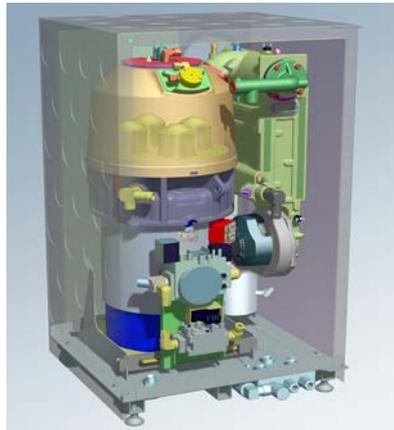




Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz



Abschlussbericht zum Projekt

Systemstudien und Betriebsführungsstrategien für
Mini-Kraftwärmekopplungsanlagen in Wohngebäuden

erstellt von

Dr. habil. Volker Wittwer, Dipl.-Ing. Benoit Sicre
Dr.-Ing. Andreas Bühring, Dipl.-Ing. Matthias Vetter,
Dipl.-Wirt.-Ing. Marian Vogel und Dr.-Ing. Christof Wittwer
Fraunhofer ISE, Freiburg im Breisgau



Inhalt

1	Technologie- und Herstellerübersicht	3
2	Modellbildung und Simulation	5
2.1	Anlagenkonzepte für die Haustechnik	5
2.2	Randbedingungen für die Simulation	6
2.3	Anlagenmodelle	7
3	Betriebsführungskonzepte	10
3.1	Betriebsführung	10
3.2	Energetischer Vergleich der Technologien	11
3.3	Kostenbenchmark	13
4	Zentrale Steuerung dezentraler Mini-KWK-Anlagen	14
4.1	Strombörse im Niederspannungsnetz	15
4.2	Untersuchungen im Niederspannungsnetz	17
4.3	Simulationsergebnisse	18
5	Entwurf eines Entwicklungsfeldes für Mini-KWK-Anlagen	20
6	Zusammenfassung und Empfehlungen	21

Dieser Abschlußbericht umfasst 25 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder in sinnentstellendem Zusammenhang erfolgen.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Abteilung Thermische und Optische Systeme

Freiburg, den 27. September 2004

Dipl.-Ing. Benoit Sicre
Berichtersteller

Dr. habil. Volker Wittwer
Projektleiter/ Abteilungsleiter
Thermische und Optische Systeme

Bildquellen Titelseite: (v. l. n. r.) Microgen, part of BG Group; SOLO STIRLING GmbH (oben); Whisper Tech (unten); Sulzer Hexis AG.

Vorwort

Kraftwärmekopplung ist ein Begriff aus der Stromwirtschaft. Darunter ist die gleichzeitige Umwandlung von eingesetzter Energie in mechanische oder elektrische Energie und nutzbare Wärme zu verstehen. In der Regel wird der Energieinhalt eines Brennstoffes innerhalb eines thermodynamischen Prozesses sowohl zur Strom- als auch zur Wärmeerzeugung genutzt. Nutzbare Wärmeerzeugung aus Kraftwärmekopplung liegt nur dann vor, wenn die Wärme außerhalb der KWK-Anlage für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Kälteerzeugung oder als Prozesswärme verwendet wird.

Als Mini-KWK-Anlagen werden stationäre Einrichtungen verstanden, deren elektrische Nettoleistung 15 kW nicht übersteigt.

1 Technologie- und Herstellerübersicht

Die verschiedenen Technologien für Mini-KWK-Anlagen unterscheiden sich voneinander durch das Verfahren zur Stromerzeugung. In Brennstoffzellen erfolgt sie über eine elektrochemische Reaktion in der Zelle. Der Brennstoff wird im Kontakt mit der Elektrode ionisiert und durch die Membrane in die Brennkammer transportiert. Dabei entsteht ein Elektronenfluss, der über eine elektrische Last umgeleitet werden kann. Bei den übrigen Technologien wird der Brennstoff vollständig in einer externen Brennkammer verbrannt. Die entstehende hohe Temperatur (Dampfturbine) oder der resultierende hohe Druck (Stirling) werden in kinematische/mechanische Energie und dann über einen Generator in Strom gewandelt. Die Anforderungen an die Brennstoffqualität (u.a. der Herkunft z.B. Erdgas, Biogas, Deponiegas, Holzgas) sowie die Toleranz an Verunreinigungen hängen sehr stark von der eingesetzten Technologie ab. Während die Gasaufbereitung bei Brennstoffzellen sehr aufwändig ist, können bei Stirling-Motoren theoretisch jegliche Art von Brennstoffen eingesetzt werden.

Tabelle 1: Vergleich der untersuchten KWK-Optionen (Sehr gutes Abschneiden ++, sehr schlechtes Abschneiden:-)

	PEMFC	SOFC	Stirling-Motor	Dampfturbinen
Elektrischer Wirkungsgrad	++	++	+	-
Brennstoffnutzungsgrad	+	+	++	++
Geringer Wartungsaufwand	0	0	++	++
Geringe klimarelevanten Emissionen	++	++	++	++
Niedrige Geräuschemissionen	+	+	+	+
Niedrige Investitionskosten	-	-	0	+

Tabelle 2: Übersicht Hersteller und Produkte.

Produktbezeichnung	Hersteller	Internet	El. Leistung (kW _{el})	Th. Leistung (kW _{th})
Brennstoffzellen				
Brennstoffzellen-Heizgerät BZH	Vaillant Hepworth (D)	www.vaillant.de	2,5-4,6	7
Brennstoffzellen-Hausenergiezentrale	Viessmann (D)	www.viessmann.de	2	5
Brennstoffzellen-Heizsystem	Buderus (D)	www.heiztechnik.buderus.de	2-5	6-9
Hausenergiezentrale HEZ	HGC	www.hgc-hamburg.de	3	8
k.A.	IdaTech	www.idatech.com	5	k.A.
k.A.	Osaka Gas (J)	www.osakagas.co.jp	1	k.A.
k.A.	Bosch	www.bosch.de	1	2
HXS 1000 Premiere (SOFC)	Sulzer Hexis (CH)	www.hexis.com	0,1-1	0,6-2,6 Zusatzbrenner
Stirling				
BM 1000	EPAS GmbH (D)	www.epas-gmbh.com	1	k. A.

Produkt- bezeichnung	Hersteller	Internet	El. Leistung (kW_{el})	Th. Leistung (kW_{th})
MCT 1-100	Mayer & Cie (D)	www.mayercie.de	1-3	6-15
WhisperGen	Whispertech (NZ)	www.whispergen.com	1,2	8
MicroGen Appliance	Microgen (UK)	http://www.microgen.com	1,1	5-24 oder 36
SOLO STIRLING 161 microKWK- Modul	Solo Stirling GmbH (D)	www.stirling-engine.de	2-9	8-24
Sunmachine	Sunmachine mbH (D)	www.sunmachine.de	2	ca. 5
ORC Maschinen				
Inergen	Energetix microPower (UK)	Simon Redford (Tel: +44-151- 348-2114)	2,5	33
Cogen Micro	Cogen Micro (AU)	www.cogenmicro.com	2,5	12
SteamCell	Enginion (D)	www.enginion.com	0,5-6	2-25
Dampfschraubenmotor				
Climate Energy	Yankee scientific (USA)	www.yankeescientific.com	1 bis 10	10 bis 100

2 Modellbildung und Simulation

2.1 Anlagenkonzepte für die Haustechnik

Das im Projekt untersuchte Versorgungsprinzip beruht auf dem Konzept der zentralen Wärmeerzeugung und -speicherung (vgl. Abbildung 1). Abhängig vom Raumwärmebedarf erfolgt die Wärmeverteilung über Heizflächen oder vorgewärmte Zuluft. Die Erwärmung des Trinkwassers erfolgt über einen externen Wärmetauscher. Das Heizgerät (Gaskessel als Referenzfall oder Mini-KWK-Anlage) speist die Wärme in den Schichtenspeicher ein. Optional wird auch eine thermische Solaranlage betrieben.

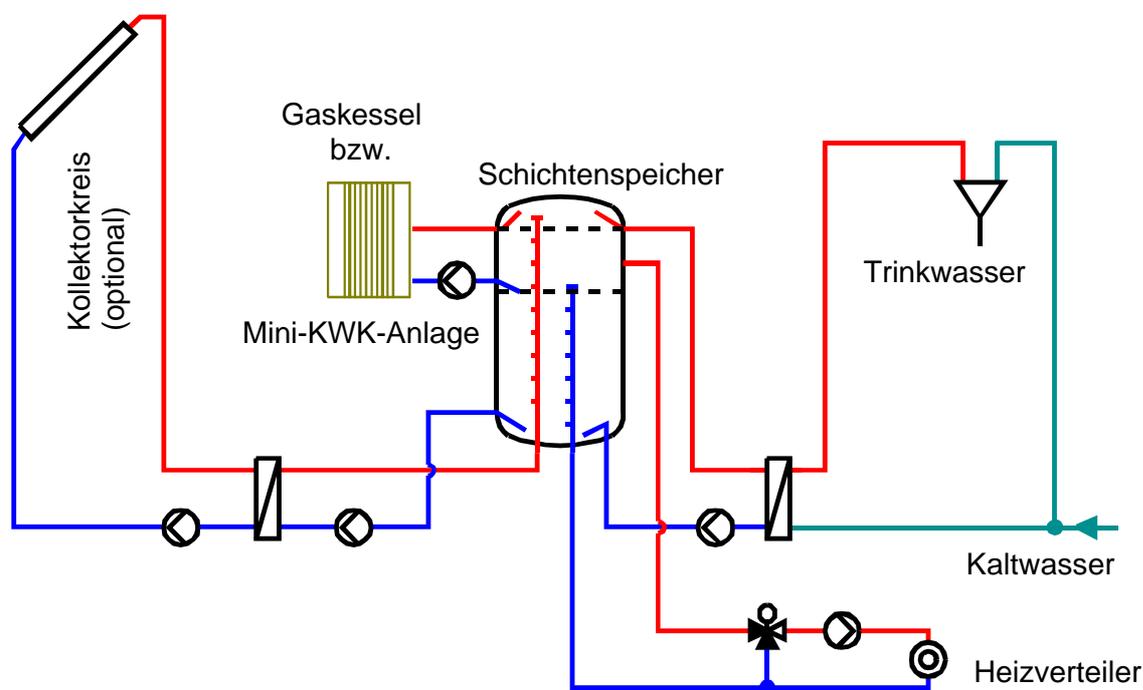


Abbildung 1: Prinzipschema der Haustechnikanlage

2.2 Randbedingungen für die Simulation

Den vorliegenden Simulationsberechnungen liegen die Annahmen für einen Haushalt mit 5 Personen mit einem Jahresstromverbrauch von 5,5 MWh zu Grunde. Der Warmwasserbedarf hängt in der Regel bei Wohngebäuden von der Anzahl der Personen ab. Grundlage zur Generierung des detaillierten Warmwasserprofils ist die Vorgabe der von Mack in [Mack et al. 1996] veröffentlichten Profile. Zur Realisierung eines genaueren Profils (Auflösung in Stunden) wird zusätzlich ein vom zentral-schweizerischen Technikum in Luzern bereitgestelltes Profil eingesetzt. Im Jahresschnitt ergibt sich somit ein Warmwasserverbrauch von ca. 25 Litern pro Tag und pro Person, bei einem Temperaturniveau von 60 °C. Ebenso wird das Kaltwasserprofil von Mack übernommen. Hierbei schwankt die Kaltwassertemperatur zwischen ca. 5 °C (Winter) und ca. 16 °C (Sommer).

Für die Berechnung der Bezugsgrößen wurden drei repräsentative Gebäude mit unterschiedlichen Heizlasten ausgewählt. Es handelt sich dabei um zwei freistehende Einfamilienhäuser und ein Reihenhaus. Bei den zwei ersten Gebäuden handelt es sich um ein unsaniertes Bestandshaus (BH) mit ca. 184 m² Energiebezugsfläche und einem Heizwärmebedarf von 219 kWh/(m²a) und um ein Niedrigenergiehaus (NEH) mit ebenfalls 184 m² Wohnfläche, jedoch mit einem Raumwärmebedarf von 78 kWh/(m²a).

Für das BH und für das NEH wurden aufgrund des im Verhältnis zu den Erzeugungsverlusten hohen Raumwärmebedarfs Heizlast-Profile aus [Krewitt et al. 2004] genutzt. Zur Berechnung des Raumwärmebedarfes für das Passivhaus-Reihengebäude (PH) wird nicht ein Lastprofil eingelesen, sondern ein Gebäudemodell entsprechend realer Vorgaben parametrisiert, so dass eine dynamische, thermische Kopplung zwischen Anlage und Gebäude in Abhängigkeit von den Klimabedingungen stattfindet. Zur Vorlage dient das in [Bühning 2001] in TRNSYS modellierte Reihemittelhaus mit 118,6 m² Energiebezugsfläche. Laut Passivhaus-Projektierungspaket hat das Haus einen rechnerischen Heizwärmebedarf von ca. 9 kWh/(m²a).

2.3 Anlagenmodelle

2.3.1 Das SOFC-Brennstoffzellen-Heizgerät

Die oxidkeramische Brennstoffzelle SOFC gehört aufgrund ihres Temperaturbereichs zwischen 800 und 1000 °C zur Kategorie der Hochtemperatur-Brennstoffzellen. In diesem Temperaturbereich wird der feste Elektrolyt für die Sauerstoffionen leitfähig. Beim Einsatz von Erdgas wird der Wasserstoff aus der Reformierung von Kohlenwasserstoffen und der Oxydation von Kohlenmonoxid durch Wasserdampf gewonnen.

Das Prinzip eines SOFC-Brennstoffzellen-Heizgerätes beruht auf den beiden Edukten Luft und Erdgas, die durch die Abwärme des Abgases auf Betriebstemperatur aufgewärmt werden müssen, bevor sie in die Zellen eingeführt werden. Wasserdampf wird aus der Rezirkulation eines Teils des Abgases genutzt. Um die elektrochemisch nicht umgesetzten Brennstoffe vollständig zu nutzen, wird das Abgas einem Nachbrenner zugeführt und dort vollständig verbrannt. Das Verbrennungsabgas wird anschließend durch einen Rekuperator zur Erwärmung des Heizungswassers geleitet. Um bei Brennstoffzellen-Heizgeräten von dem Brennwerteffekt Gebrauch zu machen, wird von einer Austrittstemperatur von ca. 50 °C ausgegangen, ähnlich einem herkömmlichen Brennwert-Gaskessel.

Das im Rahmen der vorliegenden Studie verwendete SOFC-Modell basiert auf dynamischen Kennlinien nach [Erdmann 2002]. Außerdem wurde ein Algorithmus für den Hot-Stand-By-Modus sowie ein Regelalgorithmus für die Einhaltung der Temperatur im Warmwasserspeicher entwickelt (vgl. [Sicre 2004a]).

2.3.2 Die Stirling-Mini- KWK-Anlage

Die Stirling-Maschine arbeitet nach dem thermodynamischen Prinzip, dass aufgrund von Wärmezufuhr und -abfuhr, durch eine zyklische Expansion und Verdichtung eines Arbeitsgases, eine nutzbare Arbeit verrichtet wird. Die Hauptkomponenten der α -Typ-Maschine sind zwei Zylinder und deren Kolben, der Erhitzer und der Kühler. Zwischen den beiden Wärmeübertragern sitzt der Rekuperator, ein poröser Raum, durch den das Arbeitsgas hin und her strömt und dabei Wärme aufnimmt bzw. abgibt, um die thermische Effizienz des Zyklus zu erhöhen. Die Verdränger- (im Kompressionsraum) und Arbeitskolben (im Expansionsraum) sind durch eine Schubstange mit einer Kurbelwelle im 90°-Winkel verbunden und arbeiten gegenläufig. Die Kurbelwelle ist mit einem synchronen bzw. asynchronen Stromgenerator verbunden.

Das im Rahmen der vorliegenden Studie verwendete Stirling-KWK-Modell basiert auf dynamischen Kennlinien nach [Sicre u. Henckes 2003].

2.3.3 BZ-BHKW auf PEM-Basis

Für die Untersuchung von Regelstrategien wurde ein erdgasbetriebenes netzgekoppeltes Brennstoffzellen-BHKW auf PEM-Basis mit dynamischen Modellen beschrieben. Im einzelnen umfasst die Bibliothek Modelle für den Dampfreformer, die Shift-Stufe, die Selox-Stufe, die Wärmetauscher, den Brennstoffzellen-Stack, den Wechselrichter, die Aggregate und die Regler (vgl. [Vetter u. Wittwer 2003] und [Vetter 2004]). Diese Modelle wurden anhand von zur Verfügung stehenden Messdaten validiert (vgl. Abbildung 2).

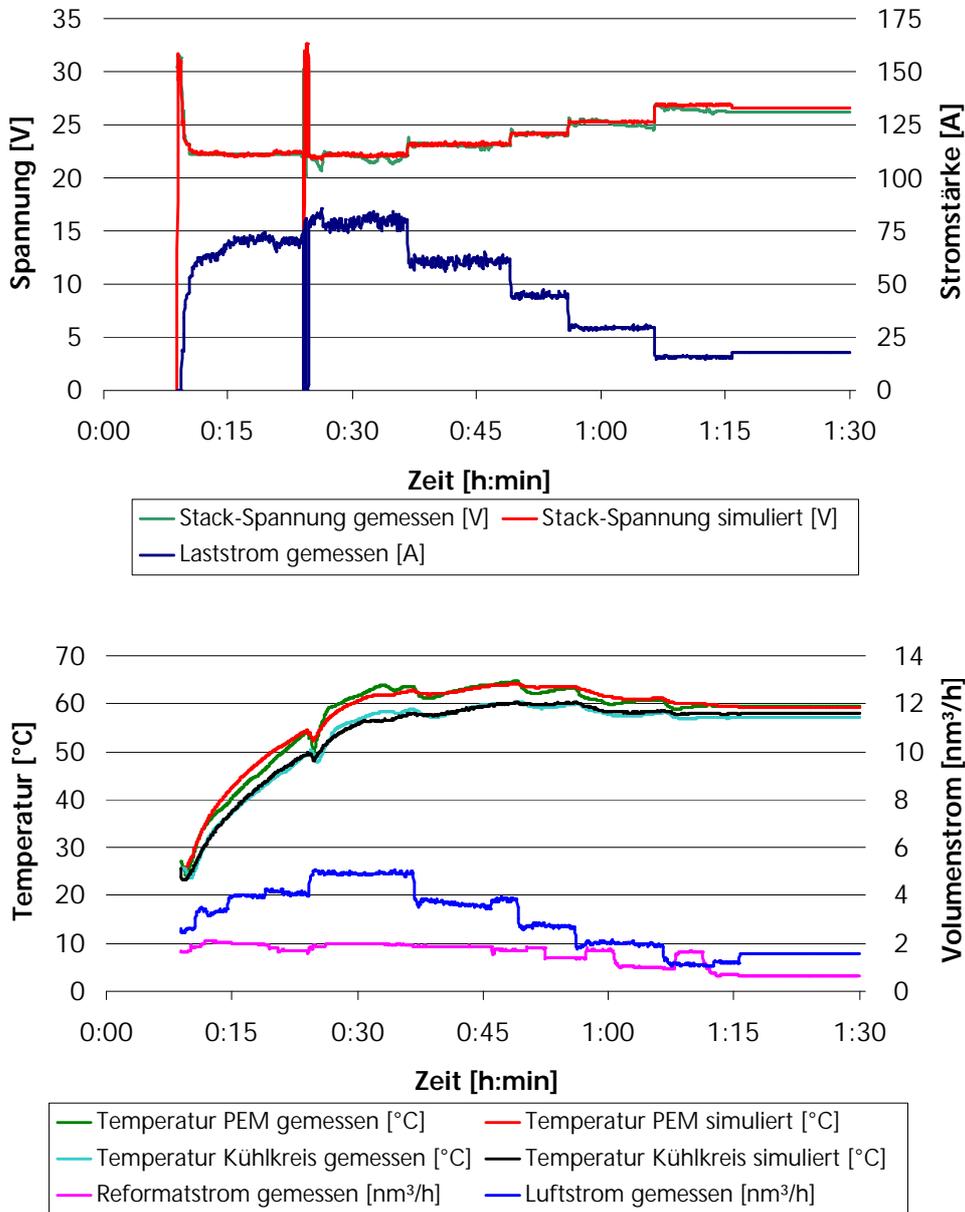


Abbildung 2: Dynamisches Verhalten eines PEM-Brennstoffzellen-Stacks. Für den Vergleich der Simulation mit der Messung dienen der Laststrom und die Volumenströme (nm³: Normkubikmeter) der einzelnen Medien (Reformat, Luft, Fluid des Kühlkreises, ca. 2 l/min) als Eingangsgrößen. Ausgangsgrößen sind die Stack-Spannung und die Temperaturen des Brennstoffzellen-Stacks beziehungsweise des Kühlkreises (vgl. [Vetter 2004]).

3 Betriebsführungskonzepte

Für die Energieversorgung eines Gebäudes auf Basis eines Brennstoffzellen-BHKWs und eines Schichtspeichers mit integriertem Gasbrenner wird ein Regelungskonzept benötigt, das einerseits die Versorgungssicherheit gewährleistet und andererseits die Anlagenkomponenten vor unzulässigen Betriebszuständen schützt. Die dazu entwickelte Regelungshierarchie besteht aus vier Ebenen (vgl. [Vetter 2004]). Im Folgenden wird die oberste Ebene dieses Konzeptes, die sogenannte Betriebsführung, erläutert.

3.1 Betriebsführung

Neben den Betriebsführungsarten „stromgeführt“ und „wärmegeführt“ werden zwei optimierte Regelstrategien untersucht, die einerseits die Betriebskosten und andererseits den Primärenergiebedarf minimieren (vgl. [Vetter 2004]).

1. Stromgeführter Betrieb

Abhängig von dem Speicherzustand und den Lastgrenzen des Brennstoffzellen-BHKWs (Teillastgrenze und Nennbetriebspunkt) wird dem aktuellen Strombedarf des Gebäudes gefolgt.

2. Wärmegeführter Betrieb

Bei Wärmebedarf wird das Brennstoffzellen-BHKW zugeschaltet und erst nach Überschreiten der Mindesttemperatur um eine definierte Schalthysterese wieder deaktiviert.

3. Betriebskosten-optimierte Regelstrategie

Auf Basis von Lastprognosen wird der Arbeitspunkt des Brennstoffzellen-BHKWs ermittelt, der für ein definiertes Zeitintervall die geringsten Betriebskosten verursacht. Berücksichtigt sind dabei die Energiebezugskosten, die Einspeisevergütung und die spezifischen Wartungskosten.

4. Primärenergie-optimierte Regelstrategie

Auf Basis von Lastprognosen wird derjenige Arbeitspunkt des Brennstoffzellen-BHKWs ermittelt, der für ein definiertes Zeitintervall den geringsten Primärenergiebedarf aufweist. Berücksichtigt werden dabei der Erdgasbedarf des BZ-BHKWs, der Erdgasbedarf des Gasbrenners, der Strombezug (gewichtet mit dem Wirkungsgrad des Strommixes) und die primärenergetische Gutschrift für die ins Netz eingespeiste elektrische Energie (ebenfalls gewichtet mit dem Wirkungsgrad des Strommixes).

3.2 Energetischer Vergleich der Technologien

In der Abbildung 3 wurde der Primärenergieverbrauch der verschiedenen Mini-KWK-Anlagen am Beispiel der Versorgungsaufgabe *saniertes Haus NEH* gegenübergestellt. Die Anlagen wurden gemäß der Wärmeanforderungen des Versorgungsobjekts betrieben. Für die PEM-Anlage sind darüber hinaus die Ergebnisse einer Primärenergie-optimierten Regelstrategie aufgetragen. Die Abbildung veranschaulicht die Rolle der Betriebsbereitschaft des Erzeugers und ggf. des Standby-Verbrauchs. Trotz eines deutlich höheren elektrischen Wirkungsgrades erreichen die Brennstoffzellen keine nennenswerte Primärenergieeinsparung gegenüber Stirling-Motoren, die sich durch eine sehr kurze Anfahrzeit auszeichnen. Die spezifischen Parameter (Dynamik, Wirkungsgrade in Teillast, Regelung, etc.) sind in [Sicre 2004a] und [Vetter 2004] beschrieben.

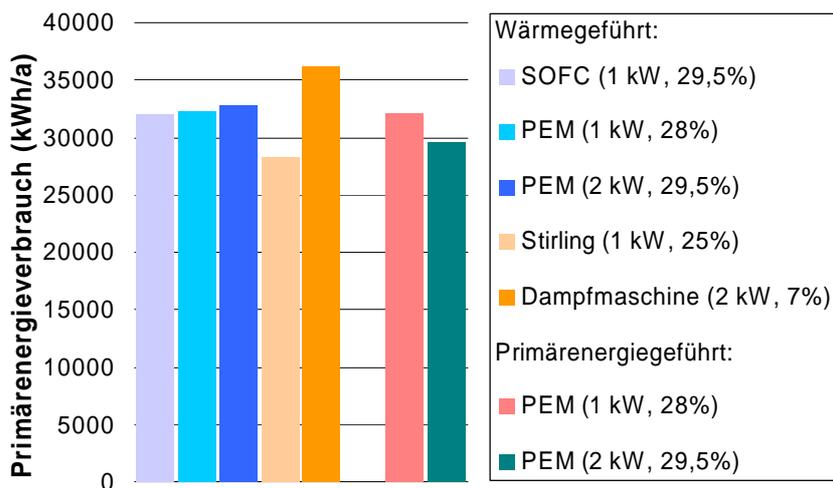


Abbildung 3: Technologievergleich zwischen verschiedenen Mini-KWK-Anlagen am Beispiel des sanierten Gebäudes NEH. Die Anlagen werden wärmegeführt betrieben. Zusätzlich sind für das Brennstoffzellen-BHKW auf PEM-Basis die Ergebnisse der Primärenergie-optimierten Regelstrategie dargestellt. In Klammern sind die elektrische Nennleistung und der elektrische Wirkungsgrad im Nenn-Arbeitspunkt angegeben. Die Anfahrzeit des Stirling beträgt ca. 1 Minute.

Das Dilemma: Mini-KWK vs. Energieeffizienz im Gebäude

Die in der Energie-Einsparverordnung (EnEV) vorgeschriebenen Primärenergie-Höchstwerte für die Wärmebereitstellung können durch zwei verschiedene Maßnahmen eingehalten werden: einerseits durch Effizienz der Versorgungsanlage, andererseits durch die Effizienz der thermischen Gebäudehülle. Aufgrund des derzeitigen schlechten Stromerzeugungswirkungsgrads des deutschen Strommixes und der entsprechend hoch angesiedelten Primärenergie-Gutschrift¹ genießen die Mini-KWK-Anlagen ein vergleichsweise hohes Potenzial zur Primärenergie-Einsparung, trotz des Verbrauchs von fossilen Energieträgern. Ein ähnliches Ergebnis könnte durch Senkung des Raumwärmebedarfs im Gebäude durch zusätzliche Dämmungs- und Wärmerückgewinnungsmaßnahmen erzielt werden. Dies erfolgt jedoch ohne Einsatz von fossilen Brennstoffen. Diese Fragestellung wurde untersucht, indem der Primärenergie-Aufwand eines Passivhauses² mit einem Lüftungs-Kompaktgerät (bestehend aus einer Wärmerückgewinnungsanlage und einer Abluft-Wärmepumpe) dem Primärenergie-Verbrauch des gleichen Hauses, jedoch ohne Wärmerückgewinnungsanlage³ aber mit einer Mini-KWK-Anlage, rechnerisch gegenübergestellt wurde. Der Warmwasser- und Strombedarf blieb in beiden Fällen gleich hoch. Die Simulationsergebnisse belegen, dass trotz erhöhtem Strombezug durch den Betrieb der Wärmepumpe, durchaus der Primärenergieverbrauch mittels Wärmeschutzmaßnahmen gegenüber Haustechnikanlagen auf Basis von Mini-KWK-Anlagen deutlich gesenkt werden kann (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Gegenüberstellung von Wärmeschutzmaßnahmen und Anlageneffizienz.

Raumwärmebedarf (kWh/(m ² a))	Elektrische Wärmepumpe	Mini-KWK- Anlage ⁴	Primärenergieverbrauch für Strom und Wärme (kWh/a)
ca. 15	Ja	Nein	18.200
ca. 30	Nein	Ja	19.976

¹ aufgrund der gleichzeitigen Stromerzeugung

² mit einem Raumwärmebedarf um 15 kWh/(m²a)

³ aufgrund des Wegfalls der Wärmerückgewinnungsanlage liegt der Raumwärmebedarf bei ca. 30 kWh/(m²a) (vgl. Randbedingungen in [Ullah u. Sicre 2004])

⁴ Ergebnisse bezogen auf eine SOFC-Anlage, die als durchschnittlich gute Mini-KWK-Anlage interpretiert werden kann.

3.3 Kostenbenchmark

Unter marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten ist eine neue Technik konkurrenzfähig, wenn deren Vollkosten nicht höher sind, als die einer bereits auf dem Markt etablierten Technik. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt Preisangaben für die im Rahmen dieses Berichtes untersuchten Mini-KWK-Anlagen nicht vorliegen, und Abschätzungen seitens der Hersteller stark schwanken, wird die Methode der anlegbaren Kosten herangezogen, die im Vergleich zu einer alternativen Technologie⁵ maximal zulässigen Preise im Sinne von wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit angibt (Bottom-up Verfahren).

Die Tabelle 4 zeigt die Berechnung der Vollkosten (Summe der Investitions- und Betriebskosten) für das Versorgungsobjekt „saniertes Haus“ auf der Basis der wichtigsten Kenngrößen des Strom- und Wärmebedarfs. Die Wärmeübergabe an die Räume erfolgt über Heizkörper (Gesamtleistung von 12 kW). Der Kostenberechnung liegen die Annahmen aus [Krewitt et al. 2004] zu Grunde. Die Vollkostenrechnung erfolgt unter der Annahme einer Neuinstallation eines Heizungssystems. Die Preisannahmen orientieren sich an den Angaben von Hesse [Hesse 1997], wo die unterschiedlichen Versorgungsanlagen in Teilkomponenten zerlegt und die Investitionen in verschiedene Anlagenteile untergliedert sind. Die Investitionskosten der einzelnen Anlagenteile werden aus Herstellerangaben bestimmt. Da für die überschlägige Untersuchung keine ausführliche Planung der einzelnen Systeme an einem konkreten Gebäude durchgeführt wurde, werden Leitungslängen und -querschnitte, Heizkörpergrößen und andere Anlagenteile anhand des Wärmebedarfs, des Warmwasserbedarfs, des Luftvolumenstroms sowie der Gebäudeanforderungen abgeschätzt. Die Investitions- und Betriebskosten sowie die Erlöse werden in jährliche Bruttokosten umgerechnet.

Alle aufgeführten Kosten beziehen sich auf Preise für das Jahr 2000. Die Preise für Investitionen beinhalten ebenfalls die Installation.

Für die Wartungskosten des Stirlingmotors sind 1,5% angesetzt. Die übrige Wartung wird nach Angaben von Hesse berechnet. Es gilt ein Zinssatz von 8% pro Jahr. Hierbei handelt es sich um einen auf langfristige Sicht angesetzten durchschnittlichen Zinswert.

Für den Brennwertkessel werden angesichts der derzeitigen Preise auf dem Heizungsmarkt 3540 EUR für 15 kW_{th} angesetzt.

⁵ In dieser Studie ein Brennwertkessel, da es momentan auf dem Markt kein Gasmotor-BHKW passender Leistung gibt.

Aus vergleichbaren Jahres-Vollkosten ergeben sich für den Stirlingmotor mit einer Leistung von 1 kW_{el} anlegbare Kosten von ca. 3140 EUR/kW_{el} (mit Solaranlage) bzw. 3330 EUR/kW_{el} (ohne Solaranlage). Die Preise ohne Solaranlage liegen höher als diejenigen mit Solaranlage, da der Mehrerlös aus der Stromproduktion die Verbrauchsminderung an Erdgas dank Solarwärme übersteigt. Die PEM-Anlage besitzt deutlich niedrigere anlegbare Investitionskosten. Zwar deckt sie den Eigenstromverbrauch des Haushaltes besser ab, verbraucht jedoch gegenüber dem Stirlingmotor viel mehr Erdgas. Der Erlös aus der Stromeinspeisung reicht nicht aus die erhöhte Erdgas-Rechnung auszugleichen. Darüber hinaus wurde ein Austausch des Brennstoffzellenstacks (20% der Investitionskosten) angesetzt. Entsprechend hohe Instandhaltungskosten sind bei dem Stirlingmotor nicht zu erwarten.

Tabelle 4: Mini-KWK-Anlagen im Vergleich zum Brennwärtekessel - Anlegbare Investitionskosten am Beispiel der Versorgungsaufgabe des sanierten Hauses (mS: mit thermischer Solaranlage, oS: ohne Solaranlage)

Gebäude	Saniertes Haus					
	BWK 15 kWth		Stirling 1 kW		PEM 1 kW	
El. Nennleistung	mS	oS	mS	oS	mS	oS
Erdgasverbrauch (MWh/a)	16.5	17.9	20.0	22.0	26.9	29.9
Strombezug (kWh/a)	5500	5500	2558	2327	1876	1538
Stromeinspeisung (kWh/a)			629	758	1431	1769
Strom						
Erlös aus Stromeinspeisung (EUR/a)			50	61	114	142
Brennstoffe						
Brennstoffkosten (EUR/a)	678	734	819	903	1103	1226
Rückerstattung Mineralölsteuer (EUR/a)			79	87	106	118
Investitionskosten						
BWK (Annuität) (EUR/a)	413	413	370	370	370	370
Gasanschluss (Annuität) (EUR/a)	164	164	164	164	164	164
Abgasanlage für BWK/BZH (Annuität) (EUR/a)	107	107	107	107	107	107
Wärmeverteilung für NEH (Annuität) (EUR/a)	508	508	508	508	508	508
Wärmespeicher (Annuität) (EUR/a)	187	187	255	255	255	255
Solaranlage (Annuität) (EUR)	458		458		458	
Summe Kapitalkosten (Annuität) (EUR/a)	1837	1378	1861	1403	1861	1403
Betriebskosten						
Übrige Wartung (Variable)	179	134	180	135	180	135
Kostenbilanz						
Gesamtkosten (EUR/a)	3537	3089	3252	2797	3432	3000
Gesamterlös (EUR/a)	0	0	129	147	220	259
Jahres-Vollkosten (EUR/a)	3537	3089	3123	2650	3211	2740
Differenz Jahres-Vollkosten (EUR/a)			413	439	325	349
Jährliche Wartung Stirling 1.50%			47	50		
Jährliche Wartung PEM-BZ 5.00%					98	104
Gesamtkosten Mini-KWK (inkl. Stackersatz im Fall BZ) (EUR)			3137	3331	1952	2089
Anlegb. Investitionskosten Mini-KWK (EUR/kW_{el})			3137	3331	1626	1741

4 Zentrale Steuerung dezentraler Mini-KWK-Anlagen

Das Niederspannungsnetz der Zukunft wird neben Mini-KWK-Anlagen eine Vielzahl weiterer dezentraler Erzeuger besitzen. Zur optimierten Betriebsweise

dieser Erzeuger sind geeignete Steuermechanismen notwendig, die neben dem Primärenergieaufwand auch die Betriebskosten dieser Versorgungsstruktur berücksichtigen. Prinzipiell muss dabei zwischen steuerbaren und nicht-steuerbaren Erzeugern unterschieden werden.

1. Steuerbare Erzeuger

Zu dieser Kategorie zählen KWK-Anlagen, Biomasse-Anlagen und für den Bilanzraum „Niederspannungsnetz“ auch der Transformator zur Mittelspannungsebene.

2. Nicht-steuerbare Erzeuger

Photovoltaikanlagen, Windgeneratoren, und kleine Laufwasserkraftwerke sind nicht-steuerbare Komponenten, deren Einspeisung ins Niederspannungsnetz fluktuiert. Die momentan eingespeiste elektrische Energiemenge muss bei der optimierten Betriebsführung der steuerbaren Komponenten berücksichtigt werden.

4.1 Strombörse im Niederspannungsnetz

Für den optimierten Betrieb der dezentralen Erzeugungseinheiten wird ein Strombörsenmodell im Niederspannungsnetz eingeführt. In diesem Ansatz erstellen die steuerbaren erzeugenden Komponenten ein Angebot für die eingespeiste elektrische Energie. Die zentrale Steuereinheit erfasst die einzelnen Angebote, ermittelt einen „virtuellen“ Strompreis als Mechanismus zur Betriebsoptimierung und erteilt den steuerbaren Komponenten Erzeugungsquoten für das nächste Zeitintervall mit einer Dauer von 15 Minuten.

4.1.1 Kommunikation

Für die Realisierung der Strombörse werden lokale Regeleinheiten benötigt, die mit der übergeordneten zentralen Steuerung vernetzt sind (vgl. Abbildung 4). Die übertragenen Informationen umfassen Kostenfunktionen, momentane regenerative Einspeisungswerte, Verbrauchswerte und Zuteilungsquoten für die steuerbaren Erzeuger. Der Transformator kann aus der Sichtweise der Niederspannungsebene als Erzeuger und als Verbraucher agieren.

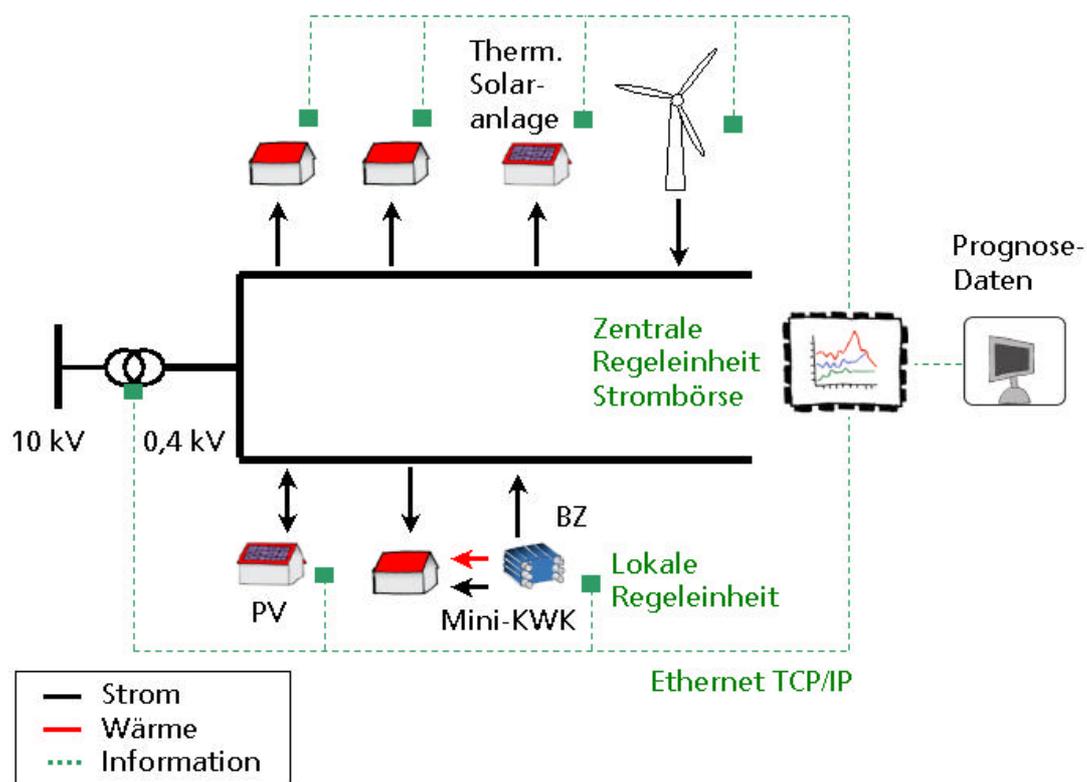


Abbildung 4: Kommunikation im Niederspannungsnetz. Die einzelnen Komponenten sind mit der zentralen Regeleinheit vernetzt. Der zentralen Regeleinheit (Strombörse) werden die Kostenfunktionen der steuerbaren Erzeuger (KWK, Trafo) und die momentanen Leistungen der nicht-steuerbaren Komponenten (PV, Wind) übermittelt. Entsprechend den Angebots- und Nachfragewerten werden den steuerbaren Erzeugern Quoten zugeteilt.

4.1.2 Kostenfunktionen

Der elektrische Heizstab zur Nacherwärmung und die Wärmepumpe werden im Simulationsmodell als steuerbare elektrische Verbraucher, die KWK-Anlage als steuerbarer elektrischer Erzeuger behandelt. Diese Komponenten ermitteln in Abhängigkeit ihrer Betriebskosten und des Wärmeinhalts der Speicher eine Angebots- bzw. Nachfragefunktion (Wärmepumpe, elektrischer Heizstab). Auf die Herleitung und Definition der einzelnen Betriebskostenfunktionen wird hier verzichtet. Entsprechende Hinweise und Quellen zu der verwendeten Formel sind in [Vogel 2003] zu finden.

Exemplarisch für die Kostenfunktionen wird im Folgenden die Gleichung für die KWK-Anlagen näher erläutert:

Gleichung 1: Berechnung der effektiven Betriebskosten der KWK-Anlage im Niederspannungsnetz.

$$k_{\text{KWK}} = \frac{k_{\text{Brennstoff}}}{P_{\text{el}}} + k_{\text{Wartung, spez}} - e_{\text{Einspeisevergütung}} - \frac{e_{\text{Wärmevergütung}}}{S_{\text{KWK}}(P_{\text{el}})} \left[\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}_{\text{el}}} \right]$$

Als Betriebskosten fallen bei der KWK-Anlage Brennstoffkosten $k_{\text{Brennstoff}}$ und Wartungskosten pro erzeugter elektrischer Energieeinheit $k_{\text{Wartung, Energie}}$ an. Die KWK kann durch das lokale thermische Netz eine Wärmevergütung $e_{\text{Wärmevergütung}}$ (z.B. im Fall des Contractings) und einen gesetzlichen, beziehungsweise vom örtlichen Stromversorger bezogenen Zuschlag $e_{\text{Einspeisevergütung}}$ als Ertrag verbuchen.

Fällt die Speichertemperatur unter ein definiertes Minimum, so muss das Brennstoffzellen-BHKW unabhängig von den anfallenden Kosten im Nennarbeitspunkt betrieben werden. Dieser Betriebsmodus wird als Wärmeführung bezeichnet.

4.2 Untersuchungen im Niederspannungsnetz

Für die Untersuchung der Mini-KWK-Anlagen im Niederspannungsnetz wurde eine Konfiguration gewählt, wie sie zukünftig in einer dezentralen Versorgungsstruktur realisiert werden könnte (vgl. Tabelle 5). Neben den Mini-KWK-Anlagen werden in diesem Szenario auch Photovoltaik- und Windkraftanlagen berücksichtigt.

Tabelle 5: Netzkonfiguration des untersuchten Niederspannungsnetzes.

	Mögliche Netzabdeckung	Anzahl	Leistung pro Einheit	Leistung gesamt
Transformator	~100 %	1	630 kW	630 kW
Mini-KWK	~30 %	63	2 kW	126 kW
Photovoltaik	~10 %	12	5 kW	60 kW
Windgenerator	~10 %	1	60 kW	60 kW

4.3 Simulationsergebnisse

Für die beschriebene Netzkonfiguration wurden Jahressimulationen durchgeführt. Als Steuerungselement wird dabei die in [Vogel 2004] beschriebene Strombörse mit den Randbedingungen aus Tabelle 6 eingesetzt.

Tabelle 6: Randbedingungen für die Mini-KWK-Anlagen im Niederspannungsnetz. Unter Netzgebühren ist die Differenz zwischen Bezugspreis und Einspeisevergütung zu verstehen. Für die Wartungskosten und die Netzgebühren wurde eine Parametervariation durchgeführt.

Brennstoffkosten [Cent/kWh]	Spezifische Wartungskosten [Cent/kWh]	Einspeisevergütung [Cent/kWh]	Wärmevergütung [Cent/kWh]	Netzgebühren [Cent/kWh]
4,41	1..1,5 ..2,00	5,11	4,6	1..3..5

In Abbildung 5 ist exemplarisch der Verlauf des Strompreises im Januar und im Juli dargestellt. Aus dem Vergleich der beiden Monate wird deutlich, dass die effektiven Betriebskosten der KWK-Anlage in den Sommermonaten höher sind. Zu erklären ist dieser Effekt durch den niedrigeren Wärmebedarf im Sommer und der damit verbundenen niedrigeren durchschnittlichen Wärmevergütung.

In Abbildung 6 sind die durchschnittlichen monatlichen Erzeugerleistungen und der Lastgang der Verbraucher im Niederspannungsnetz dargestellt. Durch den hohen Anteil von KWK-Anlagen (ca. 30% der Transformatoranschluss-Leistung) erfolgt eine Rückspeisung von elektrischer Energie vom Niederspannungsnetz in die Mittelspannungsebene. Für die Deckung von Lastspitzen muss hingegen elektrische Energie vom Mittelspannungsnetz bezogen werden.

Die KWK-Anlagen sind in der gewählten Konfiguration ausschließlich in unsanierten Gebäuden eingesetzt (vgl. [Vogel 2004]). In diesen Versorgungsobjekten erreichen die Systeme durch die zentrale Steuerung mittels Strombörse eine Auslastung von 84%, der Mehrverbrauch an Primärenergie gegenüber der Primärenergie-optimierten Regelstrategie aus [Vetter 2004] beträgt nur ca. 2%. Wird die gleiche Anlage jedoch im sanierten Gebäude eingesetzt, so steigt der Primärenergieverbrauch durch die Strombörsen-Steuerung um 7,5% gegenüber dem Wert mit Primärenergie-optimierter Regelstrategie an.

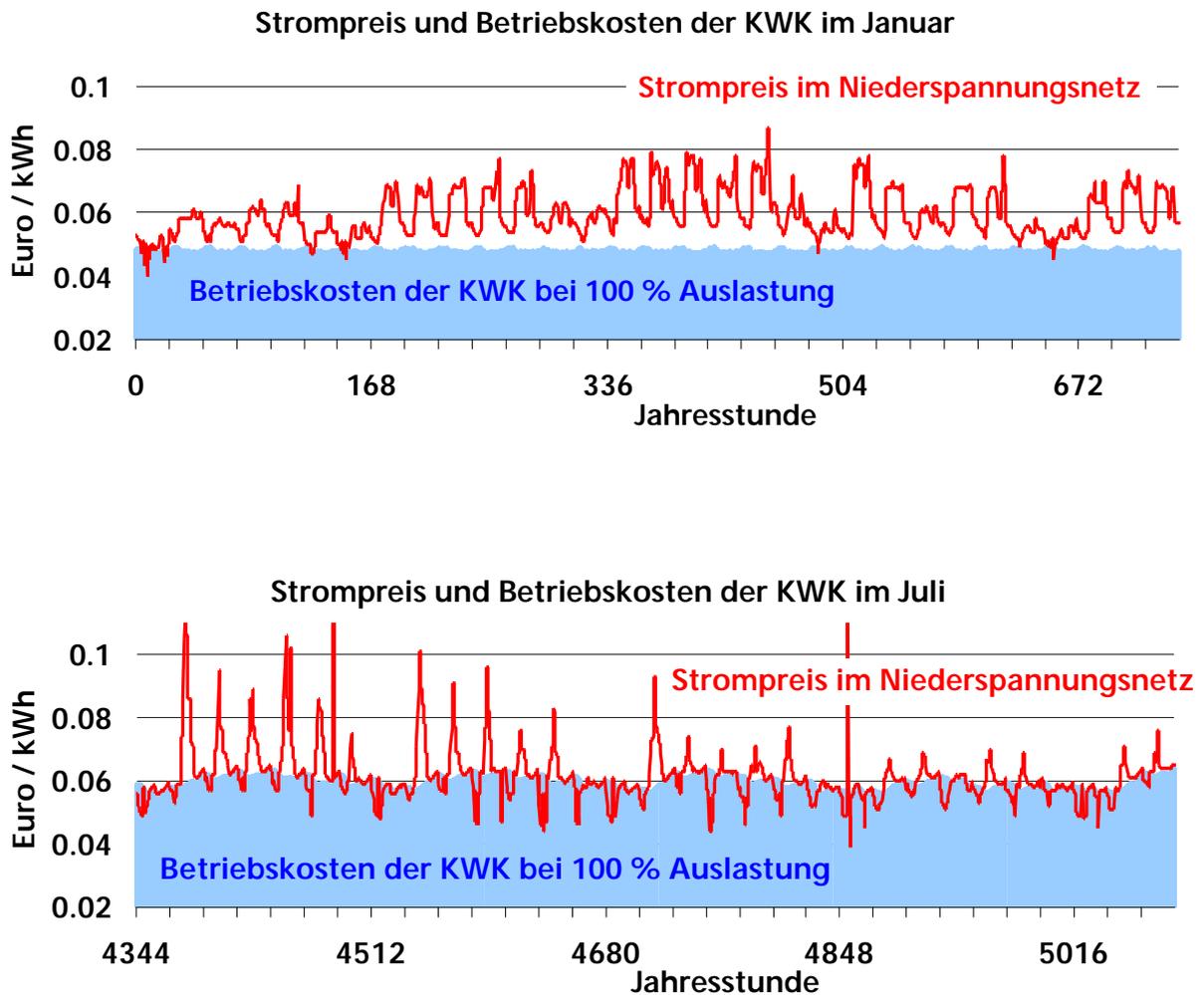


Abbildung 5: Verlauf des Strompreises im Niederspannungsnetz nach Gleichung 1 (als Mechanismus zur Betriebsführungsoptimierung) und der Betriebskosten der KWK-Anlage im Nennbetriebspunkt im Januar und Juli, berechnet für die Randbedingungen aus Tabelle 6, wobei exemplarisch für die spezifischen Wartungskosten 2 Cent/kWh_e und für die Netzgebühren 1 Cent/kWh_e angesetzt sind. Im Januar liegen die effektiven Betriebskosten nach Gleichung 1 nahezu immer unter der Einspeisevergütung (Strompreis), die KWK-Anlagen können somit wirtschaftlich betrieben werden. Im Juli steigen die effektiven Betriebskosten aufgrund der niedrigeren Wärmelasten und der damit verbundenen niedrigeren Wärmevergütung an. Die KWK-Anlagen können in diesem Zeitraum folglich nicht immer kostendeckend elektrische Energie ins Netz einspeisen [Vogel 2004].

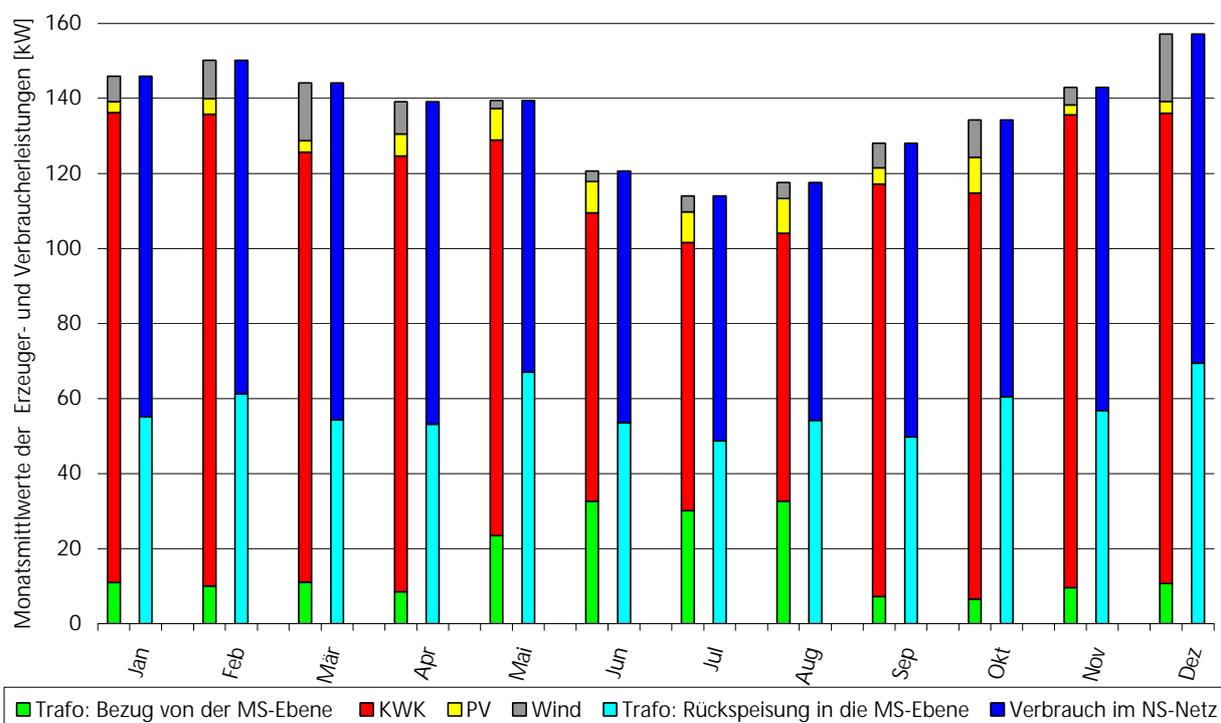


Abbildung 6: Durchschnittliche monatliche Erzeuger- und Verbraucherleistung des untersuchten Niederspannungsnetzes. Aufgrund des hohen Anteils von KWK-Anlagen eingesetzt in unsanierten Gebäuden, wird elektrische Energie in die Mittelspannungsebene rückgespeist. Zur Deckung von Spitzen im Niederspannungsnetz muss jedoch Strom von der Mittelspannungsebene bezogen werden.

5 Entwurf eines Entwicklungsfeldes für Mini-KWK-Anlagen

Ziel des Entwicklungsfeldes für Mini-KWK-Anlagen ist es, den Herstellern eine entwicklungsbegleitende Mess- und Prüfleistung anzubieten. Die Besonderheit beruht auf der Kopplung der Messeinrichtung mit einer parallel laufenden Gebäude- und Anlagensimulation. Damit kann das Zusammenwirken mit dem vom Gerät wiederum beeinflussten - Gebäudeverhalten bei unterschiedlichen Klimabedingungen, Energieerträgen regenerativer Anlagenkomponenten und Einflussnahmen der Gebäudenutzer durch eine entsprechende Aktorik dem untersuchten Gerät aufgeprägt werden. Hieraus ergeben sich wesentliche Anhaltspunkte zur Optimierung der Geräte. Damit können sowohl Antworten auf Lastwechsel, als auch die Funktion der Sicherheitsorgane unter realen Betriebsbedingungen überprüft werden. Durch die Reproduzierbarkeit des

Prüfablaufs können Änderungen an den Geräten exakt mit dem vorherigen Zustand verglichen werden.

Dafür wurde ein Konzept mit frei in Temperatur, Massenstrom und Druckverlust konditionierten Wasserströmungen (Kaltwasserzufluss, Brauchwasserzapfung, Zirkulation, Heiznetz) und Brennluft-Strömungen (Außenluft oder Heizraumluft) für den Teststand entworfen. Hierfür sind Heizer, Befeuchter und motorisch verstellbare Drosseln in den Luftstrecken, beheizbare und kühlbare Wasserspeicher, Durchlauferhitzer und motorisch verstellbare Drosseln in den Wasserleitungen sowie externe Ventilatoren und Pumpen sowie eine Mischbatterie zur Synthese von Brenngasen unterschiedlicher Zusammensetzung notwendig. Ebenso sind Aktoren auf der elektrischen Lastseite vorgesehen.

6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Tauglichkeit von Mini-KWK für Niedrigenergie-Häuser

Aufgrund des gegenüber dem Bestand geringeren, dafür jedoch weniger saisonal schwankenden Wärmebedarfs ist der Einsatz von Mini-KWK-Anlagen in Niedrigenergiehäusern grundsätzlich zu prüfen. Dafür wurden zwei Vergleichskriterien eingeführt: der Primärenergiebedarf als Maßstab für den Ressourceneinsatz und die Energiebezugskosten als Merkmal für die Wirtschaftlichkeit. Ein Vergleich auf Basis von Vollkosten war nicht möglich, da die Investitionskosten für viele der erst in der Entwicklung befindlichen Systeme noch nicht bekannt sind. Der Wirkungsgrad des deutschen Strommixes führt zu einer beachtlichen Primärenergie-Gutschrift für die dezentrale Stromerzeugung. Durch Modernisierungs- und Erweiterungsmaßnahmen des Kraftwerkparcs wird die Erzeugungseffizienz zunehmen und der primärenergetische Vorteil der Mini-KWK sinken.

Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kommt der Deckung des Eigenstrombedarfs eine bedeutende Rolle zu. Bei steigenden Strompreisen und weniger stark steigenden Erdgaspreisen ist die Selbsterzeugung des Eigenstroms ökonomisch vorteilhaft. Die Differenz der Energiebezugskosten muss jedoch die zusätzlichen Investitionen in die Mini-KWK gegenüber konventionellen

Wärmeerzeugern kompensieren. Die Wirtschaftlichkeit einzelner Anlagen hängt sehr stark von den Rahmenbedingungen⁶ ab.

Optimierte Einbindung von Mini-KWK in das Energiesystem von kleinen Wohngebäuden

Aus technischen Gründen kann keine der behandelten Technologien den zeitlich schwankenden Strombedarf zeitgleich vollständig decken⁷, deshalb können Mini-KWK nicht vollständig stromgeführt werden⁸.

Verschiedene Konzepte können die Anlageführung nach einem bestimmten Kriterium (Primärenergie-Einsparung, Senkung der Betriebskosten, ...) optimieren. Die Wärmeabnahme ist jedoch unabdingbar und wirkt sich auf das System begrenzend aus. Darüber hinaus bestimmt die Häufigkeit der Ein- und Ausschaltvorgänge die Wartungskosten beachtlich.

Ist es Zeit für die Stadtwerke einzusteigen? Wenn ja, in welcher Form? Contracting? Leasing? Förderung?

Die Mini-KWK-Technologie bietet Stadtwerken ein neues Geschäftsfeld. Wo früher die Stadtwerke Strom und Erdgas angeboten haben, können sie jetzt zusätzlich Wärme ohne aufwändige Investitionen in Wärmenetze anbieten. Die Vor-Ort-Erzeugung sorgt für eine hohe Energienutzung und für eine Entlastung des Niederspannungsnetzes.

Aus den Ergebnissen der Untersuchung einer Strombörse im Niederspannungsnetz mit 30% KWK-Anteil (beinhaltet ca. 30% der Transformatoranschlussleistung; jedes vierte Gebäude ist mit einer KWK-Anlage ausgestattet) zeigt sich, dass die lokalen Energieversorger/ Netzbetreiber sich zumindest auf eine Rückspeisung aus dem Niederspannungsnetz in die Mittelspannungsebene einstellen müssen. Folglich lautet die Frage: Ist es für die Stadtwerke nicht besser die Anlagen selbst zu betreiben, anstatt den Strom von privaten Anbietern (Gebäudeeigentümer oder Contractoren) abnehmen zu müssen?

Sollte die Mini-KWK-Anlage eines Stadtwerkes innerhalb eines Privathauses aufgestellt werden, sind Fragen wie z.B. die Gewähr des Zugangs für das Wartungspersonal abhängig von der Abrechnungsgrenze, sowie die Kosten der

⁶ Investitionskosten, Stromkennzahl der Anlage, Wärme- und Stromverbrauch

⁷ Das Stromprofil kann nicht genau nachgefahren werden.

⁸ Wobei die Brennstoffzellen-BHKWs auf PEM-Basis zumindest zur Sekundär-Regelung im Bereich von 2-3 Minuten eingesetzt werden können, falls diese Anlagen bereits in Betrieb sind. Ein zu häufiger Lastwechsel und ein auf die Wärmebedürfnisse nicht angepasster Betrieb wirkt sich jedoch negativ auf den Primärenergieverbrauch aus (vgl. Stromgeführter Betrieb in [Vetter 2004]).

thermischen Verluste des Wärmespeichers zu klären. Es müssen zwei Fälle unterschieden werden:

1. Dem Endverbraucher wird die verbrauchte thermische Energie in Rechnung gestellt (Zähler am Ausgang des Wärmespeichers);
2. Dem Endverbraucher wird die von der KWK-Anlage erzeugte thermische Energie in Rechnung gestellt (Zähler am Eingang des Wärmespeichers).

Befinden sich die Mini-KWK-Anlagen im privaten Besitz (Hauseigentümer, Contractoren) muss geprüft werden, welche Fördermaßnahmen notwendig und sinnvoll sind, um den Bedürfnissen des Niederspannungsnetzes aber auch des ressourcenschonenden Betriebes gerecht zu werden. Eine Möglichkeit besteht in der saisonal gestaffelten Vergütung des KWK-Stroms bei gleichzeitigem Betrieb einer thermischen Solaranlage (vgl. [Sicre 2004b]). Die grundsätzliche Idee bei diesem Ansatz besteht darin, KWK-Anlagen in strahlungsreichen Perioden geringfügiger zu betreiben und den eingespeisten Strom in diesem Zeitraum nicht zusätzlich noch durch einen KWK-Zuschuss zu fördern. Dadurch wird ein aus energetischer Sicht unnötiger Betrieb in den Sommermonaten vermieden. Als Ausgleich wird in der Heizperiode, wenn die KWK-Anlage wegen des hohen Wärmebedarfs fast durchgängig in Betrieb sein muss, der KWK-Zuschuss entsprechend erhöht. Aus Sicht des Netzbetreibers muss in diesem Falle bei Engpässen in einer dezentralen Versorgungsstruktur der fehlende KWK-Zuschuss durch eine erhöhte Vergütung ausgeglichen werden. Ist beispielsweise das regenerative Angebot gering und die elektrische Energie aus übergeordneter Ebene momentan sehr teuer, dann müssen KWK-Anlagen ein mögliches Defizit im Niederspannungsnetz kompensieren.

Verwertung

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Modelle sollen für Dienstleistungen im Bereich der Planung von Energieversorgungskonzepten auf KWK-Basis eingesetzt werden. Darüber hinaus können Beratungswerkzeuge für Planer entstehen. Die Modelle können mit den in der Fachwelt verbreiteten Simulationsumgebungen wie z.B. TRNSYS, Matlab, Dymola zusammen verwendet werden. Damit können unterschiedliche Energieversorgungsvarianten simulationstechnisch verglichen werden.

Am Institut werden die Modelle im Rahmen künftiger technischer Entwicklungsaufgaben eingesetzt. Sie ermöglichen z. B. die Bestimmung der Anlagengröße in Abhängigkeit vom Energieverbrauch des Versorgungsobjekts. Die Methodik der anlegbaren Investitionskosten wird sich insbesondere bei der Bestimmung der Grenzkosten für die Energieerzeugungsanlage in der Phase der Anlagenkonzeption als behilflich erweisen. Darüber hinaus werden die Modelle bei der Entwicklung und Prüfung von Regelkonzepten für die

Gebäudeleittechnik eingesetzt. Innovative Betriebsführungskonzepte können auf Basis von Simulationsstudien vor der Feldtestphase effizient getestet und optimiert werden.

Abkürzungsverzeichnis

BH	Bestandhaus (unsaniertes Haus)
KW	Kilowatt (Einheit für die Bestimmung einer elektrischen oder thermischen Leistung)
kWh	Kilowatt-Stunde (Einheit für die Bestimmung einer Energiemenge)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
NEH	Niedrigenergie-Haus (Saniertes Haus)
ORC	Organic rankine cycle
PEMFC	Niedertemperatur Brennstoffzelle (Proton Exchange Membran Fuel Cell)
PH	Passivhaus
SOFC	Oxydkeramische Brennstoffzelle (Solide Oxide Fuel Cell)

Literaturangaben

Bühning 2001	Bühning, A.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz von Lüftungs-Kompaktgeräten mit integrierter Kompressionswärmepumpe; Dissertation Technische Universität Hamburg-Harburg; 2001
Erdmann 2002	Erdmann, G., Bokämper, S.: Kostenfragen bei der Markteinführung von stationären Brennstoffzellen; Tagungsband Brennstoffzelle für die dezentrale Hausenergieversorgung; Publikation der TU Berlin; 2002
Hesse 1997	Hesse, S.: Wärmeversorgung von Niedrigstenergie- und Passivhäusern; Diplomarbeit an der Fachhochschule Offenburg; 1997
Krewitt et al. 2004	Krewitt, W., Pehnt, M., Fishedick, M., Temming, H. (Hrsg.): Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung - Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale; Erich Schmidt Verlag; Stuttgart; 2004
Mack et al. 1996	Mack, M., Vanoli, K., Luboschik, U., Schaladja, P., Schnauss, M., Valentin, G., Gassel, A.: Measured hot water consumption in apartment buildings as key parameter for solar collector installations; Proceedings of EuroSun' 96; S.246-250; DGS-Sonnenenergie VerlagsGmbH; München; 1996
Sicre 2004a	Sicre, B.: Nachhaltige Energieversorgung von Niedrigstenergiehäusern auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung im Kleinstleistungsbereich und der Solarthermie; Dissertation Technische Universität Chemnitz; 2004
Sicre 2004b	Sicre, B., Vetter, M., Bühning, A.: Mikro-KWK-Anlagen für Wohngebäude: Umweltpotenziale, Marktfähigkeit und Zusammenwirken mit thermischen Solaranlagen, Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein, 2004

- Sicre u. Henckes 2003 Sicre, B., Henckes, L.: Environmental impact and economical potentials of small-scale Stirling-CHP units for distributed heat and power supply to residential buildings; Proceedings of the international Stirling engines conference ISEC; S. 185-195; Rom; 2003
- Ullah u. Sicre 2004 Ullah, S, Sicre, B: Energy supply to residential buildings by means of Micro-CHP: a bench mark. Interner Bericht, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, 2004.
- Vetter u. Wittwer 2003 Vetter, M., Wittwer, C.: Dynamic Modeling and investigation of residential fuel cell cogeneration systems. Konferenzband 16. Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen, Weimar 10.-12.06.2003. www.euklid.bauing.uni-weimar.de.
- Vetter u. Wittwer 2003b Vetter, M., Wittwer, C.: Einfluss von thermischen Massen im Gebäude auf den Betrieb von Kleinst-BHKWs. Tagungsband ETG-Workshop Neue dezentrale Versorgungsstrukturen, VDE-ETG, Frankfurt a.M., 19.-20.2.2003, S.37-43.
- Vetter 2004 Vetter, M.: Modellbildung und Regelstrategien für erdgasbetriebene Brennstoffzellen-BHKWs auf PEM-Basis. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- Vogel 2003 Vogel, M.: Energie- und Ökonomieszzenarien für verteilte KWK-Anlagen in Stromnetzen. Diplomarbeit Fachhochschule Bingen, 2003.
- Vogel 2004 Vogel, M: Systemstudien und Betriebsführungsstrategien für Mini-KWK in Wohngebäuden. Interner Bericht, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, 2004.