

# Betriebsstrategien zur Integration von Mikro-KWK-Anlagen der Hausenergieversorgung in das elektrische Versorgungsnetz<sup>1</sup>

## Operation strategies to integrate CHP micro units in domestic appliances into the public power supply

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Magnus Pielke, Technische Universität Braunschweig, Deutschland, [m.pielke@tu-bs.de](mailto:m.pielke@tu-bs.de)

Dipl.-Inform. Martin Tröschel, OFFIS, Oldenburg, Deutschland, [martin.troeschel@offis.de](mailto:martin.troeschel@offis.de)

Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, Technische Universität Braunschweig, Deutschland, [m.kurrat@tu-bs.de](mailto:m.kurrat@tu-bs.de)

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath, OFFIS, Oldenburg, Deutschland, [appelrath@offis.de](mailto:appelrath@offis.de)

### Kurzfassung

Die Herausforderung der Energieversorgung besteht heute und auch in Zukunft in der Integration dezentraler Erzeuger in das elektrische Versorgungsnetz. Dezentrale Erzeuger auf Basis erneuerbarer Ressourcen oder effizienter Technologien wie der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugen die elektrische Energie nach der Verfügbarkeit der erneuerbaren Energiequellen bzw. im Falle der KWK-Anlagen nach dem aktuellen Wärmebedarf des zu versorgenden Objektes. Damit erfolgt selten eine bedarfsgerechte Stromeinspeisung in das Versorgungsnetz. Durch eine intelligente Nutzung des thermischen Pufferspeichers von KWK-Anlagen kann die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung von der Heizlast entkoppelt und so an der elektrischen Last im Versorgungsnetz orientiert werden. Die Effekte dieser netzorientierten Betriebsweise auf Netz- und Gebäudeebene zeigen Simulationen des Forschungsverbunds Energie Niedersachsen.

### Abstract

Nowadays and in future, the main challenge in power supply is the integration of distributed energy resources into the electric distribution network. The energy production of distributed energy resources as well as distributed combined heat and power units is based on the availability of renewable energy sources and the thermal demand of residential objects respectively. Therefore, the provided electrical supply rarely matches the system load. By using the thermal storage systems of CHP units in an intelligent way, the operation times of these plants can be decoupled from the residential object's thermal demand. Furthermore, the operation times and the electrical supply respectively can be shifted into peak load times of the electrical grid. The effects of this so called grid-oriented operational mode for CHP units are analysed in simulations of the Research Alliance of Lower Saxony.

## 1 Einsatz von KWK-Anlagen in der Hausenergieversorgung

Die Integration von KWK-Anlagen in die Hausenergieversorgung erfolgt in den häufigsten Fällen wärmegeführt. Damit wird die Anlage zur Heizungsunterstützung eingesetzt. Die Betriebszeiten orientieren sich hierbei an der Heizlast des Objektes.

### 1.1 Energiebedarfsprofile eines Mehrfamilienhauses

Mikro-KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis zu 5 kW finden ihre größte Anwendung in Mehrfamilienhäusern. Hier liegt ein ausreichend großer thermischer Energiebedarf vor, dass die Anlagen eine Betriebslaufzeit

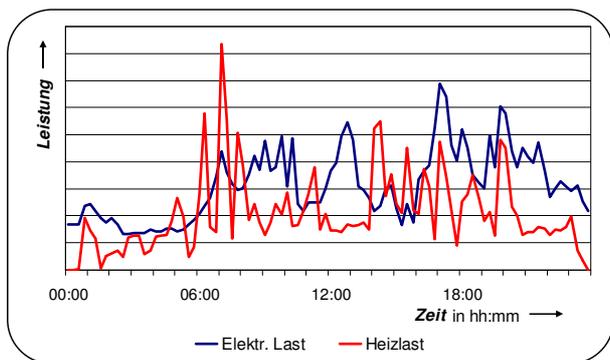
von 5.000 – 6.000 Stunden pro Jahr erreichen können. Damit kann unter den heutigen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit einem wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen gerechnet werden.

Maßgeblich für die Betriebszeiten der Anlagen ist das thermische Lastprofil des Wohnobjektes. Charakteristisch für das thermische Lastprofil ist der hohe Bedarf in den Morgenstunden, gefolgt von einer Schwachlastphase bis in den Nachmittag. Anschließend folgt erneut eine höhere thermische Heizlast bis ca. 22 Uhr, wenn das Heizungssystem in die Nachtabsenkung übergeht.

Das elektrische Lastprofil eines Wohnobjektes ist hingegen gekennzeichnet durch eine Spitzenlast zur Mittagszeit sowie einer erhöhten Last vom späten Nachmittag bis in den Abend hinein (vgl. Bild 1).

---

<sup>1</sup> Diese Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen (FEN). Die Forschung wurde unterstützt durch das Land Niedersachsen.

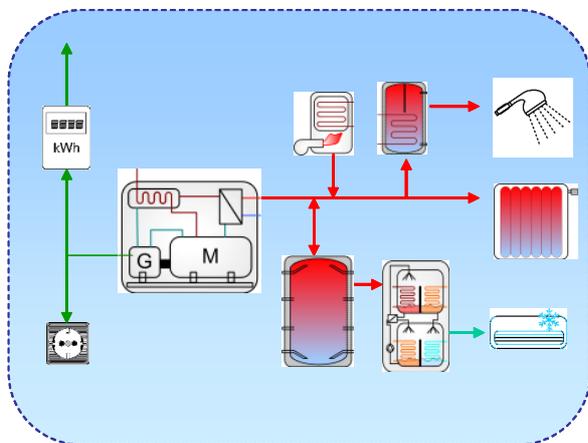


**Bild 1** Thermisches und elektrisches Lastprofil eines Mehrfamilienhauses gemäß VDI 4655 [1]

Die hier dargestellten Lastprofile eines bewölkten Werktags im Herbst zeigen, dass die Korrelation zwischen dem elektrischen und thermischen Lastprofil in der Regel sehr gering ist. Diese Tatsache hat zur Folge, dass der BHKW-Betrieb mit einer starren Kopplung thermischer und elektrischer Energieerzeugung nur eine Energieart bedarfsgerecht bereitstellen kann.

## 1.2 Integration von KWK-Anlagen in die Hausenergieversorgung

Ein KWK-System in der Hausenergieversorgung besteht neben der eigentlichen KWK-Anlage aus einem thermischen Pufferspeicher sowie einem Spitzenlastkessel (vgl. Bild 2).



**Bild 2** Integration eines KWK-Systems in die Hausenergieversorgung

Bild 2 zeigt, dass durch die Integration der KWK-Anlage die thermische Versorgung mit der elektrischen Versorgung gekoppelt wird. Hierbei sind der thermische Pufferspeicher sowie der Spitzenlastkessel mit dem BHKW und dem Heizkreis in Reihe geschaltet.

Erfolgt die Integration monovalent, so ist die Installation eines Spitzenlastkessels nicht erforderlich. In diesem Fall ist die installierte thermische Leistung des BHKW größer als die zu erwartende thermische Lastspitze des zu versorgenden Objektes. In den häufigsten Fällen wird das

BHKW jedoch wie in Bild 2 dargestellt zur Grundlastversorgung eingesetzt, um eine möglichst hohe Betriebsstundenzahl zu erreichen.

## 1.3 Betriebsweisen von Mikro-KWK-Anlagen in Wohnobjekten

Aufgrund der geringen Korrelation zwischen dem thermischen und elektrischen Lastprofil in Wohnobjekten haben sich verschiedene Betriebsweisen von Mikro-KWK-Anlagen in Wohnobjekten etabliert. Unterschieden wird hier nach der Energieart, die das BHKW bedarfsgerecht bereitzustellen versucht.

Orientiert sich der BHKW-Betrieb an dem thermischen Lastprofil des Objektes, so spricht man von der wärmegeführten Betriebsweise. In diesem Fall wird das BHKW betrieben, sofern die thermische Last es erfordert. Diese Anforderung entsteht, sobald der installierte thermische Pufferspeicher die thermische Last nicht mehr decken kann. Sinkt die thermische Last wieder ab, wird das BHKW noch so lange betrieben, bis der thermische Pufferspeicher wieder voll beladen ist. Ist die thermische Last jedoch so hoch, dass sowohl Speicherinhalt als auch die durch das BHKW bereitgestellte Energie nicht genügen, wird ein Spitzenlastkessel hinzugeschaltet, um die Lastspitze zu decken. Diese Betriebsweise ist die klassische Integration von KWK-Anlagen in die Hausenergieversorgung. Begründet ist dies in der einfachen Form der thermischen Speicherung als auch in der einfachen Einspeisung des elektrischen Stroms, der im Objekt zum Zeitpunkt der Erzeugung nicht benötigt wird, in das öffentliche Versorgungsnetz. Der Nutzungsgrad kann bei dieser Betriebsweise voll ausgenutzt werden.

Bei einer stromgeführten Betriebsweise erfolgt die Orientierung der Betriebszeiten an der elektrischen Last. Hierzu bieten sich insbesondere leistungsmodulierende BHKW an, die den schwankenden elektrischen Energiebedarf „nachfahren“ können. Bei dieser Betriebsweise erfolgt idealerweise keine Einspeisung in das öffentliche Versorgungsnetz, sondern der gesamte elektrische Strom der KWK-Anlage wird im Objekt verbraucht. Die dabei entstehende thermische Energie wird entweder zur Deckung der Heizlast verwendet oder im thermischen Pufferspeicher zwischengespeichert. Ist dieser vollständig gefüllt, muss überschüssige Wärme an die Umgebung abgeführt werden. Damit wird der Nutzungsgrad der KWK-Anlage nicht voll ausgeschöpft, ein Teil der Energie geht verloren. Aufgrund dessen wird diese Betriebsweise auch selten in Wohnobjekten eingesetzt [2].

## 2 Anpassung der Betriebsweise an die Netzlast

Aufgrund der geringen Korrelation des zeitlichen Wärme- und Strombedarfs in Wohnobjekten erfolgt die Strombereitstellung durch KWK-Systeme der Hausenergieversorgung aus Sicht der elektrischen Energieversorgung nicht optimal. Wird der thermische Pufferspeicher jedoch dafür

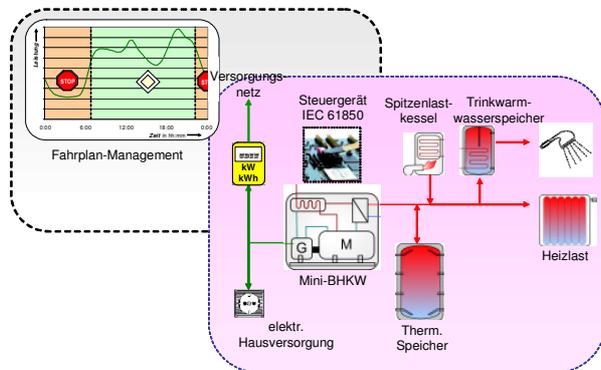
eingesetzt, die Betriebszeiten des BHKW nicht nur von dem thermischen Energiebedarf zu entkoppeln, sondern sie aktiv in Zeiten hoher elektrischer Last zu verschieben, so könnte der BHKW-Einsatz auch aus Sicht der elektrischen Energieversorgung verbessert werden.

## 2.1 Ansatz einer netzorientierten Betriebsweise

Die Idee der netzorientierten Betriebsweise ist die Erschließung der Vorteile sowohl der wärme- als auch der stromgeführten Betriebsweise. Zum einen soll die thermische Objektversorgung sichergestellt werden, und zum anderen soll der elektrische Strom möglichst bedarfsgerecht erzeugt werden. Hierbei wird allerdings nicht das elektrische Lastprofil des Wohnobjektes herangezogen, sondern der Lastgang des Niederspannungsnetzes. Dieser Lastgang ist durch die Gleichzeitigkeitseffekte einer großen Gruppe von Netzkunden stark vergleichmäßig und kann besser prognostiziert und „abgefahren“ werden.

Für einen solchen Betrieb ist es notwendig, sowohl den elektrischen Lastgang der Siedlung als auch den thermischen Energiebedarf des Objekts zu prognostizieren. Dieses kann heute beispielsweise durch Typtageverfahren oder anhand von Lastfortschreibungen erfolgen. In Zukunft werden die geplanten Maßnahmen zum Einsatz von Smart Metering [3] auch in dieser Hinsicht wichtige Beiträge leisten können.

Befinden sich in dem Netz, dessen Lastgang man prognostiziert, mehr als ein BHKW, bietet sich eine Abstimmung des Einsatzes der einzelnen Anlagen aufeinander ab, um ein ideales Ergebnis zu erzielen [4].



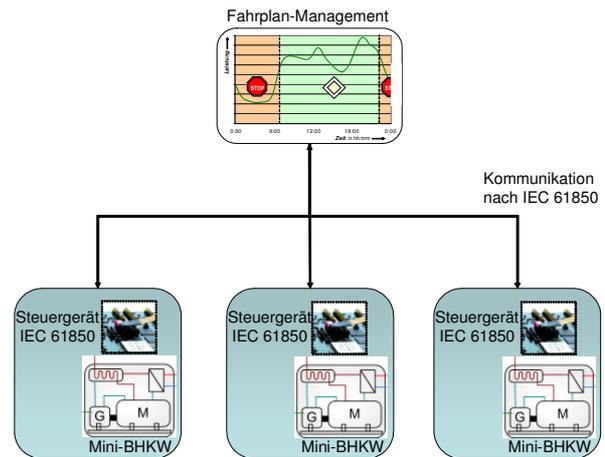
**Bild 3** Berechnungsmodule der Simulation

Diese Abstimmung des geplanten Einsatzes kann über einen Verbundbetrieb erfolgen, der, ausgehend von der Netzlastprognose, individuelle Fahrpläne an die einzelnen BHKW vergibt (vgl. Bild 3).

## 2.2 Realisierung in einem Verbundbetrieb

Unter einem Verbundbetrieb wird im Kontext der Fahrplanerstellung für dezentrale Anlagen ein informationstechnisches Zusammenschalten dieser Anlagen verstanden. Unerslässlich dafür ist die Schaffung einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur, die sowohl die dezentralen An-

lagen als auch die Planungskomponente vernetzt. Letztere muss einerseits in der Lage sein, den für die Fahrplanerstellung notwendigen, jeweils aktuellen Betriebszustand der KWK-Systeme (Einsatzbereitschaft BHKW, Füllstand thermischer Pufferspeicher) abzufragen und die aufeinander abgestimmten Einzelfahrpläne wieder an die Anlagen zu übermitteln. Da der für den Planungsprozess maßgebliche prognostizierte Siedlungslastgang nur an zentraler Stelle verfügbar ist (nämlich beim entsprechenden Energieversorger bzw. auf der Ebene der Ortsnetzstationen), bietet sich für den Verbundbetrieb im Sinne der netzorientierten Betriebsweise eine zentralisierte Planungskomponente an (siehe Bild 4).



**Bild 4** Zentralisierte Kommunikationsarchitektur

Um mit unterschiedlichen Anlagen, die heute in der Regel herstellerabhängige Kommunikationsschnittstellen aufweisen, interagieren zu können, ist der Einsatz eines standardisierten Informationsmodells unerlässlich. Die internationale Norm IEC 61850 bietet mit der Erweiterung IEC 61850-7-420: Communication Networks and Systems for Power Utility Automation for Distributed Energy Resources (DER) ideale Voraussetzungen für eine standardkonforme Anbindung unterschiedlicher dezentraler Energiesysteme [5]. Im Rahmen des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen ist dabei ein auf Field Programmable Gate Arrays (FPGA) basierendes Steuergerät entstanden, das als Übersetzer zwischen dem proprietären Datenmodell und IEC 61850-7-420 dient. Damit können auch bestehende Anlagen standardkonform in die Verbundsteuerung integriert werden.

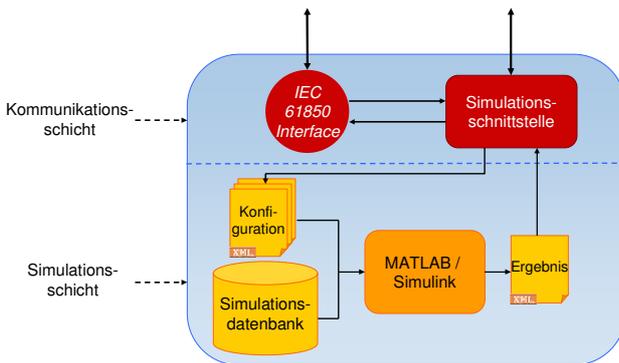
Die Kommunikation zwischen Planungskomponente und dezentralen Anlagen kann über unterschiedliche Transportmedien und mittels verschiedener Protokolle erfolgen. Vorstellbar sind u.a. Power Line Carrier (PLC), Funknetze (WLAN, GSM) oder das Internet (DSL, ISDN). Für letzteres stellt die Norm IEC 61400-25 eine Abbildung des Informationsmodells des IEC 61850 auf Web Services bereit, so dass etwa KWK-Anlagen über einen im Haus installierten Internetzugang gesteuert werden können.

### 3 Simulation eines Niederspannungsnetzbezirks

Um die Auswirkungen der dezentralen Einspeisung elektrischer Energie in elektrische Verbundnetze besser beurteilen zu können, entstand im Rahmen des Forschungsverbundes in einer interdisziplinären Anstrengung ein umfassendes Simulationsmodell. Dieses bildet sowohl das thermo-hydraulische Gebäudesystem (siehe Bild 2) als auch Niederspannungsnetzstrukturen ab (siehe Bild 7) und ermöglicht damit detaillierte Aussagen sowohl auf gebäude- als auch auf Netzebene.

#### 3.1 Aufbau der Simulation

Das Simulationsmodell ist in einer 2-Schichten-Architektur entworfen: einer Kommunikationsschicht, und einer Simulationsschicht. Die Kommunikationsschicht lässt sich dabei wiederum in eine Simulationsschnittstelle, die zur prinzipiellen Interaktion mit der Simulation gedacht ist, und ein IEC 61850-konformes Interface unterteilen. Letzteres ermöglicht es, eine Verbundsteuerung auf der Basis simulierter KWK-Anlagen zu entwickeln, die bereits im Frühstadium der Entwicklung standardkonform mit dezentralen Anlagen kommunizieren kann. Dadurch wird der Engineering-Aufwand für eine spätere Umsetzung in die „reale“ Welt deutlich verringert.

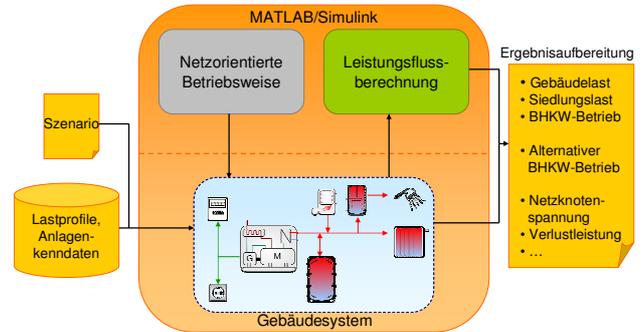


**Bild 5** Architektur des Simulationsmodells

Die Simulationsschicht umfasst sämtliche für den eigentlichen Simulationsvorgang erforderliche Komponenten: Eine Simulationsdatenbank, die im Wesentlichen statische, häufig benötigte Information wie Anlagentypen, Speicherkonfigurationen und Gebäudelastprofile nach VDI 4655 [1] enthält; ein oder mehrere Konfigurationen in Form spezifischer Definitionen von Niederspannungsnetzbezirken; und den Kern des Simulationsmodell, ein in MATLAB/Simulink umgesetztes Simulationsmodell, das die eigentlichen Simulationsläufe und Berechnungen durchführt (siehe Bild 6).

Das Simulationsmodell ist modular aufgebaut und umfasst mindestens eine mathematische Beschreibung eines thermo-hydraulischen Referenzsystems. Der modulare Aufbau erlaubt eine einfache Erweiterung des Simulationsmoduls um zusätzliche, externe Berechnungsmodulare. Zum aktuellen Zeitpunkt sind dies ein Modul zur statischen Leistungs-

flussberechnung, das weitergehende Analysen der Auswirkungen der dezentralen Stromeinspeisung auf die elektrischen Netze ermöglicht, und ein Erweiterungsmodul, das die Umsetzung der netzorientierten Betriebsweise in Form eines Fahrplanmanagements ermöglicht. Die eigentlichen Fahrpläne selbst werden dabei von einer externen Planungskomponente generiert, die von der Simulation unabhängig ist, und über die Simulationsschnittstelle an das Simulationsmodell kommuniziert.



**Bild 6** Berechnungsmodulare der Simulation

#### 3.2 Annahmen der Simulation

Für die Simulation mussten verschiedene Annahmen auf Objekt- und Netzebene getroffen werden. Allgemein basiert die Simulation jedoch auf einem real existierenden Niederspannungsnetzbezirk im Süden von Braunschweig, für den über ein gesamtes Jahr sowohl die elektrische Netzlast als auch der thermische Gesamtbedarf in 15-Minuten-Auflösung aufgezeichnet wurden.

##### 3.2.1 Objektebene

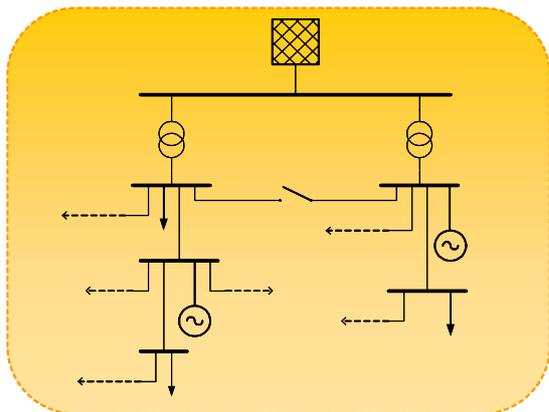
Zur Simulation der BHKW-Betriebszeiten, die notwendig sind, um eine Aussage über die Auswirkungen auf das Netzlastprofil geben zu können, müssen die Objekte in ihrem thermischen Verbrauchsverhalten abgebildet werden. Hierzu wurden die thermischen Jahresenergiebedarfe der Wohngebäude zugrunde gelegt. Aufbauend auf diesen konnte eine Auslegung der BHKW gemäß VDI Norm 3985 erfolgen [6]. Dabei wurden abhängig vom angenommenen Durchdringungsgrad (siehe Kapitel 4) mehrere Mikro-KWK-Anlagen mit 12,5 kW thermischer bzw. 4,7 kW elektrischer Maximalleistung in unterschiedlichen Gebäuden platziert. Jede Anlage wurde dabei über einen Pufferspeicher mit 950 Liter Volumen bzw. 34 kWh thermischer Speicherkapazität an das Gebäudesystem angebunden. Die Tageslastprofile für den thermischen Bedarf wurden dabei gemäß VDI Norm 4655 angewendet, indem der Bewölkungsgrad sowie die mittlere Tagesaußentemperatur einbezogen wurden [1].

Die elektrischen Lastprofile der Wohnobjekte wurden hingegen nicht anhand der VDI Norm ausgelegt. Da für die Netzebene ein gemessener Lastgang vorlag, wurden die Wohnobjekte gemäß ihrer elektrischen Jahresenergieverbräuche durch probabilistische Lastprofile nachgebil-

det. Der Summenlastgang aller Objekte entspricht dabei in einer sehr guten Näherung dem Netzlastgang.

### 3.2.2 Netzebene

Das Niederspannungsnetz besteht aus ca. 100 Wohngebäuden mit insgesamt über 300 Wohneinheiten. Die Netzstruktur ist typisch für die Niederspannungsebene; es ist ein offenes Maschennetz, so dass durch die Trennschalter ein Strahlennetz entsteht (vgl. Bild 7). Dieses Netz wird dabei von zwei Ortsnetztransformatoren aus dem 20-kV-Mittelspannungsnetz versorgt. An diesen Ortsnetzstationen wurden über ein Jahr der elektrische Lastgang in 15-Minuten-Intervallen erfasst.



**Bild 7** Aufbau des Niederspannungsnetzes

Zur Durchführung einer Lastflussberechnung sowie einer Verlustbestimmung sind die Eigenschaften der Netzelemente in der Simulationsumgebung mit abgebildet.

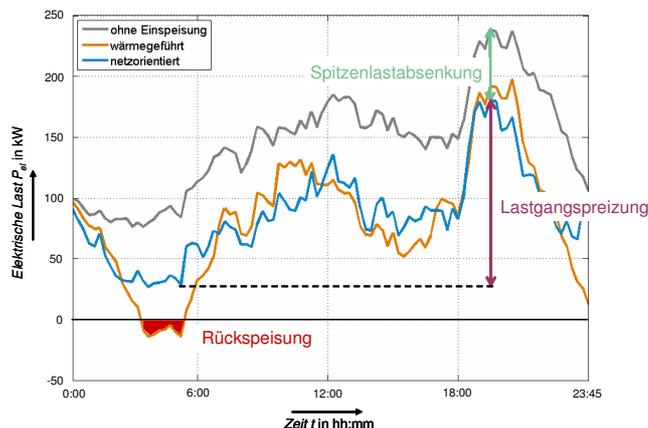
## 4 Simulationsergebnisse

Ziel der Simulation ist es, die „klassische“ wärmegeführte Betriebsweise mit der hier vorgestellten netzorientierten Betriebsweise von BHKW der Hausenergieversorgung zu vergleichen. Dieser Vergleich soll zum einen auf der Netzebene erfolgen, um die Auswirkungen auf den Siedlungslastgang ermitteln zu können. Zum anderen sind jedoch die Auswirkungen im Objekt ebenso von Bedeutung, um über die Praktikabilität dieser Betriebsweise urteilen zu können. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf einen bestimmten angenommenen Durchdringungsgrad, der durch den prozentualen Deckungsanteil des elektrischen Gesamtbedarfs des betrachteten Siedlungsgebiets durch KWK-Anlagen definiert ist. Darüber hinaus wurde für jedes Szenario jeweils ein gesamtes Jahr in 15-Minuten-Auflösung simuliert.

### 4.1 Ergebnisse auf Netzebene

Zielsetzung der netzorientierten Betriebsweise ist Verschiebung der Betriebszeiten der BHKW so, dass eine Vergleichmäßigung des Netzlastgangs erzielt wird. Diese Zielerreichung lässt sich anhand verschiedener Kennzahlen bestimmen. Neben der Spitzenlastabsenkung kann hier

auch die Spreizung des Lastgangs, definiert als Differenz von maximaler zur minimaler Last, eine Aussage liefern. Dazu wird die Veränderung der Lastgangspreizung durch den Einfluss der dezentralen Einspeisung für die beiden untersuchten Betriebsweisen bestimmt. Des Weiteren ergeben sich besonders bei hohen Anteilen dezentraler Erzeuger Szenarien, in denen eine Rückspeisung in das vorgelagerte Netz erfolgt. So kann auch die rückgespeiste Energie als Maß zur Bewertung der netzorientierten Betriebsweise herangezogen werden (siehe Bild 8).



**Bild 8** Netzlastgang bei einem BHKW-Anteil von 40 %

#### 4.1.1 Niedriger Durchdringungsgrad (10%)

Im ersten Szenario wurde ein Durchdringungsgrad von 10% angenommen, d.h. 10% des elektrischen Gesamtenergieverbrauchs der Siedlung konnten theoretisch durch installierte KWK-Anlagen gedeckt werden. Dafür wurden in zwei nach dem thermischen Bedarf ausgewählten Mehrfamilienhäuser jeweils zwei, insgesamt also vier BHKW angenommen. Tabelle 1 zeigt vergleichend die Ergebnisse für die wärmegeführte und die netzorientierte Betriebsweise.

**Tabelle 1** Simulationsergebnisse bei niedriger Durchdringung

	Wärmegeführt	Netzorientiert
Spitzenlastabsenkung	7%	7%
Vergleichmäßigung	0,1 %	0,2%
Rückspeisung	0 kWh	0 kWh

Eine Rückspeisung elektrischer Energie findet nicht statt, da die kombinierte Leistung der KWK-Anlagen selbst in Schwachlastzeiten zu gering ist, um einen Überschuss zu produzieren. Bezogen auf den Gesamtjahreslastgang wurde die Spitzenlast in beiden Betriebsweisen um ca. 7% reduziert. Die wärmegeführte Betriebsweise führte darüber hinaus zu einer Vergleichmäßigung von ca. 0,1% (d.h. die Spreizung des Gesamtjahreslastgangs nahm um ca. 0,1%

ab); die netzorientierte erzielte eine Vergleichmäßigung der Netzlast von ca. 0,2%.

Für den niedrigen Durchdringungsgrad lässt sich damit festhalten, dass die netzorientierte Betriebsweise auf Netzebene keine signifikanten Unterschiede zum wärmegeführten Betrieb erzielen konnte und der Aufwand einer Verbundsteuerung damit nicht gerechtfertigt ist.

#### 4.1.2 Mittlerer Durchdringungsgrad (20%)

Analog zum niedrigen Durchdringungsgrad wurden in diesem Szenario insgesamt 10 KWK-Anlagen in 5 Mehrfamilienhäusern angenommen. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse auf Netzebene:

**Tabelle 2** Simulationsergebnisse bei mittlerer Durchdringung

	Wärmegeführt	Netzorientiert
Spitzenlastabsenkung	8,4%	17,4%
Vergleichmäßigung	-10,7 %	0,2%
Rückspeisung	0 kWh	0 kWh

Auch in diesem Szenario findet keine Rückspeisung elektrischer Energie in die vorgelagerte Netzebene statt. Dafür zeigen sich signifikante Unterschiede bzgl. der Auswirkungen der unterschiedlichen Betriebsweisen: Während der wärmegeführte Betrieb im Vergleich zur niedrigen Durchdringung mit ca. 8,4% keine nennenswerte Verbesserung bei der Absenkung der Spitzenlast erzielen kann, erreicht der netzorientierte Betrieb mit ca. 17,4% eine mehr als doppelt so hohe Reduktion. Auch bezüglich der Lastgangvergleichmäßigung zeigt sich ein sehr unterschiedliches Bild: Die wärmegeführte Betriebsweise führt in diesem Szenario zu einer Zunahme der Lastgangspreizung um ca. 10,7%, während die netzorientiert betriebenen Anlagen mit ca. 0,2% trotz doppelter Leistungskapazität den Wert des vorherigen Szenarios beibehalten.

Damit lässt sich insgesamt festhalten, dass die durch eine Verbundsteuerung umgesetzte netzorientierte Betriebsweise in einem Siedlungsgebiet mit über 100 Gebäuden bereits mit 10 KWK-Anlagen positive Effekte auf Netzebene generieren kann.

#### 4.1.3 Hoher Durchdringungsgrad (40%)

In diesem Szenario wurden insgesamt 18 KWK-Anlagen in 11 Mehrfamilienhäusern angenommen. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse auf Netzebene:

**Tabelle 3** Simulationsergebnisse bei mittlerer Durchdringung

	Wärmegeführt	Netzorientiert
Spitzenlastabsenkung	11,9%	29,3%
Vergleichmäßigung	-23,3%	-2,25%
Rückspeisung	4912 kWh	5263 kWh

In diesem Szenario zeigt sich erstmals eine Rückspeisung überschüssiger elektrischer Energie in die vorgelagerte Netzebene, die sowohl im wärmegeführten als auch im netzorientierten Betrieb auftreten. Wie in Bild 8 dargestellt findet eine Rückspeisung stets zu elektrischen Schwachlastzeiten statt, wenn zeitgleich eine hohe thermische Last in den Gebäuden anfällt. Dies ist insbesondere im Winter der Fall, da die hier zur Grundlastdeckung ausgelegten KWK-Anlagen unabhängig von der Betriebsweise durchschnittliche Tagesbetriebszeiten nahe 24 Stunden haben. Die im netzorientierten Betrieb um ca. 7% größer ausfallende Rückspeisung wird Ansatzpunkt für eine weitere Optimierung dieser Betriebsweise sein.

Bezüglich der beiden anderen Kennzahlen bestätigt sich der sich bereits im zweiten Szenario abzeichnende Trend: Die wärmegeführte Betriebsweise führt zu einer Spitzenlastreduktion von ca. 11,9%, während die netzorientierte Betriebsweise hier ca. 29,3% erzielen kann. Die Lastgangspreizung nimmt im wärmegeführten Betrieb um ca. 23,3%, bei netzorientiert betriebenen Anlagen nur um ca. 2,3% zu. Dieser Unterschied in der Vergleichmäßigung des Siedlungslastgang führt in Kombination mit den beobachteten Rückspeisungen zu folgender Schlussfolgerung: Im netzorientierten Betrieb finden die Rückspeisungen zwar häufiger, dafür aber mit geringerer Ausprägung statt (da die Lastgangspreizung nicht nennenswert zunimmt). Im wärmegeführten Betrieb hingegen wird zwar weniger oft, aufgrund der deutlichen Zunahme der Lastgangspreizung allerdings mit ausgeprägten Leistungsspitzen in die vorgelagerte Netzebene zurückgespeist.

## 4.2 Ergebnisse der Objektebene

Die Ergebnisse auf Netzebene haben gezeigt, dass die netzorientierte Betriebsweise gegenüber der wärmegeführten Betriebsweise positive Effekte bewirken kann.

Eine Bewertung der Ergebnisse der Objektebene ist jedoch schwierig. Hierzu gibt es wenig Kennzahlen, die eine eindeutige Vorteilhaftigkeit dieser Betriebsweise belegen würden. Als wesentliche Kennzahl kann zum einen die Volllaststundenzahl der BHKW in den Objekten analysiert werden. Damit einher geht der Deckungsanteil des thermischen Energiebedarfs der Objekte durch die BHKW. Diese Kennzahlen zeigen, dass die Betriebsweisen hier sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Dieses ist aufgrund der vorgegebenen Heizlast auch zu erwarten. Ein geringfügig höherer Deckungsanteil der thermischen Energie durch die BHKW wird bei einer netzorientierten Betriebsweise erzielt. Dieses geht auf das veränderte Speichermanagement zurück. Dadurch, dass der thermische Energiebedarf der Objekte prognostiziert wird, erfolgt die Speicherbewirtschaftung vorausschauend, so dass vor thermischen Bedarfsspitzen eine Speicherbeladung durch das BHKW angestrebt wird. Damit kann mehr thermische Energie des BHKW zur Objektversorgung genutzt werden, die Volllaststundenzahl erhöht sich und der Anteil des Spitzenlastkessels an der Energieversorgung kann reduziert werden (vgl. Tabelle 4).

**Tabelle 4** Gemittelte Ergebnisse auf Objektebene

	Wärmegeführt	Netzorientiert
Volllaststunden / Jahr	~ 5690 h	~ 5790 h
Deckungsanteil th. Energie	~ 76,9 %	~ 77,9 %
Anzahl Starts	~ 353	~ 1217
Durchschnittliche Laufzeit / Start	~ 15,7 h	~ 4,1 h

Die Simulationsergebnisse zeigen jedoch auch, dass die Orientierung der Betriebszeiten an dem elektrischen Siedlungslastgang zu einer erhöhten Schaltfrequenz der Anlagen führt. Die Zahl der BHKW-Starts vervierfacht sich fast. Damit reduziert sich die durchschnittliche Laufzeit je Start auf vier Stunden gegenüber knapp 16 Stunden bei der wärmegeführten Betriebsweise.

Eine Einordnung dieses Effekts ist schwierig. Zum einen lässt sich ein erhöhter Verschleiß durch die Hohe Anzahl an Starts vermuten, zum anderen reduziert sich die Anzahl der Kaltstarts, da die Stillstandszeiten des BHKW sich verringert.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulation von BHKW der Hausenergieversorgung in Siedlungsgebieten hat gezeigt, dass deren Betrieb zur Entlastung des Niederspannungsnetzes führen kann. Gerade bei einem geringen Anteil dezentraler Erzeuger in einem Netzgebiet ergeben sich bereits ohne weiterführende Maßnahmen positive Effekte. Steigt der Anteil der KWK-Anlagen, so ist aufgrund der wärmegeführten Betriebsweise mit einer starken Zunahme der Netzlastfluktuationen zu rechnen. Diesen kann mit Hilfe der netzorientierten Betriebsweise entgegengewirkt werden. Dabei zeigt sich, dass dieser Betrieb auch hinsichtlich der Objektversorgung positive Effekte hat. Die Anzahl der Volllastbetriebsstundenzahl kann gesteigert werden.

Eine Erprobung dieses Verbundbetriebs in einem Niederspannungsnetz soll Aufschluss geben, inwieweit die Simulationsergebnisse bestätigt werden können. Parallel hierzu ist eine Entwicklung eines geeigneten Geschäftsmodells erforderlich, um die Synergien auf Netz- und Objektebene heben zu können. Dieses sind Ziele des Forschungsverbundes Energie Niedersachsen in den nächsten Jahren.

## 6 Literatur

- [1] VDI e.V. *Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen*. VDI 4655. Düsseldorf: Beuth Verlag, 2007.
- [2] C. Schulz. *Systembetrachtung zur Integration von Mini-Blockheizkraftwerken in das elektrische Versorgungsnetz*. Dissertation, TU Braunschweig, 2007.

- [3] VDE e.V. *Smart Distribution 2020 – Virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen*. Berlin: VDE Verlag, 2008.
- [4] H.-P. Beck. *Tagungsband zum 1. Statusseminar des FEN*. Goslar, 2007.
- [5] Korte, M., Tröschel, M., Schulz, C., Pielke, M., Kurat, M., Slomka, F.: *Koordination dezentraler Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen für die Verwendung einer netzorientierten Betriebsweise im Verbund*. In: Internationaler ETG-Kongress 2007. Berlin: VDE Verlag, 2007.
- [6] VDI e.V. *Von den Grundsätzen für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen*. VDI 3985. Düsseldorf: Beuth Verlag, 2000.