

Titel:

Mikro BHKW Systeme als ein Baustein für die dezentrale Energieversorgung – Eine Bestandsanalyse

Autor / Co-Autor:

Dr.-Ing. habil. J. Seifert: TU Dresden, Institut für Energietechnik
Joachim.Seifert@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. A. Meinzenbach: TU Dresden, Institut für Energietechnik (Nachwuchsautorin)
Andrea.Meinzenbach@tu-dresden.de
Dipl.-Ing. Jens Haupt: TU Dresden, Institut für Energietechnik
Jens.Haupt@tu-dresden.de

Kontaktadresse:

Technische Universität Dresden /Institut für Energietechnik
Dr.-Ing. habil. Joachim Seifert
Merkel Bau / Helmholtzstraße 14
01062 Dresden
Tel: +49 / 351-463-34909
Fax: +49 / 351 463-37888
E-Mail: Joachim.Seifert@tu-dresden.de
Homepage: www.tu-dresden.de

Kurzfassung:

Durch den in Deutschland politisch gewollten Ausbau der erneuerbaren Energien und den damit bedingten größeren Schwankungen in der Erzeugung von Elektroenergie wird sich der Versorgungsmix in naher Zukunft deutlich wandeln. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Elektroenergieerzeugung dezentraler ausgerichtet sein wird, wobei heute jedoch noch offen ist, welche Erzeugungsverfahren neben der regenerativen Elektroenergieerzeugung sich durchsetzen werden. In Hinblick auf eine effiziente Verwendung der eingesetzten Primärenergien ist es jedoch sehr wahrscheinlich, dass Erzeugungsverfahren auf Basis der Kraft-Wärme-Kopplung eine größere Rolle spielen werden. Im nachfolgenden Artikel werden Mini- und Mikro KWK Systeme, als ein Vertreter der dezentralen Energieversorgung, näher betrachtet. Neben einer grundsätzlichen Systematisierung dieser Technologien wird auf messtechnische, numerische Untersuchungen und Betrachtungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit dieser Systeme eingegangen.

Keywords:

Mini-Mikro BHKW, Kraft-Wärme-Kopplung, Strom erzeugende Heizung, CO₂-Einsparung
motorische BHKW, Stirlingmotor, Ausbau des elektrischen Netzes

1. Einleitung

Durch den politisch gewollten Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland steht der energetische Versorgungsmix vor einer deutlichen Veränderung. Prägten in der Vergangenheit zentrale Großkraftwerke die Erzeugungsstrukturen, so wird derzeit durch den starken Ausbau der erneuerbaren Energien davon ausgegangen, dass die Energieversorgung in Deutschland viel stärker dezentral und flexibler ausgerichtet sein wird. Besonders das Flexibilitätskriterium hat dabei ein besonderes Gewicht, da der elektrische Erzeugungspark in der Lage sein muss, schnell auf Schwankungen hinsichtlich der regenerativen Energien reagieren zu können. Verstärkt wird diese Tendenz noch durch die Tatsache, dass das elektrische Übertragungsnetz nur in bestimmten Grenzen ausgebaut werden kann, da es vielerorts Widerstände aus der Bevölkerung gibt.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche dezentralen Erzeugungssysteme besonders geeignet sind, um die versorgungstechnischen Aufgaben wahrzunehmen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist bei der dezentralen Energieversorgung davon auszugehen, dass die Technologie der Kraft-Wärme-Kopplung eine Schlüsselrolle einnimmt. In großen Ballungsräumen werden über das bestehende Maß hinaus größere KWK-Systeme zum Einsatz kommen, die die Abwärme in bestehende Nah- und Fernwärmenetze einspeisen. Im nicht so dicht besiedelten peripheren Raum bzw. in ländlichen Gebieten bieten Mikro-BHKW Systeme eine Alternative zu bestehenden Erzeugungssystemen.

Im nachfolgenden Beitrag soll ein Überblick über bestehende Mikro-BHKW Systeme gegeben werden. Hierzu erfolgt zunächst eine Systematisierung der Technologien. Im zweiten Teil werden Ergebnisse aus eigenen messtechnischen sowie numerischen Analysen präsentiert, bevor im dritten Teil eine abschließende Betrachtung aus wirtschaftlicher Sicht erfolgt.

2. Mikro-BHKW Technologien

Mikro BHKW-Systeme sind Systeme die vorrangig zur Beheizung von Gebäuden eingesetzt werden und dabei eine elektrische Leistung von $P_{el} \leq 15$ kW nicht überschreiten. Als Technologie stehen derzeit

- Systeme auf Basis eines Stirlingmotors (Kombigeräte),
- verbrennungsmotorische Systeme,
- Dampfmaschinen sowie
- Brennstoffzellen

zur Verfügung

	elekt. Wirkungsgrad η_{el} in %	therm. Wirkungsgrad η_{th} in %
Kombigerät (Stirlingmotor + Zusatzbrenner)	10 - 16	80 - 90
Verbrennungsmotor	20 - 30	60 - 70
Dampfmaschine	10 - 15	80 - 90
Brennstoffzelle	>30 (bis 60)	25 - 70

Tabelle 1: Kenndaten von Mikro-BHKW Geräten (Bezugswert Heizwert H_i)

In Tabelle 1 sind für diese Systeme charakteristische energetische Kennwerte angegeben, wie sie bei den Herstellern zu finden sind.

Motorische Mikro-BHKW's werden schon seit einigen Dekaden für die Beheizung von Gebäuden eingesetzt und repräsentieren eine am Markt etablierte Technologie, wohingegen Kombigeräte auf Basis von Stirlingmotoren eine neue technologische Entwicklung darstellen. Die Kombigeräte vereinen traditionelle Brennwertechnologie, meist ausgeführt als wandhängende Geräte, mit einem Stirlingmotor. Noch in der Entwicklungsphase befinden sich Brennstoffzellengeräte, wodurch derzeit nur von vereinzelt Herstellern praxistaugliche Geräte angeboten werden. Der große Nachteil derzeitiger Brennstoffzellengeräte ist, dass sie hinsichtlich einer flexiblen Betriebsweise limitiert sind, was jedoch für den Anlagenbetrieb im Gebäude eine Grundvoraussetzung darstellt.

Betrachtet man die Kenndaten der Tabelle 1 weiter wird deutlich, dass eine große Differenz zwischen den Technologien hinsichtlich des elektrischen Wirkungsgrades vorliegt. Weiterhin muss festgestellt werden, dass die dokumentierten Werte meist Bruttowirkungsgrade darstellen. Um die genannten Technologien jedoch in Ihrer Gesamtheit bewerten zu können, ist es notwendig auch Hilfsenergien mit in die Betrachtung aufzunehmen. Bild 1 zeigt die signifikanten Energieströme bei einem verbrennungsmotorischen Mikro-KWK Gerät.

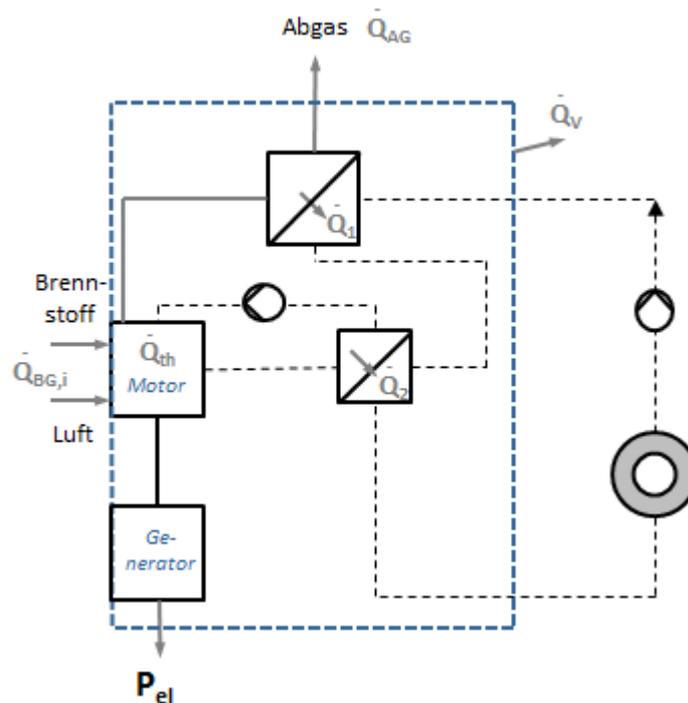


Bild 1: Schematische Darstellung eines Mikro-KWK Systems

Hinsichtlich der Bilanzierung muss in eine Brutto- und eine Nettobilanzierung unterschieden werden. Betrachtet man exemplarisch ein System auf Erdgasbasis entsprechend Bild 1, so muss als Bezug der Zusammenhang nach Gleichung 1 verwendet werden (vgl. Angaben in [1]).

$$\dot{Q}_{BG,i} = \dot{V}_{BG} \cdot H_i \quad (1)$$

Der Brutto- sowie Nettowirkungsgrad ergibt sich zu:

$$\eta_{ges,i,b} = \frac{P_{el} + P_{el,IG} + \dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{BG,i}} \quad (2)$$

$$\eta_{ges,i,n} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{th,n}}{\dot{Q}_{BG,i}} \quad (3)$$

Der Nettowirkungsgrad unterscheidet sich vom Bruttowirkungsgrad aufgrund der ausschließlichen Bilanzierung der ins elektrische Netz eingespeisten Elektroenergie P_{el} , wohingegen beim Bruttowirkungsgrad die internen Verbraucher $P_{el,IG}$ sowie die thermischen Verluste am Gerät mit in der Bilanz berücksichtigt werden. Annahme dabei ist, dass der Elektroenergieverbrauch der internen Verbraucher vom BHKW-Gerät bereitgestellt wird. Weiterhin anzumerken ist, dass die abgeführte Wärme sich wie folgt zusammensetzt:

$$\dot{Q}_{th,n} = \dot{Q}_{th} - \dot{Q}_{AG} - \dot{Q}_V = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (4)$$

$$\eta_{el,i,b} = \frac{P_{el} + P_{el,IG}}{\dot{Q}_{BG,i}} \quad (5)$$

$$\eta_{el,i,n} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{BG,i}} \quad (6)$$

$$\eta_{th,i,b} = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{Q}_{BG,i}} \quad (7)$$

$$\eta_{th,i,n} = \frac{\dot{Q}_{th,n}}{\dot{Q}_{BG,i}} \quad (8)$$

Erweitert man die Wirkungsgrade durch die Berücksichtigung der Verluste eines womöglich nachgeschalteten Speichersystems, so ergibt sich der Systemwirkungsgrad für die Erzeugungseinheit entsprechend Gleichung 9.

$$\eta_{ges,i,sys} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{th,n} - \dot{Q}_{SP,V}}{\dot{Q}_{BG,i}} \quad (9)$$

Am Beispiel einer messtechnischen Untersuchung eines L-BHKW's der Firma Kirsch [2] sollen die Unterschiede der Bilanzierung aufgezeigt werden¹.

3. Messtechnische Analyse

¹ L-BHKW steht für luftgekühltes Blockheizkraftwerk mit konventionellem Verbrennungsmotor.

Für die detaillierte Einschätzung der Leistungsfähigkeit von Mikro-BHKW Systemen ist es notwendig diese hinreichend genau auch messtechnisch zu analysieren. Hierzu sind statische und dynamische Untersuchungen zwingend notwendig. An der TU Dresden wurde zu diesem Zwecke ein Versuchsstandsystem aufgebaut, welches statische und dynamische Untersuchungen zulässt. Die Besonderheit der Untersuchungskonfiguration ist dabei, dass die Mikro-BHKW Systeme in eine virtuelle Testumgebung eingebunden werden² können, was es ermöglicht, realitätsnahe Aussagen zu generieren [1]. Bild 2 zeigt schematisch den Versuchsstand.

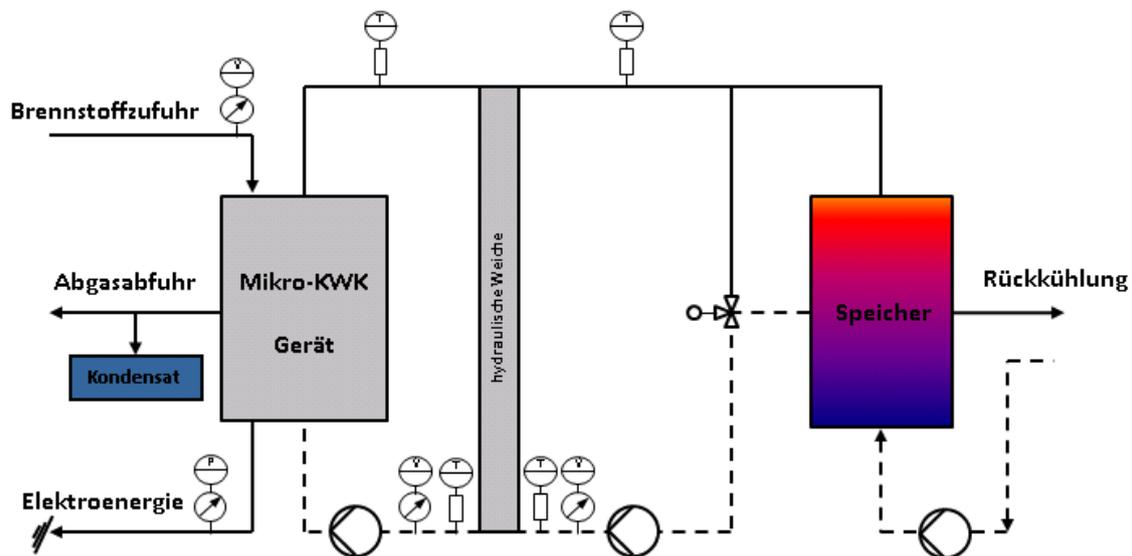


Bild 2: Prinzipieller Aufbau des „Hardware in the Loop Versuchsstandes“

Alle zur Bilanzierung der Mikro-BHKW Systeme notwendigen Energieströme werden am Versuchsstand aufgezeichnet, wobei die Besonderheit darin besteht, dass die in Bild 1 dargestellte hydraulische Weiche durch verschiedene Speicher ersetzt werden kann. Für das genannte motorische Mikro-BHKW sind in den Bildern 3, 4 und 5 die mit der Versuchsanordnung generierten statischen Kenndaten dokumentiert.

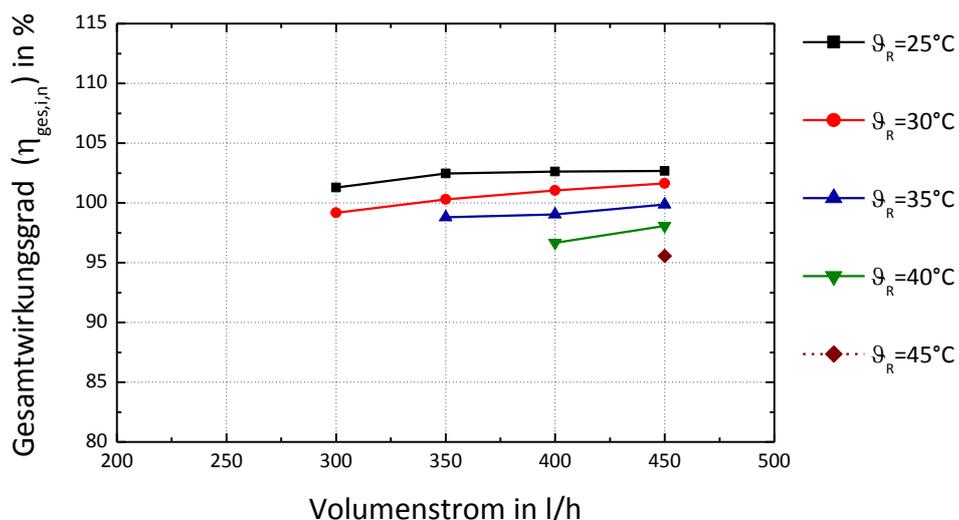


Bild 3: Netto-Gesamtwirkungsgrad des L-BHKW's der Firma Kirsch [2] bei einem Einstellwert der elektrischen Leistung von $P_{el}=4\text{kW}$

² Die Einbindung eines realen Gerätes in eine virtuelle Testumgebung wird auch als „Hardware in the Loop“ bezeichnet.

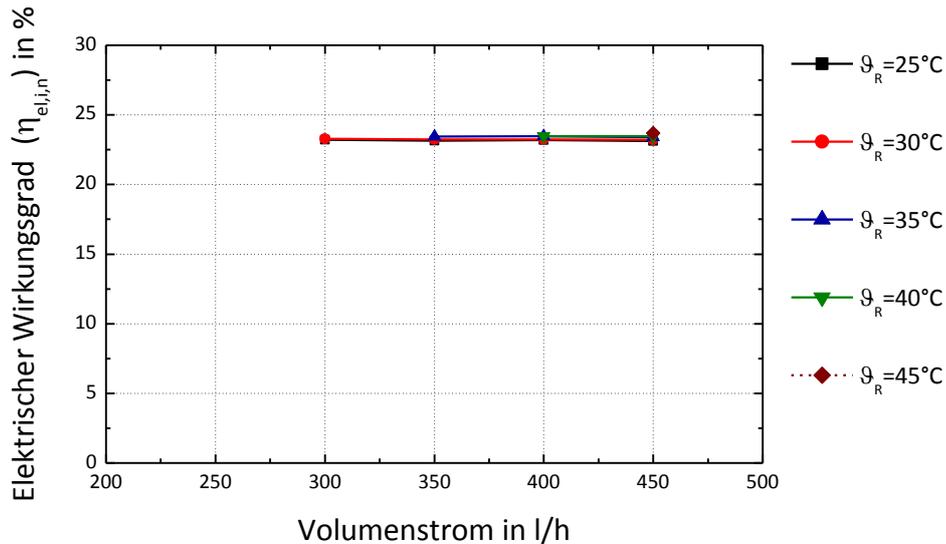


Bild 4: Elektrischer Netto-Wirkungsgrad des L-BHKW's der Firma Kirsch [2] bei einem Einstellwert der elektrischen Leistung von $P_{el}=4\text{kW}$

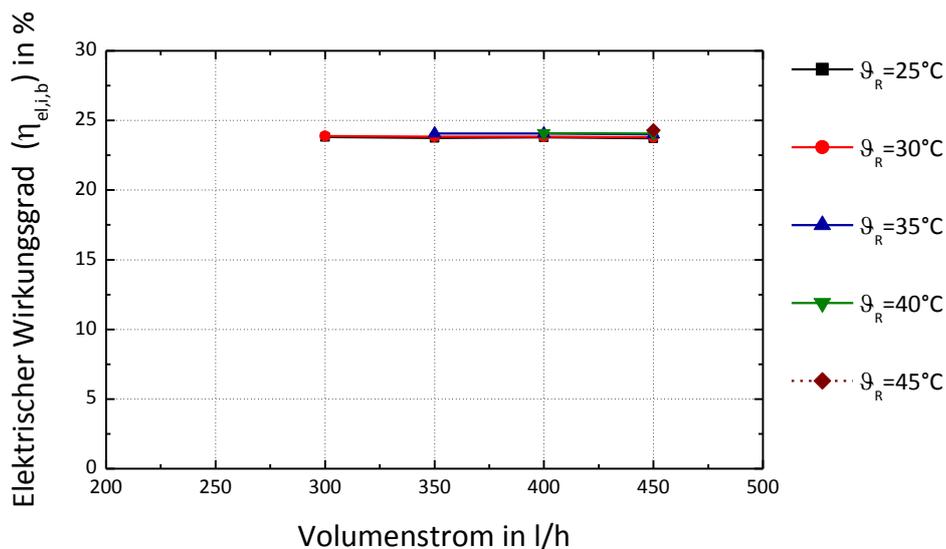


Bild 5: Elektrischer Brutto-Wirkungsgrad des L-BHKW's der Firma Kirsch [2] bei einem Einstellwert der elektrischen Leistung von $P_{el}=4\text{kW}$

Signifikant für das Gerät ist, dass eine große Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades von der Rücklauftemperatur sowie eine etwas geringere Abhängigkeit vom Volumenstrom besteht. Hinsichtlich des elektrischen Wirkungsgrades ist keine ausgeprägte Abhängigkeit vom Volumenstrom sowie von der Rücklauftemperatur zu detektieren.

Zusätzlich zu diesen statischen Analysen wurde das Anfahrverhalten des genannten Systems untersucht. In Bild 6 sind hierzu die entsprechenden Daten dokumentiert. Auffällig bei den Datenverläufen ist zunächst, dass während der Startphase ein hoher Elektroenergiebedarf aus dem elektrischen Netz zur Verfügung gestellt werden muss. Beim vorliegenden L-BHKW war dies eine Leistung von $P_{el}=13.800\text{ W}$. Weiterhin auffällig ist, dass innerhalb der Warmlaufphase zunächst nicht die vollständige elektrische Leistung abgerufen werden kann. Erst nach $\tau=220\text{s}$ wird eine elektrische Leistung von $P_{el}=3.900\text{ W}$ ins elektrische Netz abgegeben. Hinsichtlich der thermischen Leistung ist gleichfalls ein deutliches Anfahrverhalten zu erkennen. Auch hier stellt sich erst nach $\tau=350\text{s}$ ein

stationärer Zustand ein. Die Schwankungen die dabei innerhalb der Warmlaufphase in Bild 6 bei der thermischen Leistung zu erkennen sind, beruhen auf einem Taktverhalten der integrierten Umwälzpumpe.

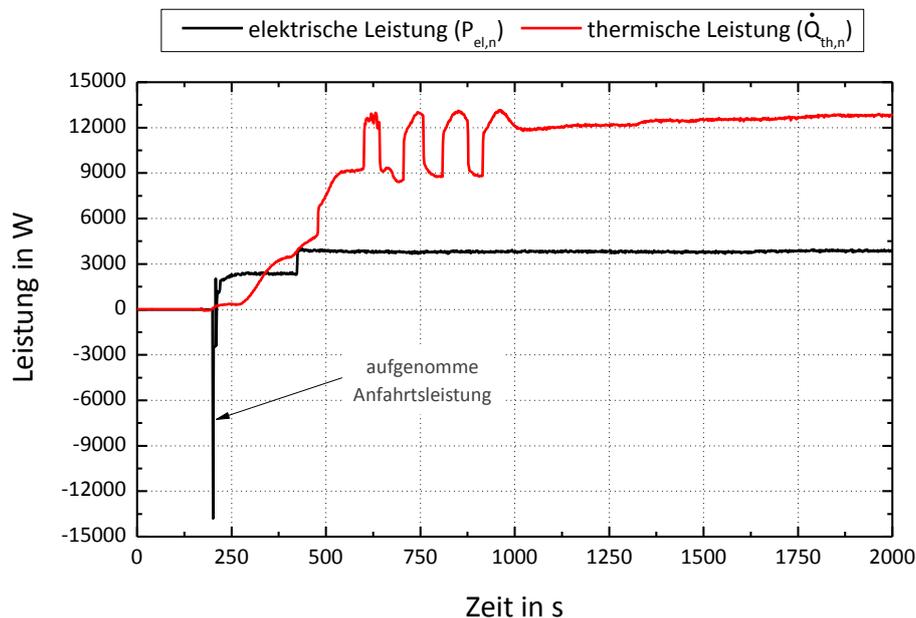


Bild 6: Dynamisches Anfahrverhalten des L-BHKW's der Firma Kirsch [2] bei einem Einstellwert der elektrischen Leistung von $P_{el} = 4\text{kW}$ und $V=300/\text{h}$

4. Numerische Analyse

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde für das dokumentierte Gerät ein numerisches Modell in der Simulationsumgebung TRNSYS-TUD [3] erstellt und damit ausführliche numerische Untersuchungen durchgeführt. Analysiert wurden unterschiedliche Betriebsvarianten. Als Referenzvariante kam eine durchgängige Betriebsweise mit einem elektrischen Einstellwert von $P_{el} = 4\text{kW}$ zur Anwendung. Alternativ dazu wurden zwei Betriebsvarianten entsprechend Bild 7 betrachtet.

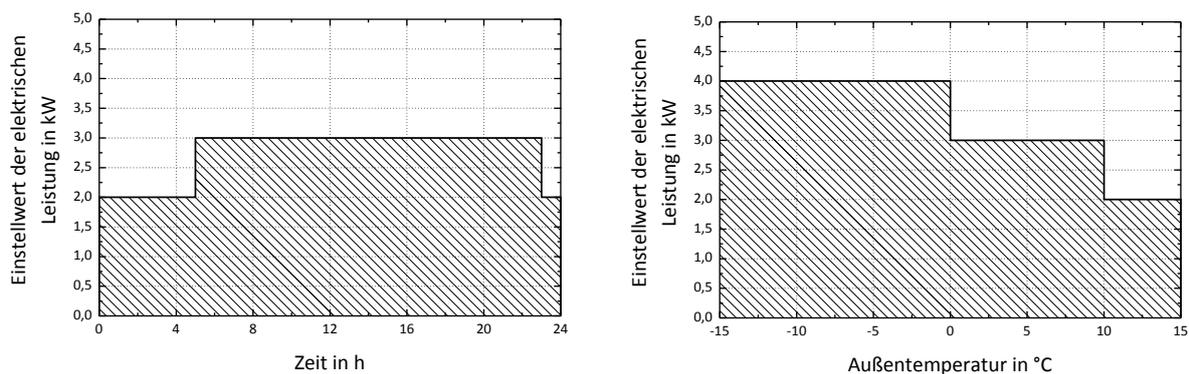


Bild 7: Einstellwert der elektrischen Leistung des L-BHKW's als Funktion der Tageszeit- τ (links) sowie als Funktion der Außentemperatur- ϑ_a^3

Als Gebäude wurde ein Einfamilienhaus mit einer wärmetechnischen Ausstattung entsprechend der WSV082 gewählt. Details hierzu sind in [1] zu finden. Bild 8 zeigt die

³ Gewählt wurde bei $P_{el}=f(t)$ ein maximaler Wert von $P_{el}=3\text{kW}$, da für das betrachtete Gebäude (WSV082) die bei diesem Wert generierte thermische Leistung im Mittel zur Beheizung des Gebäudes ausreichend ist.

äußere Kubatur des statistisch abgeleiteten Einfamilienhauses. Kennzeichnend für das Gebäude ist eine beheizte Grundfläche von $A=160\text{m}^2$. Hinsichtlich der Anlagentechnik ist zu nennen, das freie Heizflächen mit einem Auslegungstemperaturniveau der Anlage von $\vartheta_V=70^\circ\text{C}/\vartheta_R=55^\circ\text{C}/\vartheta_i=20^\circ\text{C}$ modelliert wurden. Als Heizungspufferspeicher wurde ein $V=1000\text{l}$ Speicher sowie für die Trinkwassererwärmung ein $V=200\text{l}$ Speicher verwendet. Gleichfalls mitbetrachtet wurde der Elektroenergieverbrauch des Gebäudes. Hierzu wurden typische Lastprofile eines 4 Personen Haushaltes hinterlegt. Details hierzu sind in [1] zu finden und sollen an dieser Stelle nicht nochmals dokumentiert werden.

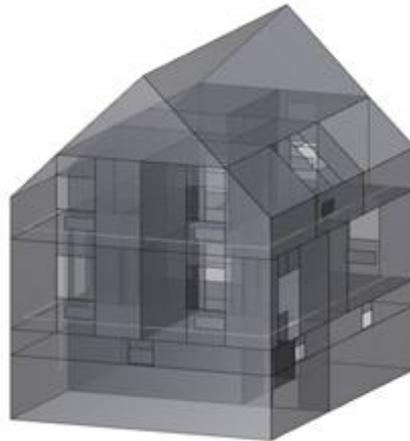


Bild 8: Schematische Darstellung des aus statistischen Daten abgeleiteten Einfamilienhauses

Tabelle 2 zeigt für diese Randbedingungen die sich ergebenden energetischen Daten für den Betrachtungszeitraum von einem Jahr.

P_{el} in kW	Q_f in kWh/a	Elektroenergie				Q_{th} in kWh/a	$Q_{h,s,HZ}$ in kWh/a	$Q_{h,s,TWE}$ in kWh/a
		$W_{el,n}$	W_{ein}	W_{bez}	W_{ev}			
		in kWh/a						
4	42555	9689	8144	3288	1545	29598	874	483
$P_{el}=f(\tau)$	42574	8795	7077	3116	1718	29619	849	481
$P_{el}=f(\vartheta_a)$	42476	8998	7285	3120	1713	29597	841	480

Tabelle 2: Jährliche, energetische Kenndaten für ein Gebäude entsprechend WSVO82 bei unterschiedlichen Betriebsweisen

Die energetischen Kenndaten der Tabelle 2 zeigen, dass sich die Aufwendungen für den Endenergiebedarf für alle drei betrachteten Varianten auf einem gleichen Niveau bewegen. Auch die thermische Energie, die dem Heizungssystem übergeben wird ist in etwa gleichwertig. Große Unterschiede sind bei der elektrischen Bilanzierung aufgrund der unterschiedlichen Betriebsregime zu detektieren. Bei einer konstanten Betriebsweise mit $P_{el}=4\text{ kW}$ – Einstellwert wird vom Mikro-BHKW die meiste Elektroenergie erzeugt. Betrachtet man demgegenüber die Werte bei einer Betriebsweise entsprechend Bild 7 so sind für W_{erz} deutlich niedrigere Werte zu bestimmen. Auf der anderen Seite muss jedoch auch festgestellt werden, dass hinsichtlich des Eigenverbrauches der erzeugten Elektroenergie bei einem Einstellwert von $P_{el}=4\text{ kW}$ die geringsten Werte zu verzeichnen sind. Im vorliegenden Falle wird ein Wert von $W_{ev}=1545\text{ kWh}$ detektiert.

Abschließend zu den numerischen Betrachtungen sei noch auf die wärmephysiologischen Konsequenzen im Gebäude verwiesen, die sich bei den unterschiedlichen Betriebsweisen ergeben. Hierzu wurde für einen Hauptaufenthaltsraum die Summenhäufigkeit der Sollwertabweichung von der operativen Raumtemperatur in Bild 9 dokumentiert. Wie schon aus den energetischen Kennwerten zu erkennen, sind in Bild 9 nahezu keine Unterschiede

bezüglich einer veränderten Raumtemperatur bei einer differierenden Betriebsweise zu detektieren (gleiche thermische Behaglichkeit).

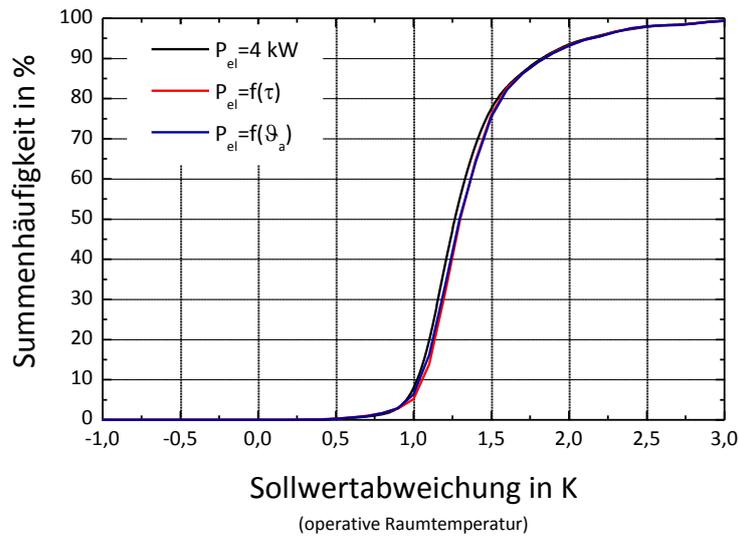


Bild 9: Sollwertabweichung der operativen Raumtemperatur für einen Hauptaufenthaltsraum des betrachteten Einfamilienhauses

5. Wirtschaftlichkeit

Neben den reinen technischen und energetischen Parametern ist für die flächendeckende Realisierung einer dezentralen Energieversorgung die Wirtschaftlichkeit von zentraler Bedeutung. Hierzu wurde auf Basis der ermittelten messtechnischen und numerischen Daten ein Vergleich zwischen konventionellen Heizsystemen (Brennwertgerät) und Mikro BHKW Systemen auf Basis eines Vollkostenvergleiches vorgenommen. Bild 10 zeigt hierzu die entsprechenden Werte für die jährlich zu leistenden monetären Zahlungen.

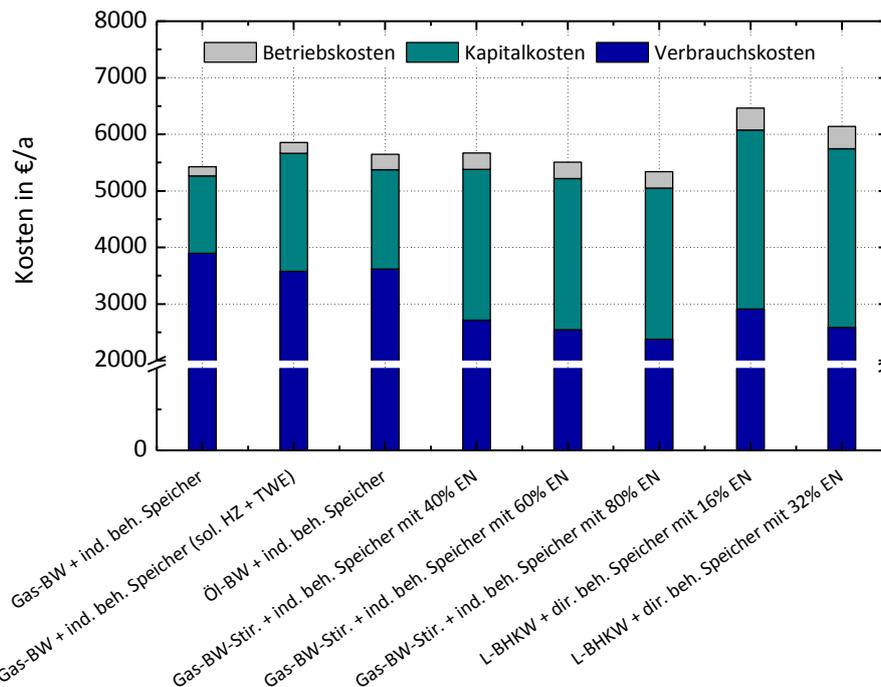


Bild 10: Gesamtkostenanalyse für verschiedene anlagentechnische Varianten im Einfamilienhaus (Heizenergie + Elektroenergie), EN-Anteil des eigengenutzten Stromes der vom Mikro-BHKW erzeugt wird

Als Ergebnis dieses Kostenvergleiches kann festgestellt werden, dass die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK Systemen heute noch nicht für alle betrachteten Systeme vollständig gegeben ist. Als signifikante Parameter stellen sich dabei die Investitionskosten sowie der Deckungsanteil am eigenen Stromverbrauch heraus. Die erste Kenngröße wird sicher bei breiter Markteinführung der genannten Geräte deutlich sinken, wohingegen der zweite Parameter stark von der Betriebsweise abhängt.

6. Fazit

Im vorliegenden Beitrag werden Mikro-BHKW Systeme, als ein Baustein der zukünftigen dezentralen Energieversorgung betrachtet. Als Fazit der Analysen kann festgestellt werden, dass die genannten Geräte technisch derzeit recht unterschiedlich entwickelt sind. Motorische Mikro-BHKW Systeme sowie Systeme auf Basis von Stirlingmotoren sind am Markt verfügbar bzw. befinden sich in der Feldtesterprobung. Brennstoffzellen hingegen sind derzeit noch nicht flächendeckend am Markt verfügbar. Hinsichtlich der technischen Parameter sowie des sich daraus ergebenden Betriebsverhaltens / Wirtschaftlichkeit existieren große Unterschiede. Wichtig ist es für den Stand-Alone Betrieb, dass zukünftig die Investitionskosten der Geräte sinken. Darüber hinaus muss mit regelungstechnischen Maßnahmen darauf hingewirkt werden, dass möglichst viel der erzeugten Elektroenergie auch im Gebäude verbraucht wird. Gelingt dies nur zum Teil müssen andere Strategien entwickelt werden, die eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit dieser Geräte ermöglicht. Eine Alternative ist dabei viele dieser Geräte innerhalb eines „Regionalen, Virtuellen Verbundes“ (siehe Bild 11) zusammenzufassen, was jedoch wiederum einen erhöhten Aufwand hinsichtlich der Kommunikation erfordert.

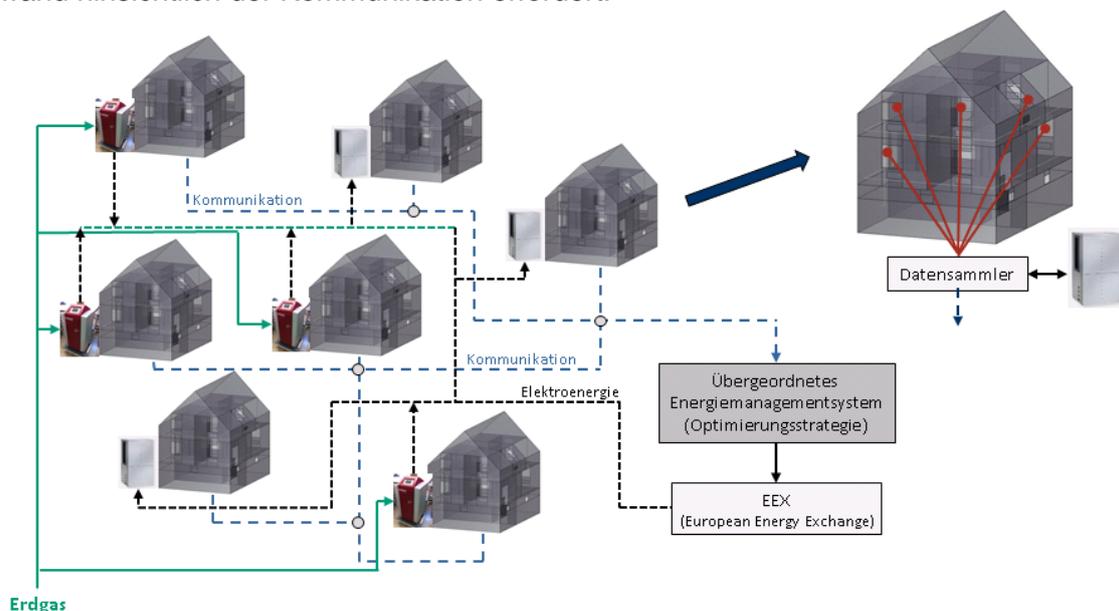


Bild 11: „Regionaler, Virtueller Verbund von aktiven und passiven Verbrauchern“

Literatur

- [1] Seifert, J., Meinzenbach, A., Hartan, J.: Mikro-Blockheizkraftwerke für den Gebäudebereich, Buch-Manuskript, 2012
- [2] Kirsch HomeEnergy: <http://www.kirsch-homeenergy.de/>, 2011
- [3] Perschk, A.: Gebäude- und Anlagensimulation – „Ein Dresdner Modell“. GI Gesundheitsingenieur – Haustechnik – Bauphysik - Umwelttechnik (2010), Bd. 131, Nr.4,

Symbolverzeichnis

A	beheizte Nutzfläche	m^2
H_i	Heizwert	MJ/m^3
P_{el}	elektrische Leistung	W
$P_{el,IG}$	elektrische Leistung innerer Geräte	W
\dot{Q}_{AG}	Abgasverlust	W
\dot{Q}_1, \dot{Q}_2	Teilwärmeströme	W
$\dot{Q}_{BG,i}$	Energiegehalt des Brennstoffes (bezogen auf den Heizwert)	W
Q_f	Endenergie	kWh
$Q_{h,s,HZ}$	Wärmeverluste des Pufferspeichers -Heizung	kWh
$Q_{h,s,TWE}$	Wärmeverluste des Trinkwasserspeichers	kWh
\dot{Q}_{th}	kalorische thermische Leistung des Motors / Brenners	W
$\dot{Q}_{th,n}$	kalorische thermische Leistung (Abgabe Heizungsnetz)	W
$\dot{Q}_{SP,V}$	thermische Speicherverluste	W
\dot{Q}_V	thermische Verluste über die Hüllfläche	W
\dot{V}_{BG}	Brenngasvolumenstrom	m^3/h
W_{bez}	aus dem Netz bezogene Elektroenergie	kWh
$W_{el,n}$	erzeugte Elektroenergie (BHKW, netto)	kWh
W_{ein}	ins Netz eingespeiste Elektroenergie	kWh
W_{ev}	eigenverbrauchte Elektroenergie (Erzeugung BHKW)	kWh
ϑ_i	Innenraumtemperatur	$^{\circ}C$
ϑ_R	Rücklauftemperatur	$^{\circ}C$
ϑ_V	Vorlauftemperatur	$^{\circ}C$
η_{el}	elektrischer Wirkungsgrad (Herstellerangaben)	$\%$
$\eta_{el,i,b}$	elektrischer Bruttowirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert)	$\%$
$\eta_{el,i,n}$	elektrischer Nettowirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert)	$\%$
$\eta_{ges,i,b}$	Brutto-Gesamtwirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert)	$\%$
$\eta_{ges,i,n}$	Netto-Gesamtwirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert)	$\%$
$\eta_{ges,i,sys}$	Systemwirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert)	$\%$
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad (Herstellerangaben)	$\%$
$\eta_{th,i,b}$	therm. Bruttowirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert)	$\%$
$\eta_{th,i,n}$	thermischer Nettowirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert)	$\%$