und Programmierung erfolgte mit dem Programmpaket Matlab/Simulink. Die Elemente der Simulation wurden im Sachstandsbericht 2006 /FFE-08 06/ und die Eingabemaske mit den Wahlmöglichkeiten zur Art der KWK-Anlage, zum Lastgang, zur hydraulischen Verschaltung, Zirkulationsdauer, und Dämmstandard im Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/ dargestellt. Für die Untersuchung des Potenzials zur Regelleistungsbereitstellung wurden folgende Funktionalitäten entwickelt:

- eine externe Regelung für Regelleistungsvorhaltung und –abruf,
- die gleichzeitige Verschaltung mehrerer KWK-Anlagen zur Abbildung von Verbundeffekten,
- die Ausweisung des dynamischen Potenzials zu jedem Zeitpunkt.

5.2 Validierung der Simulation auf Basis der Prüfstandsuntersuchungen

Auf Basis der Messergebnisse konnte die Simulation validiert werden. Mit Streudiagrammen (vgl. **Abbildung 7**) wurden die wichtigsten Abhängigkeiten der Parameter untereinander analysiert. Die ermittelten Funktionen dienen einer möglichst

realitätsnahen Modellierung. Die Streudiagramme stellen die gegenseitigen Abhängigkeiten von thermischer (P_{th}) und elektrischer Leistung (P_{el}), Gasverbrauch (P_{Gas}) Volumenstrom (V) und Rücklauf- ($T_{Rück}$) und Vorlauftemperaturen (T_{Vor}) dar. Die unterschiedlichen Farben in den Diagrammen repräsentieren die verschiedenen Typtagmessungen. In der Diagonalen von links oben bis rechts unten sind die Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass beispielsweise die Annahme eines konstanten Wertes für Gasverbrauch und elektrische Leistung im Betrieb gerechtfertigt war. Es wurden auf Basis der Streudiagramme gegenseitige Abhängigkeiten mit mathematischen Funktionen dargestellt. Beispielsweise konnte die thermische Leistung der KWK-Anlage als Funktion der Rücklauf-temperatur mit einem Polynom 3. Grades mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2=98,5\%$ abgebildet werden, obwohl der optische Eindruck der „Punktewolke“ dies nicht gleich vermuten ließ.

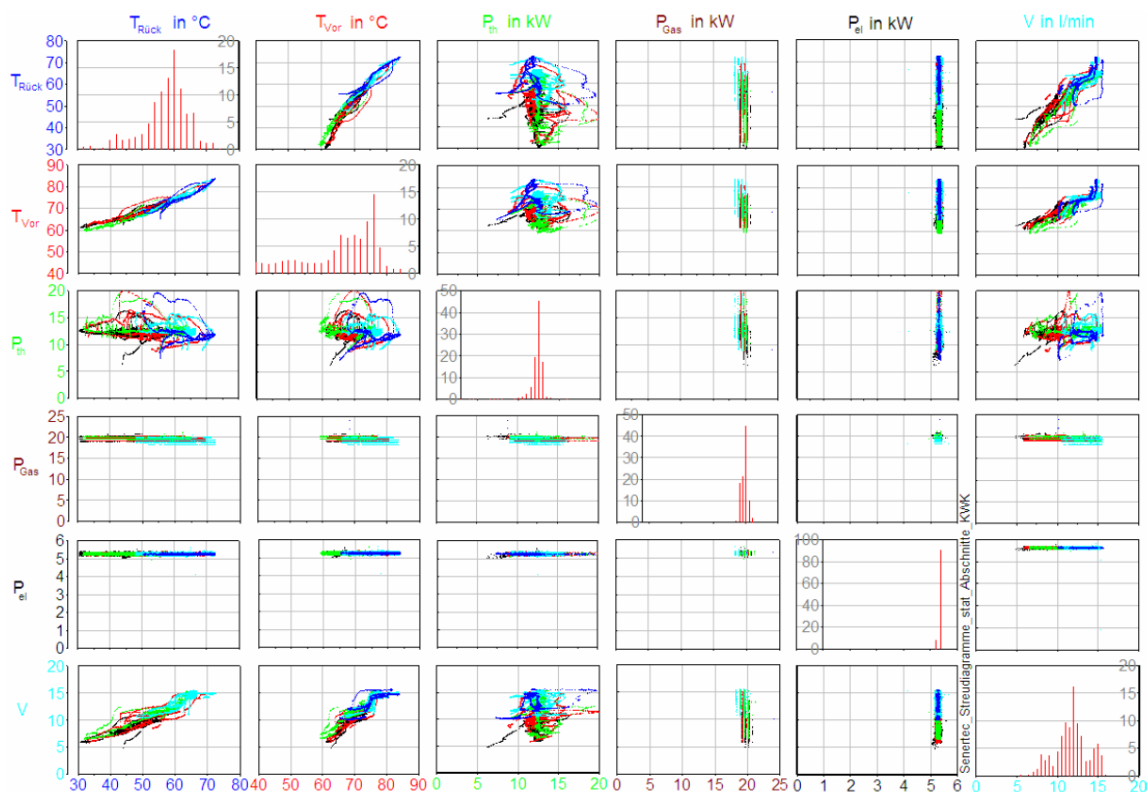


Abbildung 7: Streudiagramme für das KWK-System Senertec / FFE-12 07/

Für die messtechnische Validierung des simulierten Startverhaltens wurde der Bilanzzeitraum für die Senertec-Anlage auf 30 Minuten und für die Ecopower-Anlage auf 60 Minuten festgelegt (vgl. **Abbildung 8**).

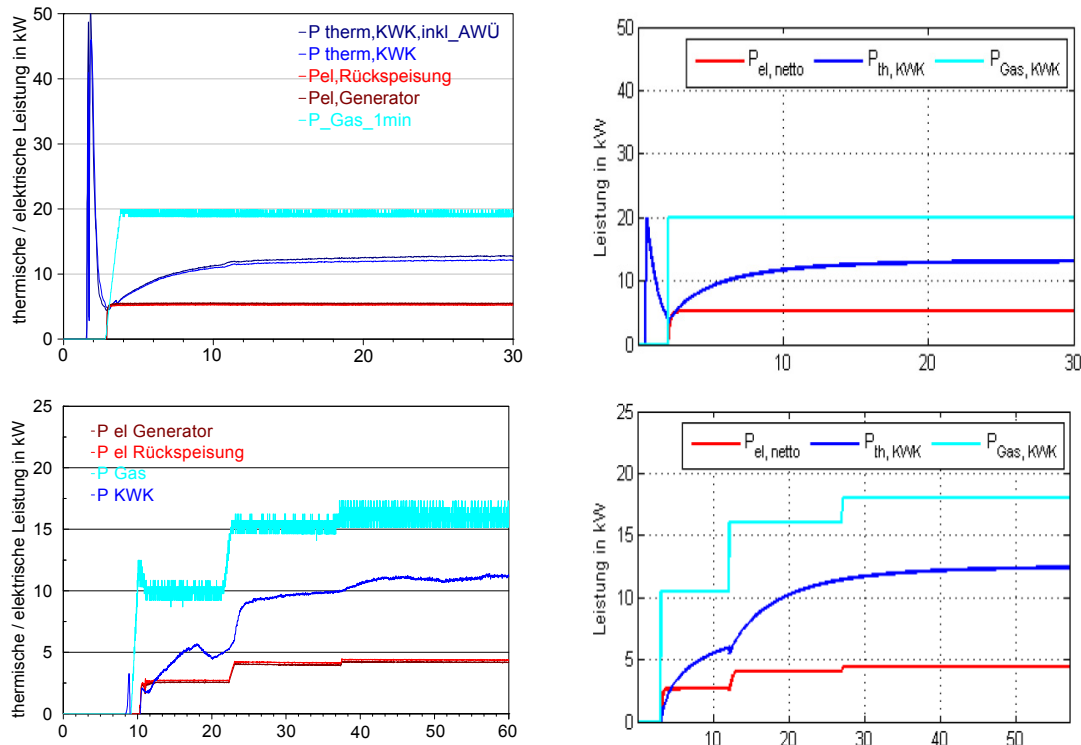


Abbildung 8: Gemessener (links) und simulierter (rechts) Anlagenstart des KWK-System Senertec (oben) und Ecopower (unten) / FFE-12 07/

Die beiden oberen Diagramme zeigen das Startverhalten der Senertec-Anlage. Gemessene und simulierte elektrische Leistung wiesen einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Die thermische Leistungsspitze wurde zur Vermeidung von Konflikten mit Sicherheitsabfragen in der Simulation auf 20 kW begrenzt. Nach der Spitze zeigt die thermische Leistung einen vergleichbaren Verlauf. Der Charakteristik des Gasverbrauchs wurde in der Simulation durch den sprunghaften Anstieg richtig dargestellt. Der stetige Anstieg bei den Messwerten war auf die 1-Minuten-Mittelwertbildung zurückzuführen. Die Simulation der Ecopower-Anlage (die beiden unteren Diagramme in Abbildung 8) bildete gut den Anstieg bis zur elektrischen Nennleistung in zwei Stufen ab. Der Gasverbrauch stieg proportional zur elektrischen Leistung. Der Verlauf der thermischen Leistung wurde in der Simulation geglättet. Die Energiemengen in dem Bilanzzeitraum des Startvorgangs wurden gegenübergestellt. Für die Senertec-Anlage wich die gemessene elektrische Energie um +0,7 %, die thermische Energie um -1,4 % und Brennstoffenergie um +1,4 % von den simulierten Werten ab. Bei der Ecopower-Anlage lagen die Abweichungen zwischen -1,7 % und +0,3 %.

Ein Vergleich der Tagesenergiebilanzen für die Senertec-Anlage zeigte, dass die simulierten Energiebilanzen für den Wintertag und den Übergangstag von den Messwerten lediglich um wenige Prozent (von +1,6 % bis -6,5 %) abwichen. Die deutlich höheren Differenzen an einem Sommertag konnten mit den Besonderheiten des Prüfstands erklärt werden und waren nicht auf eine ungenügende Modellierung in der Simulation zurückzuführen. Die Tagesenergiebilanzen bei der Bewertung der Ecopower-Anlage wichen deutlich stärker ab. Hier fiel besonders der Übergangstag auf, an dem die KWK-Anlage in der Simulation rund 30 % weniger elektrische und thermische Energie als in den Prüfstandsuntersuchungen bereitstellte. Hierdurch verdoppelte sich in etwa die Wärmebereitstellung durch den Spitzenlastkessel. Die detaillierten Untersuchungen

wurden daher vorrangig mit dem Senertec-Modell durchgeführt. Die Ecopower-Simulation wurde jedoch für eine grundsätzliche Aussage über die Vorteile eines modulierenden Systems verwendet. Es konnte gezeigt werden, dass die Simulation ausreichend genau die einzelnen funktionalen Zusammenhänge abbildet, so dass die veränderte Betriebsweise durch die Regelleistungsbereitstellung bewertet werden konnte.

6 Potenzial zur Bereitstellung von Regelleistung

6.1 Methoden

Ziel des Projektes war die Bestimmung des technischen Potenzials zur Bereitstellung von MR mit Mikro-KWK-Anlagen. Auf Empfehlung der Gutachter im Rahmen der Zwischenbegutachtung wurde eine Methodik entwickelt, mit der das Potenzial von Mikro-KWK-Anlagen zur Regelleistungsbereitstellung losgelöst von den aktuellen Ausschreibungsbedingungen untersucht werden konnte. Somit ließ sich das Potenzial zur Bereitstellung von SRL abschätzen.

Zur Ermittlung des technischen Potenzials der Bereitstellung von MR wurden die geltenden Ausschreibungsbedingungen als Randbedingung genommen. Die MR musste somit mindestens für vier Stunden in einem der sechs Angebotsblöcke vorgehalten werden. Die technische Machbarkeit war gegeben, wenn die KWK-Anlage in dem untersuchten Zeitbereich sowohl konstant ein- als auch ausgeschaltet sein konnte. Dies stellte sowohl für die Bereitstellung von positiver als auch negativer Reserve die Extrema dar, da es vorkommen kann, dass die Leistung nur vorgehalten und nicht abgerufen wird (positive Reserve: KWK-Anlage ist aus; negative Reserve: KWK-Anlage ist an) oder dass die Leistung über den gesamten Angebotszeitraum abgerufen wird (positive Reserve: KWK-Anlage ist an; negative Reserve: KWK-Anlage ist aus). Die weiteren wesentlichen Randbedingungen waren, dass der Heiz-, Warmwasser- und Strombedarf des Wohngebäudes immer gedeckt wurde und nicht mehr Wärme erzeugt wurde, als im Gebäude genutzt und in den Speicher gespeichert werden konnte. Der thermische Bedarf wurde auch gedeckt, wenn die KWK-Anlage bedingt durch die Reserveleistungsbereitstellung nicht lief, da der Spitzenlastkessel ausreichend dimensioniert war und das Gebäude somit alleine versorgen konnte. Die Stromversorgung erfolgte über das allgemeine Stromnetz.

Es musste letztendlich für jeden Zeitblock geprüft werden, ob die KWK-Anlage in dieser Zeit durchlaufen konnte, ohne dass es aufgrund einer zu geringen thermischen Last zu Sicherheitsabschaltungen kommt. Diese Prüfung erfolgte für die drei Typtage und für alle Kombinationen der Regelleistungsbereitstellung für die sechs Blöcke (Anzahl der Kombinationen = $\text{Regelvorgabe}^{\text{Anzahl der Blöcke}} = 3^6 = 729$). Als Regelvorgabe konnte für jeden Zeitblock entweder wärmegeführte Fahrweise, Vorhaltung positiver Reserve (KWK-Anlage ist aus) oder Vorhaltung negativer Reserve (KWK-Anlage ist an) gewählt werden. Eine isolierte Betrachtung eines Zeitblocks hätte das Ergebnis verfälscht, da die Fahrweise im zeitlich davor liegenden Zeitblock den Speicherbeladungsgrad bestimmte und somit Rückwirkungen auf die Fahrweise im betrachteten Zeitblock hatte.

Von den als technisch machbar bewerteten Profilen wurde jeweils das Profil mit dem höchsten wirtschaftlichen Potenzial ausgewählt und mit dieser Auswahl eine Jahressimulation durchgeführt. Hierdurch konnte eine energiewirtschaftliche Bewertung auf Basis der veränderten Kosten-, Primärenergie- und CO₂-Bilanzen durchgeführt werden. Für eine von den aktuell geltenden Ausschreibungsbedingungen losgelöste Bewertung des technischen Potenzials wurde die Kenngröße „dynamisches Potenzial“ definiert. Auf Basis der Pufferspeichertemperaturen und der Heizwärme- und Warmwasserlastgänge konnte mit dem dynamischen Potenzial für jeden Zeitpunkt berechnet werden, wie lange die zu erwartende maximale KWK-Laufzeit ab diesem Zeitpunkt hätte sein können. Des Weiteren wurde eine Darstellungsform des dynamischen Potenzials für ein ganzes Jahr für verschiedene Bereitstellungszeiträume entwickelt und der „Füllungsfaktor“ definiert. Hierdurch konnten Modifikationen des KWK-Systems (Auslegungsleistung, Speichergröße oder Regelung) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das technische Potenzial zur Regelleistungsbereitstellung bewertet werden. Eine detaillierte Darstellung der Methoden findet sich im Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/.

6.2 Technisches und wirtschaftliches Potenzial der Minutenreserve

Die technischen Anforderungen zur Bereitstellung von MR wurden für den Typtag Winter in den drei Angebotsblöcken von 8.00 bis 20.00 Uhr und am Übergangstag von 08:00 bis 12:00 Uhr erfüllt (vgl. **Tabelle 3**). An Sommertagen konnte keine Regelleistung bereitgestellt werden. Diese Referenzbetrachtung wurde mit der Senertec-Anlage in einem 10-Mehrfamilienhaus durchgeführt.

Tabelle 3: *Technisch mögliche Angebotsblöcke sowie Erlöse für Typtag 1-3*

	Grenztemperatur	Häufigkeit in Tagen	technisch mögliche Angebotsblöcke	Erlöse aus Leistungsvorhaltung in Ct pro Tag
Typtag 1	< 6,8°C	162	08.00 - 20.00 Uhr	2,7
Typtag 2	≥ 6,8°C bis < 9°C	35	08.00 - 12.00 Uhr	0,6
Typtag 3	≥ 9°C	168	-	0

Die Grenztemperaturen zur Typtagdefinition in /FFE-12 07/ erwiesen sich für den Aspekt der Regelleistungsbereitstellung als ungeeignet. Mit der Jahressimulation konnte gezeigt werden, dass die getroffenen Rückschlüsse zur Regelleistungsbereitstellung auf Basis der Typtagsimulation nicht für alle als entsprechender Typtag definierten Tage des Testreferenzjahres galten. Daher wurden die Grenztemperaturen für die Fragestellung der Regelleistungsbereitstellung neu festgelegt (vgl. Tabelle 3).

Es konnte gezeigt werden, dass die Bereitstellung negativer MR wirtschaftlicher als die Bereitstellung positiver MR ist. Dies lag an den verminderten KWK-Laufzeiten im Falle einer Bereitstellung von positiver MR, da diese sehr selten abgerufen wurde. In der Jahressimulation wurde daher für alle technisch machbaren Angebotsblöcke die Bereitstellung negativer Regelleistung hinterlegt. Die im Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/ präsentierten Ergebnisse basierten auf einer Berechnung mit einem mittleren Leistungspreis. Die Berechnung hatte einen zusätzlichen Erlös aus der Leistungspreisvergütung von 59 € ergeben. Die Detailanalyse der Leistungspreise in 2007 zeigte, dass im zeitlichen Verlauf und zwischen den sechs Angebotsblöcken

erhebliche Preisunterschiede bestanden. Die Leistungspreise für negative MR in der Zeit von 08.00 bis 20.00 Uhr betrugen mit ca. 0,03 Ct/(kW*h) in etwa nur ein Zehntel der Preise in der übrigen Zeit ist (vgl. Abbildung 2). Daher wurde für die Jahressimulation der Regelleistungsbereitstellung der gewichtete mittlere Leistungspreis für jeden Angebotsblock einzeln berechnet und in der Simulation hinterlegt. Mit der Vermarktung der Nettoleistung von 5,25 kW der Senertec-Anlage ließen sich mit der Leistungsvorhaltung lediglich 4,73 € pro Jahr zusätzlich erwirtschaften. Die hierdurch veränderte Fahrweise hatte zusätzlich einen Nettoertrag von 0,66 € aufgrund der veränderten Erdgasverbräuche und Einspeisevergütungen zur Folge. Neben der Vergütung für die Leistungsvorhaltung musste die Vergütung für den Abruf der Regelleistung berücksichtigt werden. Aufgrund der sehr verschiedenartigen Abrufhäufigkeit in den Regelzonen wurde der Abruf für die Regelzonen von E.ON und RWE simuliert. Im Netzgebiet von RWE wurden in den 2084 Angebotsstunden in Summe 139,5 Stunden und im Netzgebiet von E.ON 4,25 Stunden negative MR abgerufen. Im Netzgebiet von E.ON hatte der Abruf der MR daher kaum Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit. Der Abruf der negativen MR führte in Summe sogar zu einer verschlechterten Wirtschaftlichkeit von 17,40 €. Dies lag an den daraus resultierenden verminderten KWK-Laufzeiten. Die Zahl der Start- und Stoppvorgänge blieb im Vergleich zu einer rein wärmegeführten Fahrweise durch die Vorhaltung der MR nahezu konstant. Der Abruf der MR erhöhte die Starts um 2,1 % (E.ON) bzw. 8,5 % (RWE). Die bei den aktuellen Marktpreisen zu erzielenden Erlöse waren im Vergleich zu den Betriebs- und Verbrauchskosten eines KWK-Systems sehr gering, da beispielsweise die Gasverbrauchskosten bei etwa 3.500 €/a lagen.

6.3 Technisches und wirtschaftliches Potenzial der Sekundärregelleistung

Die im TransmissionCode /VDN 03/ geforderten Anforderungen bezüglich der Dynamik bei der Bereitstellung von SRL konnten durch die untersuchten Mikro-KWK-Anlagen erfüllt werden. Die Hürde für eine Marktteilnahme war die Sicherstellung der vertraglich zugesicherten Leistung über einen Monat. Die Verkürzung der Ausschreibungszeiträume von sechs auf einen Monat erfolgte zum 1. Dezember 2007. Eine weitere Änderung war getrennte Ausschreibung nach HT und NT. Der Zeitraum der HT-Scheibe ist von 8.00 bis 20.00 Uhr und entspricht somit dem Angebotszeitraum für MR an Wintertagen. In Monaten mit Tagesmittelwerten der Außentemperatur von kleiner 6,8 °C könnte somit SRL in der HT-Zeitscheibe angeboten werden. In dem betrachteten Testreferenzjahr betraf dies die Monate Februar und Dezember. In den Monaten Januar und März erfüllten 28 von 31 Tagen dieses Kriterium. Das Problem in der Praxis ist jedoch, dass bei einem Zeitraum von einem Monat keine zuverlässige Wetterprognose erstellt werden kann und somit nicht für den folgenden Kalendermonat festgelegt werden kann, ob Tage mit einer mittleren Außentemperatur kleiner 6,8 °C auftreten. An diesen Tagen könnte dann kein längerer Leistungsabruf gewährleistet werden. Aktuell ist daher eine Teilnahme am Markt für SRL nur im Verbund mit weiteren Erzeugungsanlagen machbar. In diesem Fall könnte jedoch nur ein Teil der installierten Leistung vermarktet werden, was die Wirtschaftlichkeit verringern würde. Auch bei der SRL ist aus wirtschaftlicher Sicht das Anbieten negativer Leistung dem Anbieten positiver Leistung vorzuziehen. Die mittleren Preise für SRL in der HT-Zeit waren deutlich höher als für MR. In dem Auswertungszeitraum der Abbildung 2 lag der

mittlere Leistungspreis für die HT-Zeit für SRL bei 0,6 ct/(kW*h) und bei MR bei 0,03 ct/(kW*h). Auf Basis dieser Preise und der Annahme, dass die Sekundärregelleistung an allen Wintertagen in der HT-Zeit hätte vermarktet werden können, ergaben sich Erlöse für die Leistungsvorhaltung von ca. 40 € für eine Senertec-Anlage. Die Arbeitspreise für den Abruf der SRL lagen wie bei der Minutenreserve i. d. R. bei 0 ct/kWh. Die Auswertung des SRL-Einsatzes in Abbildung 3 ergab einen seltenen Abruf von negativer SRL in der HT-Zeit. Somit würde die Berücksichtigung der SRL-Abrufe die Erlöse von etwa 40 € nicht wesentlich verändern.

6.4 Modifikationen des KWK-Systems

Für eine von den Ausschreibungsbedingungen losgelöste Bewertung des technischen Potenzials zur Bereitstellung von Regelleistung mit Mikro-KWK-Anlagen wurde die Methodik des dynamischen Potenzials entwickelt (vgl. Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/). Hiermit ließen sich insbesondere Auswirkungen von Systemmodifikationen untersuchen. **Abbildung 9** zeigt das dynamische Potenzial in Abhängigkeit des Bereitstellungszeitraums und verschiedener Systemvarianten für das Testreferenzjahr.

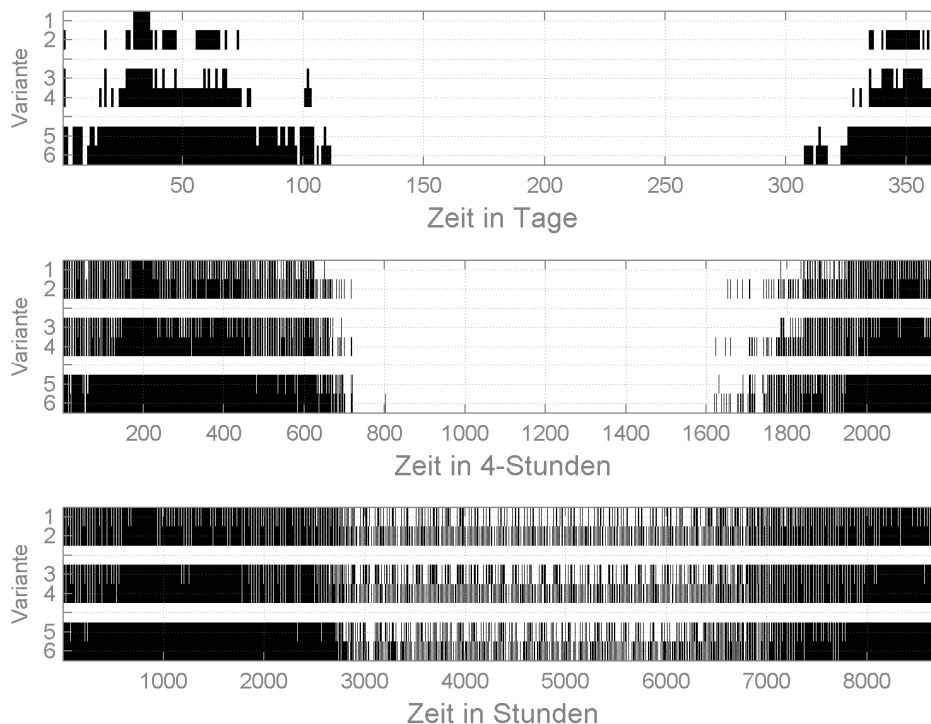


Abbildung 9: *Dynamisches Potenzial verschiedener Systemvarianten*

In den drei Diagrammen für die Bereitstellungszeiträume „Tage“, „vier Stunden“ und „eine Stunde“ in Abbildung 9 sind jeweils sechs Systemvarianten betrachtet worden: die Senertec-Anlage in einem 8-MFH (Zeilen 1/2), 10-MFH (Zeilen 3/4) und 16-MFH (Zeilen 5/6) mit entweder einem 1.000 l Pufferspeicher (Zeilen 1/3/5) oder einem 2.000 l Pufferspeicher (Zeilen 2/4/6). Die Referenzvariante ist somit jeweils in der Zeile 3 zu finden. Die überarbeitete Simulation ist der Grund für die leichten Abweichungen im Vergleich zum Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/. Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, konnte mit Hilfe der Simulationsrechnungen die Annahme bestätigt werden, dass sowohl ein höherer thermischer Bedarf, im diesem Fall ein größeres Mehrfamilienhaus,

als auch ein größerer Pufferspeicher das Potenzial zur kurzfristigen Leistungsbereitstellung erhöht. Noch ersichtlicher wird dieser Zusammenhang bei der Betrachtung des Füllungs-faktors in **Abbildung 10**.

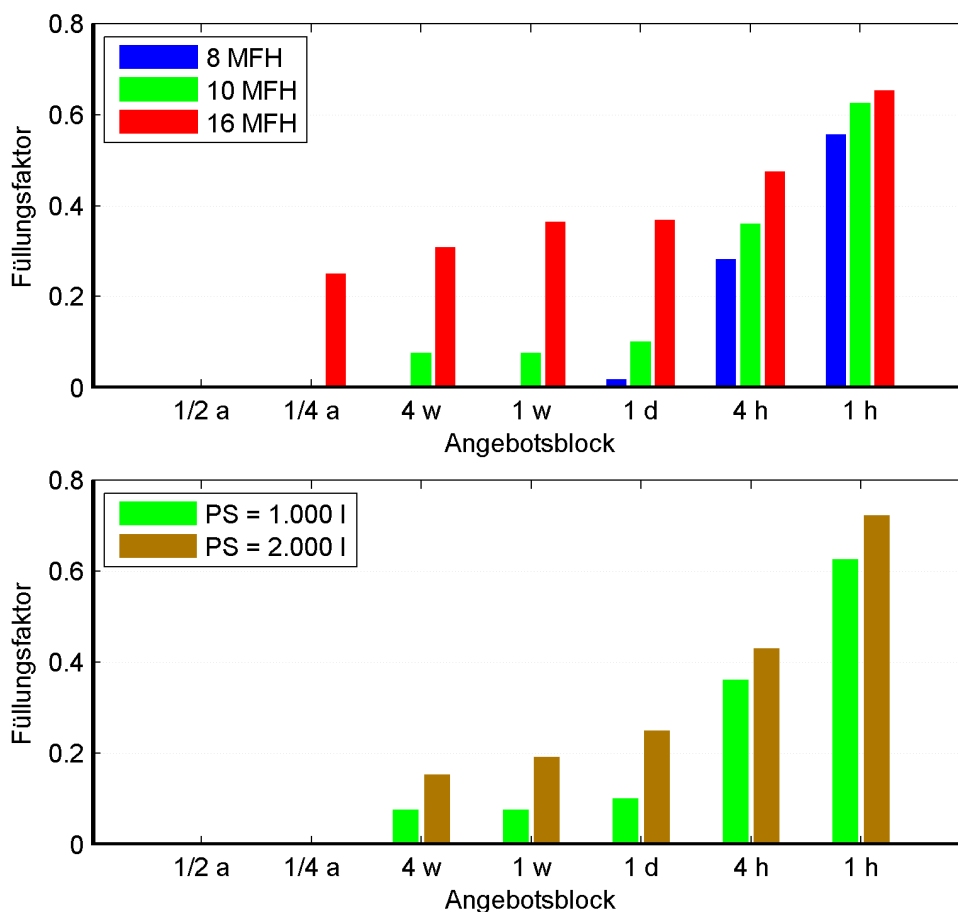


Abbildung 10: Vergleich der Füllungs-faktoren bei verschiedenen Gebäude- (oben) und Pufferspeichergrößen (unten)

Wie im oberen Teil der Abbildung zu erkennen ist, wirkte sich eine geringere KWK-Auslegungsleistung, umgesetzt durch die Simulation eines größeren Gebäudes, vor allem bei längeren Bereitstellungszeiträumen positiv aus. Während die KWK-Anlage in einem 16-MFH an etwa 40 % des Jahres einen Tag durchlaufen konnte, war dies beim 10-MFH nur in etwa 10 % und beim 8-MFH in etwa 4 % der Zeit gegeben. Bei einer kurzzeitigen Betrachtung war der Vorteil einer geringen Auslegungsleistung ebenfalls zu beobachten, die Unterschiede zwischen den drei Gebäudevarianten waren jedoch nicht mehr so groß. Bei der Auswertung der Effekte eines doppelt so großen Pufferspeichers wie im Referenzfall zeigten sich bereits bei den langzeitigen Bereitstellungszeiträumen Vorteile. So könnte das KWK-System mit einem 2.000 l Pufferspeicher an 10 Wochen und das System mit einem 1.000 l Speicher an 4 Wochen des Jahres durchlaufen. Der Vorteil eines größeren Pufferspeichers war bei einem Bereitstellungszeitraum von vier Stunden am geringsten.

Der Vergleich eines modulierenden Systems mit einem nicht modulierenden KWK-System gleicher Auslegungsleistung ergab, dass an den Wintertagen mit besonders hohem technischen Potenzial kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden KWK-Systemen bestand, da an diesen Tagen beide Anlagen im relevanten Zeitraum von 8.00

bis 20.00 Uhr mit Nennleistung betrieben wurden. An den Übergangs- und Sommertagen wurde das modulierende System vorrangig in Teillast betrieben. Hierdurch ergäbe sich die Möglichkeit sowohl positive als auch negative Leistung zu vermarkten. Vergütet würde in diesem Fall jedoch nur der entsprechende Anteil der Leistung.

6.5 Weitere Konzepte für die Regelleistungsbereitstellung mit Mikro-KWK-Anlagen

Im Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/ wurde bereits das Konzept der Regelzonensaldo geführten Fahrweise diskutiert. Hierbei zeigte sich, dass die KWK-Laufzeiten im Vergleich zur wärmegeführten Fahrweise deutlich verringert würden. Dies ist energiewirtschaftlich weder wünschenswert, da eine hoch effiziente Technik weniger genutzt würde, noch bei den aktuellen Arbeitspreisen wirtschaftlich darstellbar.

Ein weiteres Konzept wurde entwickelt und simuliert. Falls technisch machbar, wurde in den Angebotsblöcken negative MR vorgehalten. In der übrigen Zeit wurde bei positivem Regelzonensaldo wärmegeführt gefahren und bei negativen Regelzonensaldo die KWK-Anlage ausgeschaltet. Bei dieser Strategie würde in etwa in der Hälfte der KWK-Anlagenlaufzeit negative Leistung vorgehalten werden und in der anderen Hälfte ausschließlich Regelzonensaldo ausgleichend gefahren werden. In diesem Fall verringerte sich die KWK-Anlagenlaufzeit im Vergleich zur wärmegeführten Fahrweise um etwa 13 %.

Abschließend wurde noch folgendes Konzept simuliert: Positive MR wurde mit einem Kraftwerk mit geringen Investitionskosten aber hohen Betriebskosten, hohen CO₂-Emissionen und hohen Primärenergieverbrauch, aufgrund eines schlechten Nutzungsgrades, vorgehalten. Als Beispiel wurde eine mit Diesel betriebene Netzersatzanlage gewählt. Im Falle eines Abrufs durch den Regelzonenverantwortlichen wurde immer zunächst geprüft, ob die Mikro-KWK-Anlagen die Leistung bereitstellen konnten. Falls die KWK-Anlagen bereits mit Nennleistung betrieben wurden oder aufgrund eines geladenen Pufferspeichers und fehlender thermischer Nachfrage nicht laufen konnten, wurde die Leistung mit der Netzersatzanlage bereitgestellt. Die Simulation im Netzgebiet von E.ON zeigte, dass in 113 Stunden im Jahr positive Minutenreserve abgerufen wurde, wovon die Netzersatzanlage 84 % und die Mikro-KWK-Anlagen 16 % übernahmen. Im Netzgebiet von RWE wurde in 199 Stunden positive Minutenreserve mit einer Deckungsrate der KWK-Anlagen von 15 % abgerufen.

7 Energiewirtschaftliche Bewertung

Für die energiewirtschaftliche Bewertung der Regelleistungsbereitstellung mit Mikro-KWK-Anlagen ist deren Potential, konventionelle Regelleistungskraftwerke ersetzen zu können, von besonderem Interesse. Im Sachstandsbericht 2007 /FFE-23 07/ wurde ausgeführt, dass bei einer Regelstrategie mit dem Ziel der maximalen Verdrängung, etwa 14 % der installierten Mikro-KWK-Leistung konventionelle Regelleistungskraftwerke verdrängen könnten. Es konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass eine einfache Abschätzung des Substitutionspotentials über das Verhältnis des täglichen Warmwasserbedarfs zur maximalen thermischen Erzeugung der KWK-Anlage, zu

plausiblen Ergebnissen führt. Ein größerer Speicher konnte das Substitutionspotenzial leicht erhöhen und die Start- und Stoppvorgänge reduzieren. Es wurden die CO₂- und Primärenergie-Bilanzen erstellt. Der Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen im Vergleich zu einer ungekoppelten Wärmeerzeugung und vollständigem Strombezug aus dem Netz konnte bis zu 31 % der CO₂-Emissionen und bis zu 28 % des Primärenergiebedarfs verringern /ARN-01 08/. Im Rahmen des Projektes E2 standen jedoch die Veränderungen in den Bilanzen durch die Bereitstellung von Regelleistung im Fokus. Wie oben ausgeführt, war die wirtschaftlichste Variante der Regelleistungsbereitstellung die Vorhaltung negativer Leistung. Die Laufzeiten der KWK-Anlagen wichen von der rein wärmegeführten Fahrweise um weniger als 1 % ab. Da die Minutenreserve sehr selten abgerufen wurde, hatte die Regelleistungsbereitstellung keine nennenswerten Auswirkungen auf die CO₂- und Primärenergiebilanz.

8 Veröffentlichungen

U. Arndt, S. von Roon: *Innovative KWK-Systeme - Ersatz für Heizungen und Kraftwerke?*, 37. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Heizkraftwerke und dezentrale Energieerzeuger am 18./19.10.2005 im Congress Center Dresden, 2005

U. Wagner, H. Roth, S. Richter, S. von Roon: *Perspektiven in der Kraftwerkstechnik - Projekt KW21*, BWK Bd. 57 Nr. 10, Düsseldorf, 2005

U. Arndt, S. von Roon, U. Wagner: *Virtuelle Kraftwerke: Theorie oder Realität?*, BWK Bd. 58 Nr. 6, Düsseldorf, 2006

S. von Roon: *Innovative KWK zur Bereitstellung von Regelleistung*, 38. Kraftwerkstechnisches Kolloquium Kraftwerksbetrieb unter zukünftigen Rahmenbedingungen am 24./25.10.2006 im Congress Center Dresden, 2006

S. von Roon, U. Arndt; U. Wagner: *Simulation von Mikro-KWK-Anlagen zur Bewertung von Netzintegrationskonzepten*, 5. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien am 14. - 16.02.2007 in Wien, 2007

S. von Roon, T. Mezger, W. Mauch, U. Wagner: *The potential for Micro-CHP to provide load-frequency control*; 1st International Conference and Workshop on Micro-Cogeneration and Applications, 29.04.-01.05.2008, Ottawa

9 Quellen

ARN-01 08 Arndt, U.: *Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandsgestützter Simulation*. Dissertation. München: TUM Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, 2008

FFE-08 06 von Roon, Serafin; Arndt, Ulli; Gobmaier, Thomas: *Kraftwerke des 21. Jahrhunderts - Teilprojekt E2: Kleine KWK-Systeme im Kraftwerksverbund - Prüfstandsuntersuchungen und energiewirtschaftliche Bewertung der disponiblen Regelleistung - Sachstandsbericht 2006*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2006

- FFE-12 07 Arndt, U.; von Roon, S.; Kraus, D.; Mauch, W.; Mühlbacher, H.; Geiger, B.; Tzscheuschler, P.: *Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung - Messtechnische Untersuchungen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Systemvergleich und Optimierung*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2007
- FFE-23 07 von Roon, Serafin; Mezger, Tomás; Arndt, Ulli; Gobmaier, Thomas: *Kraftwerke des 21. Jahrhunderts - Teilprojekt E2: Kleine KWK-Systeme im Kraftwerksverbund - Prüfstandsuntersuchungen und energiewirtschaftliche Bewertung der disponiblen Regelleistung - Sachstandsbericht 2007*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE), 2007
- DWD 04 Christoffer J., Deuschländer T., Webs, M.: *Testreferenzjahre von Deutschland für extreme und mittlere Witterungsverhältnisse TRY*, Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. Main, 2004
- FUE 99 Fünfgeld, C.: *Repräsentative Lastprofile*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 1999
- IEKP Integriertes Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung, 5. Dezember 2007, Berlin
- MUE-01 07 Mühlbacher, H.: *Verbrauchsverhalten von Wärmeerzeugern bei dynamisch variierten Lasten und Übertragungskomponenten*. Dissertation. München: TU München, 2007
- VDEW 85 Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke – VDEW: *Ermittlung der Lastganglinien bei der Benutzung elektrischer Energie durch die bundesdeutschen Haushalte während eines Jahres*, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke mbH – VDEW, Frankfurt/Main, 1985
- VDN 03 Verband der Netzbetreiber: *TransmissionCode 2003 – Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber – Anhang D*, Berlin, 2003