

ANWENDUNG DER BRENNSTOFFZELLENTHECHNOLOGIE ALS MIKRO-KWK IM WOHNBEREICH

Florian AHAMMER, ÖBB-Infrastruktur Bau AG,

Tel: +43 1 93000-33274 Fax: +43 1 93000-44793 E-Mail: Florian.Ahammer@bau.oebb.at

Christoph GUTSCHI, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, TU Graz,

Tel: +43 316 873 7906 Fax: +43 316 873 7910 E-Mail: christoph.gutsch@tugraz.at

Heinz STIGLER, Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, TU Graz,

Tel: +43 316 873 7900 Fax: +43 316 873 7910 E-Mail: stigler@tugraz.at

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Die österreichischen Haushalte spielen mit einem Anteil von 27 % eine bedeutende Rolle am energetischen Endverbrauch. Dieser private Energieverbrauch setzt sich in erster Linie aus den für die Erzeugung von Raumwärme eingesetzten Energiearten und aus elektrischer Energie zusammen. Um den Energieverbrauch der Haushalte zu senken, könnte – neben thermischer Sanierung der Gebäude und bewusstem Umgang mit elektrischer Energie – die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme mittels dezentraler Mikro-Kraft-Wärme-Kopplung (Mikro-KWK) eine Effizienzsteigerung ermöglichen und somit ein Einsparungspotential darstellen. Eine Studie über die KWK-Potenziale in Österreich [1] hat jedoch gezeigt, dass das theoretische Potenzial für dezentrale Mikro-KWK mit einer Nennleistung unter 50 kW_{el} derzeit praktisch nicht genutzt wird.

In diesem Zusammenhang werden gerade an die Technologie der Brennstoffzelle durch den relativ hohen Wirkungsgrad bei kleinen Leistungen hohe Erwartungen gestellt, weshalb sich auch mehrere Produkte für den Einsatz in Wohngebäuden in Entwicklung befinden. Aufgrund der noch geringen Betriebserfahrung mit Brennstoffzellen-Heizgeräten (BZH) bestehen noch Fragen bzgl. Anwendbarkeit der Technologie, möglicher Marktpotenziale und wirtschaftlicher Aspekte.

Es ist das Ziel dieser Arbeit, mehrere Aspekte des Einsatzes von Brennstoffzellen-Heizgeräten im Wohnungssektor zu beleuchten. Der Schwerpunkt liegt dabei in den Bereichen Integration und Dimensionierung sowie bei der Frage der Wirtschaftlichkeit.

2 Der Markt für Brennstoffzellenheizgeräte in Österreich

2.1 Marktpotenzial

Die Anzahl der jährlichen Neuinstallationen von Heizkesseln in Wohngebäuden setzt sich in erster Linie aus dem Austausch veralteter Kessel in bestehenden Gebäuden und der Installation von Heizungsanlagen in neu errichteten Gebäuden zusammen. Von hoher Bedeutung ist die Art der Heizung – Fernwärme, Einzelofenheizung, Etagenheizung oder Zentralheizung – insbesondere wenn es darum geht, ein Altgerät zu ersetzen, und die Anzahl der gemeinsam durch einen Kessel beheizten Wohnungen. In den Jahren 1996 bis 1999 wurden durchschnittlich rund 95.000 Heizkessel pro Jahr installiert, bis zum Jahr 2003 sank dieser Wert auf rund 76.000 ab. Von den insgesamt 78.500 im Jahr 2004 angeschafften Kesseln entfielen 46.600 auf Gaskessel. [2-5]

Für eine grobe Abschätzung eines möglichen Marktpotentials für Brennstoffzellen-Heizgeräte (BZH) wird davon ausgegangen, dass sich anfangs die Anwendung auf Gebäude mit bereits bestehendem Gasanschluss beschränkt. Um eine ausreichende Höhe des Strom- und Wärmebedarfs für den wirtschaftlichen Betrieb eines BZH zu berücksichtigen, wird angenommen, dass mehr als zwei Wohnungen in einem Gebäude vorhanden sein müssen. Bei einer Neubaurate von jährlich rund 46.000 Wohnungen bzw. 18.000 Gebäuden und einem jährlichen Austausch von rund 56.000 veralteten Kesseln kann bei gleich bleibender Gebäudestruktur ein theoretisches Marktpotential von jährlich rund 4.000 – 5.000 BZH für Österreich grob abgeschätzt werden. Die Eckdaten zur Ermittlung dieser Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Eckdaten zur Grobabschätzung des Marktpotenzials für Brennstoffzellen-Heizgeräte in Österreich [4,6,7]

Gebäude in Österreich, Stand 2001	2.046.700
Wohngebäude	1.764.500
Nichtwohngebäude	282.200
Nutzfläche in Wohngebäuden (Hauptwohnsitze)	299.636.000 m ²
davon mit Gas beheizt	92.018.000 m ²
relative Fläche	30,7 %
Gebäude mit mehr als 2 Wohnungen (inkl. Nichtwohngebäude)	212.000
<i>relative Anzahl der Gebäude</i>	<i>10,4 %</i>
Gebäude mit Zentralheizung und Gas als Brennstoff	418.300
<i>relative Anzahl der Gebäude</i>	<i>20,4 %</i>
Wohngebäude mit >2 Wohnungen, Zentralheizung und Gas als Brennstoff	32.000
<i>relative Anzahl der Gebäude</i>	<i>1,6 %</i>
Wohngebäude mit >2 Whg. inkl. Hotels, Zentralhgz., Gas als Brennstoff	36.800
<i>relative Anzahl der Gebäude</i>	<i>1,8 %</i>
<i>relative Anzahl der gasbeheizten Gebäude</i>	<i>8,8 %</i>
vor 1981 gebaute Gebäude	1.401.400
<i>relative Anzahl der Gebäude</i>	<i>68,5 %</i>
fertig gestellte Gebäude, 2002	17.960
<i>davon mit mehr als 2 Wohnungen pro Gebäude</i>	<i>ca. 50 %</i>
verkaufte Heizkessel in Österreich, 2004	78.500
verkaufte Heizkessel für Erdgas	46.600
<i>verkaufte Heizkessel als Ersatz für alte Kessel (geschätzt)</i>	<i>ca. 75 %</i>
jährliches Marktpotenzial für BZH im Wohnungsbereich	
untere Schätzung	4.100
obere Schätzung	4.900

2.2 Entwicklungsstand der Brennstoffzellentechnologie

Zur Zeit konzentrieren sich die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich der Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung auf PEM-Brennstoffzellen (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) und auf die SOFC (Solid Oxid Fuel Cell). Die PEMFC arbeitet bei einer Temperatur von 40 bis 90 °C (typisch 60 – 90 °C) mit einem externen Reformier, die SOFC arbeitet hingegen bei 800 bis 1000 °C, wodurch eine interne Reformierung des Erdgases möglich wird. Die niedrige Arbeitstemperatur der PEMFC ermöglicht ein gutes Kaltstartverhalten. Als Oxidationsmittel kann in der PEMFC herkömmliche Luft verwendet werden, weiters bietet sie den Vorteil einer sehr dynamischen Betriebsweise. Einen Nachteil stellen allerdings aufgrund der CO-Unverträglichkeit des Katalysators die hohen Anforderungen an das Brenngas und der schwierig zu beherrschende Flüssigkeitshaushalt der Membran dar. Die hohen Arbeitstemperaturen der SOFC ermöglichen den Einsatz billigerer Katalysatoren und die Vorteile einer inneren Reformierung des Brenngases sowie einer hohen Temperatur der ausgekoppelten Wärme. Zugleich bedingen die hohen Temperaturen eine relativ lange Aufheizzeit, was bei der Erfordernis von oftmaligem Ein- und Ausschalten einen bedeutenden Nachteil darstellt. Zusätzlich können dadurch Probleme bei der Abdichtung des Stacks entstehen. [8-11]

In Tabelle 2 ist eine exemplarische Übersicht über im Frühjahr 2006 in Entwicklung oder in Feldtests befindliche Anlagen wiedergegeben. Es wurden Geräte kleiner Nennleistung ausgewählt, welche speziell zur Hausenergieversorgung mittels Erdgas als Brennstoff entwickelt werden. Die größte Herausforderung für alle Hersteller stellt derzeit die Stacklebensdauer dar. Zwar werden von manchen Stacks schon Lebensdauern von 10.000 Stunden und mehr erreicht, dies allerdings nur unter Laborbedingungen. Die Aussagen bezüglich der Mindestlebensdauer für ein verkaufbares Produkt divergieren je nach Hersteller sehr stark und reichen von drei Jahren bis zu 40.000 Stunden. Die Angaben bezüglich des Markteintritts variieren zwischen 2008 und 2015, am häufigsten wird allerdings 2012 bis 2015 genannt. Aus Gesprächen mit den Herstellern geht hervor, dass die ersten BZH wahrscheinlich nicht ohne Förderungen konkurrenzfähig sein werden, jedoch wird angenommen, dass sich in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrzehnts ein selbsttragender Markt entwickeln werde. Die Preise für BZH sollen sich dann an den in einem vergleichbaren Leistungsbereich liegenden Konkurrenztechnologien orientieren.

Tabelle 2: Marktübersicht über Brennstoffzellen-Heizgeräte
(Quellen: Auskünfte der jeweiligen Unternehmen im Frühjahr 2006)

Anbieter	BBT	EFC	Nuvera Fuel Cells	RWE	s&r	Vaillant	Viessmann	CFC	FCT	Hexis
Bezeichnung	BZH	BZH	Avanti	BZH	inhouse 4000	Euro2	Haus-Energiezentrale	NetGen	FCT 5kW CHP FC-SYSTEM	Galileo
Typ	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	SOFC	SOFC	SOFC
geschätzter Markteintritt	2012 bis 2015	2010 bis 2012	k.A.	2010	2008	k.A.	2010	k.A.	k.A.	k.A.
Anlagen-erprobung seit	k.A.	1999 (Alpha)	k.A.	k.A.	2000	2001 (Euro1) 2003 (Euro2)	2002	k.A.	2003	k.A.
Feldtest-anlagen	k.A.	100 (Beta)	ab 2007 in Europa	20	6	56	2	20 - 30 (ab 4/2006)	k.A.	110 (HXS 1000 Premiere)
P_{Net} [kW]	4,6	1,5	4,6	4,6	4	1 - 4,6	2	1	2 - 3	1
P_{Nth} [kW]	6,5	3	6,9	k.A.	2 - 6	3 - 11	3,5	1	2,5	2,5
Zusatz-brenner [kW]	k.A.	3,5 - 15	z.Z. nicht vorgesehen	40 - 160	k.A.	25 - 50	k.A.	12 - 52	k.A.	20
η_{ges} [%]	k.A.	>80	75	85	60 - 90	>85	>90	80	70	85
η_{el} [%]	k.A.	23	>30	35	25 - 30	>30	>32	40	35	25 - 30
$T_{\text{Heizkreis}}$ [°C]	k.A.	k.A.	5 - 50 / 65	k.A.	50 / 70	55 / 70	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

BBTBosch Buderus Thermotechnik GmbH,

s&rSchalt- und Regeltechnik GmbH,

FCTFuel Cell Technologies LTD.

EFCeuropean fuel cell gmbh,

CFCCeramic Fuel Cells Limited,

RWERheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG

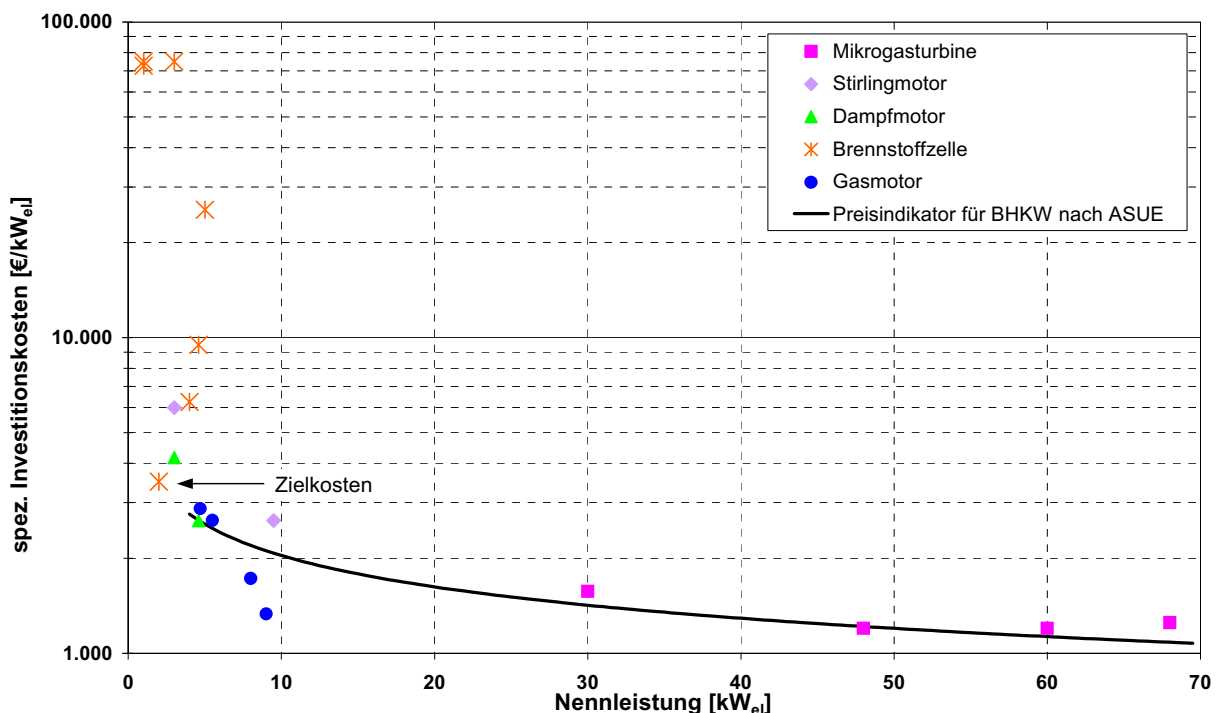


Abbildung 1: Spezifische Investitionskosten verschiedener Mikro-KWK-Technologien Anfang 2006 [11]

Die Investitionskosten von Mikro-KWK-Anlagen sind ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit dieser Geräte. Grundsätzlich steigen die spezifischen Investitionskosten bei allen Technologien mit sinkender Nennleistung, wodurch für den Haushaltsbereich relativ hohe Investitionskosten pro Leistungseinheit zu erwarten sind. In Abbildung 1 werden die spezifischen Investitionskosten von BZH mit denen anderer etablierter Konkurrenztechnologien wie Erdgas-BHKW sowie anderer Technologien in der Markteinführungsphase, wie Stirlingmotoren oder Dampfmotoren verglichen. Man erkennt, dass die Investitionskosten von BZH derzeit noch deutlich über jenen vergleichbarer Technologien liegen. (Bei dem in Abbildung 1 angeführten BZH mit spezifischen Investitionskosten von 3.500 €/kW_{el} handelt es sich um das Preisziel bei der Markteinführung laut

Angaben eines Herstellers.) Dies liegt vor allem daran, dass sich die BZ-Technologie noch im Entwicklungsstadium befindet und deswegen erst vergleichsweise geringe Stückzahlen produziert wurden. Die Zielkosten bei der zukünftigen Markteinführung von BZH werden sich jedoch an den Konkurrenztechnologien orientieren müssen, sofern keine finanziellen Anreize durch Förderungen zu erwarten sind. Neben den Investitionskosten hängt die Wirtschaftlichkeit einer KWK-Anlage von den im Betrieb erreichten Nutzungsgraden sowie von der Lebensdauer und den Wartungskosten ab, in diesen Bereichen ist bei der BZ-Entwicklung noch Potential zur Kostenreduktion anzunehmen.

3 Dimensionierung von Brennstoffzellen-Heizgeräten für Wohngebäude

Der Betrieb eines BZH ist nur dann als wirtschaftlich sinnvoll zu erachten, wenn die produzierte elektrische Energie vollständig von einem Verbraucher abgenommen bzw. kostendeckend in das öffentliche Netz eingespeist werden kann und die erzeugte Wärme an einen Verbraucher abgegeben oder in einem Wärmespeicher für eine spätere Nutzung gespeichert werden kann. Der Einsatz von Brennstoffzellen-Heizgeräten wird deshalb von technischer Seite durch den Strom- und Wärmeverbrauch in einem Gebäude, der Kapazität des verwendeten Wärmespeichers sowie der gewählten Betriebsweise beeinflusst. Diese Faktoren begrenzen den Einsatz sowohl in der Wirtschaftlichkeit als auch in der Lebensdauer des Systems, da es zu häufigen Ein- und Ausschaltzyklen und zu langen Stillstandszeiten kommen kann.

Um die Auswirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren auf den Betrieb eines BZH zu ermitteln, wurde der Einsatz von Brennstoffzellen verschiedener Nennleistungen in drei unterschiedlichen Typen Wohngebäuden über die Dauer eines Jahres simuliert.

Primäres Ziel dieser Analyse ist die Ermittlung der optimalen Nennleistungen von Brennstoffzellen-Heizgeräten für die jeweiligen Gebäudetypen und die jeweils erforderlichen Größen der Wärmespeicher. Die aus der Simulation ermittelten Betriebsdaten können anschließend für eine wirtschaftliche Betrachtung des Einsatzes von BZH herangezogen werden.

3.1 Grundlegende Annahmen

Um eine Vergleichbarkeit mit einer möglichst großen Bandbreite von Wohngebäuden zu ermöglichen, wurden drei verschiedene Gebäudetypen – Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus mit 8 Wohnungen (MFH8) sowie Mehrfamilienhaus mit 18 Wohnungen (MFH18) – mit jeweils unterschiedlicher Haushaltsgröße ausgewählt und durch ihre Lastgänge des Strom- und Wärmeverbrauchs charakterisiert.

Tabelle 3: Zusammensetzung des Jahresenergieverbrauchs der simulierten Gebäudetypen

	Einfamilienhaus (EFH)	Gebäude mit 8 Wohnungen (MFH8)	Gebäude mit 18 Wohnungen (MFH18)
Raumheizungskennzahl [kWh/m ² /a]	72	70	60
Wohnfläche [m ² /Wohnung]	110,5	70	100
Bruttogeschoßfläche [m ² /Wohnung]	147,5	93	133
resultierende Heizenergie für Raumwärme pro Jahr [kWh/a/Gebäude]	10.620	52.080	143.640
durchschn. Haushaltsgröße [Personen]	4	2	3
Brauchwasserbedarf bei 45°C (mittlerer Verbrauch) [l/d/Gebäude]	180	720	2.430
Benötigte therm. Energie für Brauchwassererwärmung [kWh/d/Gebäude] jährlich [kWh/a/Gebäude]	7 2.628	29 10.512	97 35.478
Summe thermische Energie [kWh/a/Gebäude]	13.248	62.592	179.118
Benötigte elektrische Energie [kWh/a/Gebäude]	3.705	22.120	58.950
Gesamter Jahresenergieverbrauch [kWh/a/Gebäude]	16.953	84.712	238.068

Der Stromverbrauch hängt von der Anzahl der in einer Wohnung lebenden Personen ab, der mittlere Jahresstromverbrauch wurde mithilfe von Kennzahlen des VEÖ [12] ermittelt. Beim Einfamilienhaus wurde zusätzlich während der Heizperiode eine Heizkreispumpe mit einer Leistung von 100 W berücksichtigt. Der

Wärmeverbrauch ist neben dem durch die Personenanzahl definierten Brauchwasserbedarf im Wesentlichen von der Raumheizungskennzahl, der Bruttogeschossfläche und der Außentemperatur abhängig. Zur Modellierung der Außentemperatur wurde ein Testreferenzjahr der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für den Standort Linz herangezogen. Der Brauchwasserbedarf wurde gemäß VDI 2067 [13] mit 45 Litern bei 45 °C pro Person und Tag angenommen. Der Jahresenergieverbrauch der zur Simulation verwendeten Gebäude ist in Tabelle 3 aufgeschlüsselt nach thermischer und elektrischer Energie angegeben.

Der zeitliche Verlauf der Wärmelastgänge wurde vereinfachend auf der Basis synthetischer Gaslastprofile der AGCS [14] für „Prozessgas Warmwasser“ sowie für „Heizgas“ für Ein- bzw. Mehrfamilienhäuser ermittelt, wobei auch der Verlauf der Außentemperatur gemäß dem Testreferenzjahr für Linz berücksichtigt wurde. Für den Verlauf des Lastgangs des Stromverbrauchs wurde für das Einfamilienhaus ein gemessener Lastgang eines Haushalts mit vier Personen verwendet, für die Mehrfamilienhäuser kamen synthetische Standardlastprofile der APCS [15] zur Anwendung.

Der Wärmespeicher wurde durch seine thermische Kapazität, vereinfacht beschrieben durch das Speichervolumen und den nutzbaren Temperaturbereich (50 °C – 70 °C), definiert, zusätzlich wurden die thermischen Verluste des Speichers berücksichtigt.

Um in Zeiten höheren Wärmebedarfs diesen decken zu können, wurde in der Simulation ein Gasbrennwertkessel berücksichtigt, dessen Nennleistung ausreichend dimensioniert ist, um das Gebäude im alleinigen Betrieb und ohne Zuhilfenahme des Wärmespeicher versorgen zu können.

Das simulierte BZH mit PEM-Technologie wird durch die in Abbildung 2 dargestellte Wirkungsgradkennlinie charakterisiert, deren Verlauf an die veröffentlichten Kennlinien verschiedener Hersteller angepasst ist. Das BZH erreicht im Nennbetriebspunkt einen Wirkungsgrad von 50 % thermisch und 30 % elektrisch. Insbesondere für den stromgeführten Betrieb ist die Regelbarkeit der elektrischen Leistung des BZH von großer Bedeutung, der Modulationsbereich wurde in der Simulation mit 30 % – 100 % der Nennleistung angenommen.

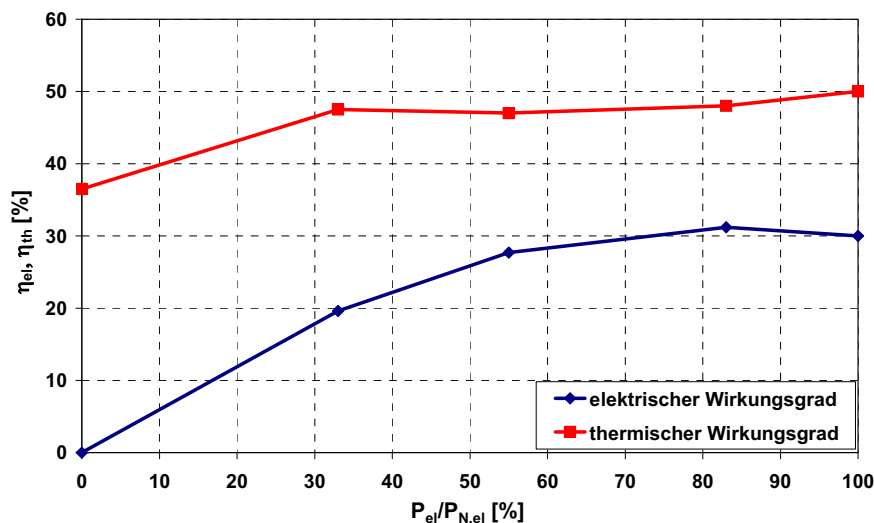


Abbildung 2: Wirkungsgradkennlinie des simulierten Brennstoffzellen-Heizgeräts

3.2 Ablauf der Simulation

Das primäre Ziel der Simulation ist die Ermittlung der bestmöglichen Dimensionierung von BZH und Wärmespeicher in Abhängigkeit des Gebäudetyps und der Betriebsart. Für die zuvor beschriebenen Gebäudetypen wurde dazu der Einsatz von BZH unterschiedlicher Leistungen über den Zeitraum eines Jahres simuliert, die zeitlichen Intervalle der Berechnungen betragen 15 min bzw. 1 h. Die Simulation wurde mit dem Programmpaket MATLAB durchgeführt.

Grundsätzlich wird zwischen stromgeführter und wärmegeführter Betriebsweise unterschieden. Bei ersterer wird die Brennstoffzelle dem Eigenstrombedarf des Gebäudes nachgeführt und daher eine Einspeisung elektrischer Energie in das öffentliche Netz vermieden. Bei Bedarf wird jedoch Strom aus dem Netz bezogen. Um eine ökonomische Betriebsweise zu erreichen, muss die dabei entstehende Wärme im Gebäude verbraucht oder im Wärmespeicher gespeichert werden. Kann die Wärme nicht mehr abgeführt werden, muss das BZH abschalten, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit und die Lebensdauer auswirkt. Beim wärmegeführten Betrieb wird das BZH entsprechend des Wärmebedarfs des Gebäudes betrieben, zeitweise entstehende

überschüssige elektrische Energie, die nicht im Gebäude verbraucht werden kann, wird in das öffentliche Netz eingespeist.

Die Temperaturgrenzwerte des Speichers ergeben sich aus der Warmwasser-Bereitstellungstemperatur von 45 °C und einem Temperaturgefälle von 5 °C für den Wärmetauscher. Die obere Grenztemperatur ist mit 70 °C festgelegt, da darüber hinaus eine ausreichende Kühlung der Brennstoffzelle nicht mehr gewährleistet wäre. Bei Unterschreiten einer Temperatur von 55 °C schaltet sich der Gasbrennwertkessel zusätzlich zum BZH ein und heizt bis zur Ausschaltgrenze auf, diese wurde für den Sommer mit 59 °C und für den Winter mit 67 °C festgelegt. Der niedrigere Ausschaltgrenzwert für den Sommer dient dazu, der Brennstoffzelle genügend Kapazität im Wärmespeicher für Zeiten geringen Wärmebedarfs zur Verfügung zu stellen.

Das BZH wird grundsätzlich mit voller Nennleistung betrieben. Wird im Speicher jedoch eine Temperatur von 67 °C überschritten, so wird die Leistung des BZH reduziert. Um den ungünstigen Betrieb bei sehr kleinen Leistungen zu vermeiden, wird das BZH jedoch immer mit mindestens 30 % der elektrischen Nennleistung betrieben. Schaltet das BZH aufgrund eines zu hohen Temperaturniveaus im Speicher ab, erfolgt ein Neustart erst dann, wenn wieder ausreichend Kapazität im Wärmespeicher vorhanden ist, um mindestens sechs Stunden durchgehenden Betrieb gewährleisten zu können. Eine detaillierte Beschreibung der Abläufe und Randbedingungen der Simulation können bei Ahammer [11] nachgelesen werden.

Die genannten Einstellungen sollen Richtwerte für die Simulation von BZH verschiedener Nennleistung berücksichtigen. Die im realen Einsatzfall auftretenden Betriebsbedingungen sind von der vor Ort gegebenen Anlagenkonfiguration und der Heizungsregelung abhängig und können daher von den simulierten Gegebenheiten abweichen.

In der Simulation wurden für jeden Gebäudetyp je nach Betriebsweise die Nennleistung des BZH und die Kapazität des Wärmespeichers variiert. Aus den Simulationsergebnissen können somit die erforderlichen Informationen für die jeweils bestmögliche Anlagendimensionierung gewonnen werden.

3.3 Ergebnisse

Anhand der Ergebnisse der Simulation können Aussagen über die Möglichkeiten des Einsatzes von Brennstoffzellen-Heizgeräten in Wohngebäuden unterschiedlicher Größe getroffen werden. Dies wird im Folgenden für den stromgeführten und wärmegeführten Betrieb getrennt erläutert.

3.3.1 Stromgeführter Betrieb

Beim stromgeführten Betrieb ist die elektrische Last im Gebäude die Führungsgröße. Dabei liefert die Brennstoffzelle maximal soviel elektrische Energie ins Hausnetz, dass der Eigenbedarf gedeckt ist. Da Blockheizkraftwerke aus ökonomischen Gründen auf Grundlast und nicht für die Spitzenlast ausgelegt werden, muss die über die Nennleistung der Brennstoffzelle hinaus benötigte elektrische Leistung anderweitig bezogen werden. Die Versorgung der Gebäude mit der benötigten Spitzenleistung erfolgt über das öffentliche Netz, weshalb auch die meisten BZH zur Hausenergieversorgung von den verschiedenen Herstellern für den Netzparallelbetrieb konzipiert werden.

Die bei der Umwandlung der chemischen Energie in elektrische Energie entstehende Wärme wird für Raumwärme und Brauchwassererwärmung verwendet. Da der Stack Temperaturanforderungen an das Kühlmedium stellt, ist die Temperatur der zur Verfügung gestellten Wärme nach oben hin begrenzt. Sie liegt bei der dieser Simulation zugrunde gelegten PEM-Brennstoffzelle bei etwa 70 °C. Da die Wärme das Koppelprodukt der Stromerzeugung darstellt, kann die thermische Leistung des BZH nicht unabhängig geregelt werden. Dies hat zur Folge, dass bei einem niedrigen thermischen Verbrauch und bei einer hohen Speichertemperatur, die über der des erlaubten Betriebsbereichs der Brennstoffzelle liegt, das System abgeschaltet werden muss. Die dabei verursachten Betriebszyklen, darunter wird ein Ein- und Ausschaltvorgang verstanden, wirken sich negativ auf die Lebensdauer aus. Ein weiterer Nachteil der Abschaltung ist die benötigte Zeitspanne, in welcher der zur Gasaufbereitung benötigte Reformier aufgeheizt werden muss, wodurch die Brennstoffzelle während dieser Zeitspanne keine Energie liefern kann. In der Simulation wurde diese Aufheizzeit mit 3 h angenommen.

Beim stromgeführten Betrieb der Brennstoffzelle in einem Einfamilienhaus mit einem Jahresverbrauch von 13.250 kWh Wärme und 4.190 kWh elektrischer Energie (inkl. Heizkreispumpe) ergibt die Simulation eine optimale Nennleistung des BZH von nur 0,4 kW_{el} und 0,67 kW_{th}. Bei dieser Nennleistung ist ein Speicher mit einem Volumen von 500 Liter ausreichend. Bei dieser Nennleistung beträgt die jährliche Eigenstromerzeugung 2080 kWh_{el}, das sind 50 % des Jahresstromverbrauchs. Aufgrund der niedrigen elektrischen Leistung ist daher nur eine geringe Energiekosteneinsparung zu erwarten. Im Winter kann das BZH durchgehend betrieben

werden, um den Wärmebedarf zu decken ist zusätzlich der Gaskessel in Betrieb. Während der Übergangszeit und im Sommer sinkt die (gemessene) elektrische Last des Einfamilienhauses teilweise auf nur 40 W ab, was jedes Mal zum Ausschalten des BZH führt. Die häufigen Stillstandszeiten und die daraus resultierende verminderte Wärmeproduktion der Brennstoffzelle führen dazu, dass während der Sommermonate das Brauchwasser mit Hilfe des Gaskessels erhitzt werden muss. Aufgrund der häufigen Ausschaltvorgänge in Zeiten geringen Wärmebedarfs, und durch das Abschalten der Heizkreispumpe ebenfalls niedrigen Strombedarfs, erreicht das BZH über 500 Schaltzyklen in einem Betriebsjahr. Die Simulation zeigt deutlich, dass in einem Einfamilienhaus nicht nur der geringe Wärmeverbrauch im Sommer, sondern vor allem der sehr geringe Stromverbrauch ein Problem darstellt. Zusammenfassend lässt die Simulation daher den Schluss zu, dass der stromgeführte Betrieb eines BZH in einem Einfamilienhaus als wenig sinnvoll zu erachten ist.

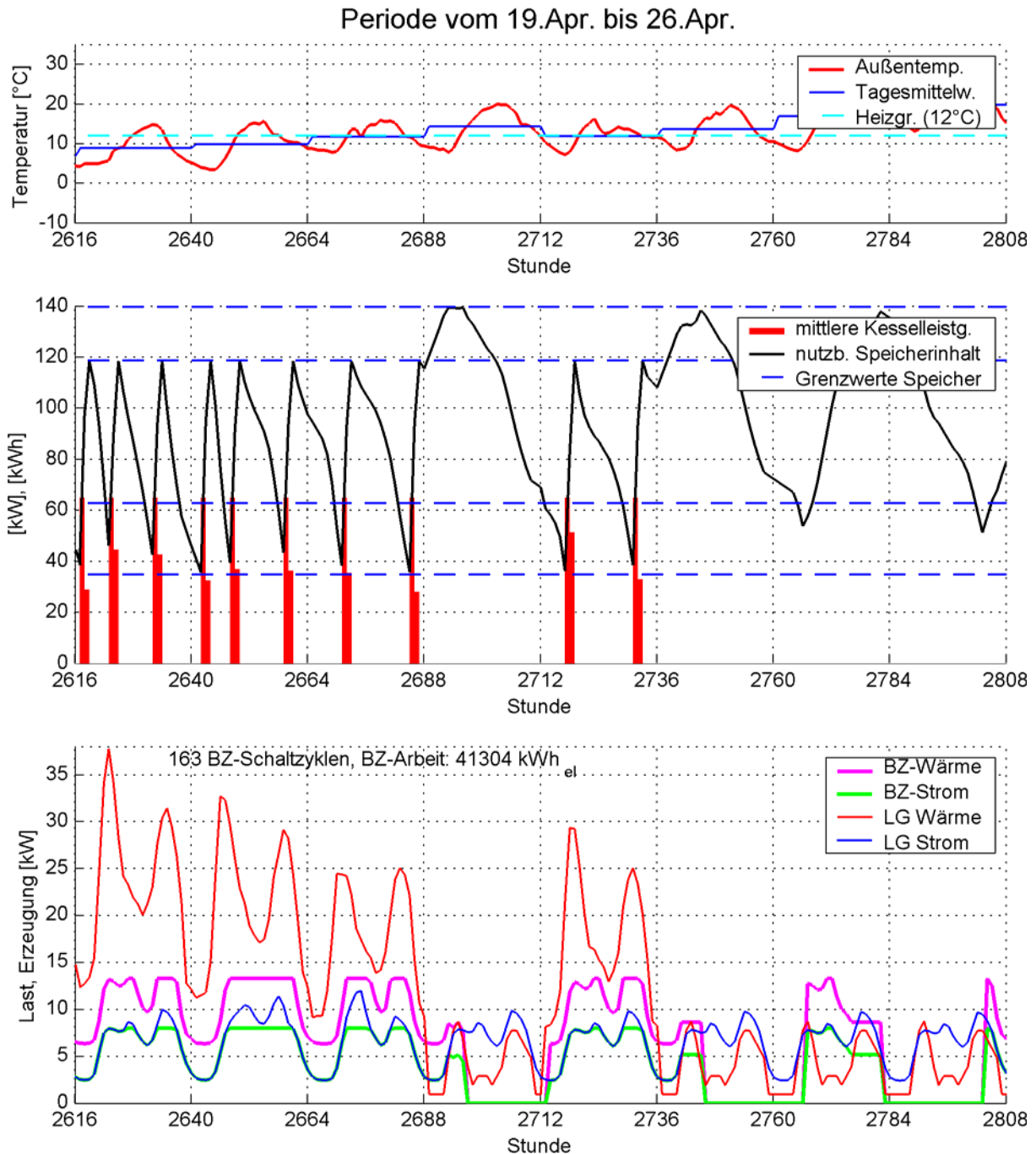


Abbildung 3: Simulation des stromgeführten Betriebs eines Brennstoffzellen-Heizgerätes in einem Wohngebäude mit 18 Wohnungen in der Übergangszeit. Eckdaten: BZH-Leistung 8 kW_{el} / 13,3 kW_{th}, Kesselleistung 65 kW_{th}, Speichervolumen 6.000 l, Freitag bis Freitag (vgl. Ahammer [11]).

Beim simulierten Mehrfamilienhaus mit 18 Wohnungen und durchschnittlich drei Personen pro Haushalt beträgt der jährliche Wärmeverbrauch 179.100 kWh_{th} und der Stromverbrauch 58.950 kWh_{el}. In Abbildung 3

ist die Simulation des Betriebs eines Brennstoffzellen-Heizgeräts mit einer Nennleistung von 8 kW_{el} und $13 \text{ kW}_{\text{th}}$ in der Übergangszeit abgebildet. Die optimale Speichergröße beträgt in diesem Fall 6.000 Liter. Die elektrische Last liegt in Spitzenzeiten über der elektrischen Nennleistung der Brennstoffzelle, weshalb die fehlende Energie aus dem Netz bezogen werden muss. Liegt der Stromverbrauch im Gebäude unter der Nennleistung, fährt das BZH im Teillastbetrieb, die Teillastgrenze der BZ von 30 % wird jedoch nicht unterschritten. Während der ersten drei Tage des dargestellten Zeitraums reicht die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme nicht aus, um den Bedarf im Gebäude zu decken, weshalb der Gaskessel zeitweise parallel betrieben werden muss. Am vierten Tag steigen die Außentemperaturen und die Heizung wird abgeschaltet. Da der Wärmespeicher zu diesem Zeitpunkt eine Temperatur von 67 °C (ca. 120 kWh) erreicht hat, fährt die Brennstoffzelle in Teillast zurück und muss schließlich ganz abschalten, da der Speicher die Temperaturgrenze von 70 °C (140 kWh) erreicht hat. Am darauf folgenden kalten Tag wird wieder geheizt, der Wärmeverbrauch steigt und das BZH kann wieder betrieben werden. Im Sommer wird das BZH nicht nur durch einen vollen Speicher sondern auch wegen eines zu niedrigen Stromverbrauchs während der Nachtstunden ein mal täglich abgeschaltet, kann jedoch während dieser Jahreszeit das gesamte Gebäude mit Brauchwasser versorgen. Bei der in diesem Gebäude eingesetzten Kombination von Speicher und BZH werden im Jahr $41.300 \text{ kWh}_{\text{el}}$ Strom und $70.400 \text{ kWh}_{\text{th}}$ Wärme durch das BZH erzeugt, was 70 % des Stromverbrauchs und 39 % des Wärmeverbrauchs im Gebäude entspricht.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Simulation für dieses Gebäude mit Brennstoffzellen verschiedener Nennleistung bei einem Speicher mit konstantem Volumen dargestellt. Die jährliche Stromerzeugung des eingesetzten BZH steigt mit zunehmender Nennleistung anfangs kontinuierlich an, ist bei einer Nennleistung von 8 bis $14 \text{ kW}_{\text{el}}$ weitgehend konstant und sinkt bei höheren Leistungen wieder ab.

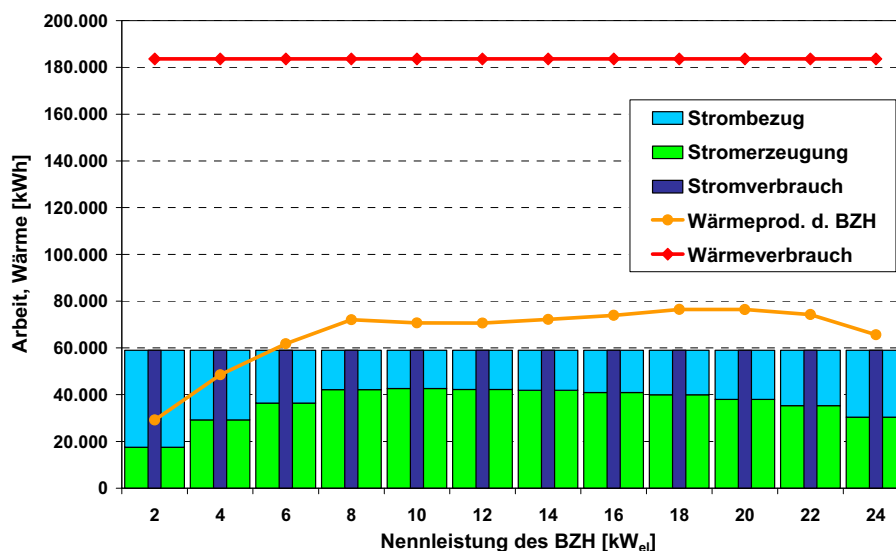


Abbildung 4: Jährliche Eigenenergieerzeugung und Fremdbezug elektrischer Energie bei der Versorgung eines Wohngebäudes mit 18 Wohnungen mit Brennstoffzellen-Heizgeräten verschiedener Nennleistungen im stromgeführten Betrieb

Der Verlauf der Eigenstromerzeugung in Abbildung 4 kann mit Hilfe von Abbildung 5 erläutert werden. Bei einer Nennleistung von 2 kW_{el} kann das BZH durchgehend in Volllast betrieben werden, eine Abschaltung aufgrund zu geringer Last tritt nicht auf. Bei einer Nennleistung von 4 kW_{el} kann das BZH noch durchgehend betrieben werden, in Schwachlastzeiten muss jedoch die Leistung reduziert werden. Bei einer Nennleistung von 6 kW_{el} ist ein voller Wärmespeicher während der Sommermonate der einzige Abschaltgrund, bei 8 kW_{el} kommt ein zu niedriger Stromverbrauch während der Nachtstunden hinzu, sodass in der warmen Jahreshälfte täglich einmal abgeschaltet werden muss. Bei einer Nennleistung von $10 \text{ kW}_{\text{el}}$ muss das BZH ganzjährig aufgrund zu geringen Stromverbrauchs täglich in den Nachtstunden abschalten. Im Sommer tritt zudem das Problem auf, dass mehr Wärme produziert wird, als im Gebäude benötigt wird. Bei noch größeren Nennleistungen ist das BZH bereits überdimensioniert und die Stillstandszeiten werden immer länger, wodurch auch die Zahl der Schaltzyklen sinkt. Bei einer Nennleistung von $18 \text{ kW}_{\text{el}}$ wird auch der zu geringe Strombedarf während der Tagesstunden im Sommer zu einem Abschaltgrund.

Die optimale Größe eines BZH zur Versorgung des Gebäudes mit 18 Wohnungen im stromgeführten Betrieb liegt somit bei einer Nennleistung zwischen 4 kW_{el} und 8 kW_{el} . Mit einer höheren Nennleistung kann

keine weitere Erhöhung der Eigenzeugung erzielt werden. Das wirtschaftliche Optimum kann in diesem Bereich durch eine Investitionsrechnung (siehe Kapitel 4) ermittelt werden.

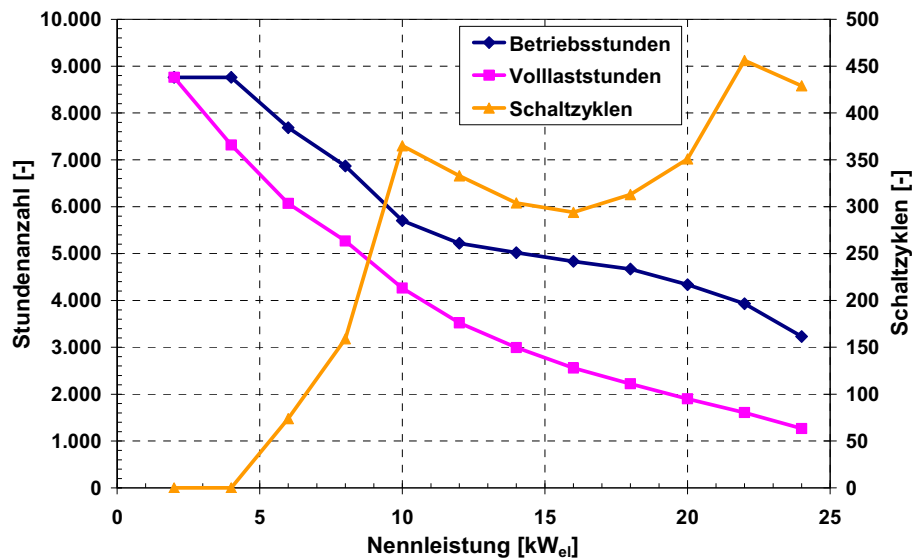


Abbildung 5: Einfluss der Nennleistung auf die Betriebs- und Volllaststunden sowie die Schalthäufigkeit in der Simulation eines Brennstoffzellenheizgerätes im stromgeführten Betrieb zur Versorgung eines Gebäudes mit 18 Wohnungen.

3.3.2 Wärmegeführter Betrieb

Beim wärmegeführten Betrieb ist die thermische Last im Gebäude die Führungsgröße. Dabei liefert die Brennstoffzelle soviel thermische Energie ins Heizsystem, wie gerade verbraucht wird, bzw. wenn der Wärmespeicher leer ist, bis dieser wieder seine Maximaltemperatur erreicht hat. Die gekoppelt erzeugte elektrische Leistung kann im Normalfall nicht unabhängig von der Wärmeerzeugung geregelt werden. Somit muss bei niedrigem Stromverbrauch im Gebäude zwangsläufig in das öffentliche Netz eingespeist werden. Deshalb kann, im Gegensatz zum stromgeführten Betrieb, die jährliche Eigenstromerzeugung den Gesamtverbrauch an elektrischer Energie übersteigen. Die jährliche Wärmeerzeugung der Brennstoffzelle kann im Gegensatz zur Stromerzeugung den Jahreswärmeverbrauch des Gebäudes nicht überschreiten, da der Sollwert der thermischen Leistung des BZH maximal dem Wärmebedarf des Gebäudes entspricht. Die optimale Nennleistung einer KWK im wärmegeführten Betrieb hängt stark von den gebotenen Einspeisetarifen für die elektrische Arbeit ab, eine Dimensionierung ausschließlich nach technischen Gesichtspunkten kann daher nur ungefähre Richtwerte ermitteln.

Beim wärmegeführten Betrieb im simulierten Einfamilienhaus mit einem Jahresenergieverbrauch von 4.190 kWh_{el} und 13.250 kWh_{th} führt ein Brennstoffzellen-Heizgerät mit einer Nennleistung von 1 kW_{el} und 1,67 kW_{th} zum geringsten Strombezug aus dem öffentlichen Netz. Das technisch optimale Speichervolumen beträgt hier bereits 700 Liter. Im Winter kann dieses BZH durchgehend betrieben werden, der überschüssige Strom wird dabei in das öffentliche Netz gespeist. Im Sommer wird der Betrieb des BZH durch den geringen Brauchwasserbedarf eingeschränkt, sodass es zu längeren Stillstandszeiten kommt. Während dieser Stillstandszeiten muss die gesamte elektrische Energie aus dem Netz bezogen werden. Es treten rund 120 Schaltzyklen pro Jahr auf. Das BZH erzeugt 67 % der im Gebäude benötigten thermischen Energie und 138 % der elektrischen Energie. Zugleich muss 40 % der elektrischen Energie aus dem Netz bezogen werden, die Netzeinspeisung beträgt somit 78 % des Jahresstromverbrauches. Aufgrund der geringen Nennleistung und der hohen Menge an ins Netz eingespeister Energie erscheint der Einsatz eines BZH in einem Einfamilienhaus auch im wärmegeführten Betrieb als wenig sinnvoll, solange keine attraktiven Einspeisetarife vorhanden sind.

Im simulierten Mehrfamilienhaus mit 8 Wohnungen liegt der jährliche Wärmebedarf bei 62.600 kWh_{th} und der Stromverbrauch bei 22.100 kWh_{el}. Wird für dieses Gebäude ein Brennstoffzellen-Heizgerät mit dem Ziel ausgelegt, dass im wärmegeführten Betrieb die vom Netz bezogene Strommenge minimiert wird, so erhält man eine Nennleistung von 4,5 kW_{el} und 7,5 kW_{th}, das erforderliche Wärmespeichervolumen beträgt 3.000 Liter. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt der Simulationsergebnisse für die beschriebene Konfiguration. Das BZH kann bei dieser Auslegung aufgrund des wärmegeführten Betriebs den ganzen Winter durchgehend mit Nennleistung betrieben werden, die zusätzlich benötigte thermische Energie wird durch den Heizkessel erzeugt. Die erzeugte elektrische Leistung ist in der Regel höher als der Stromverbrauch im Gebäude,

weswegen nahezu ständig Strom in das öffentliche Netz gespeist wird. Bei steigenden Außentemperaturen und sinkendem Wärmeverbrauch kann beinahe die gesamte benötigte Wärmeenergie vom BZH geliefert werden. Der Pufferspeicher ermöglicht dabei den Ausgleich zwischen Zeiten hohen und niedrigen Wärmeverbrauchs. Der Spitzenkessel wird in der Übergangszeit und im Sommer kaum mehr benötigt. In der heizfreien Zeit ist das BZH für einen durchgehenden Betrieb zu groß dimensioniert und muss daher regelmäßig abgeschaltet werden. Bei der angegebenen Dimensionierung von BZH und Wärmespeicher schaltet das BZH im Sommer etwa jeden zweiten Tag für einige Stunden ein, um den Speicher zu füllen. Die gewählte Nennleistung der Brennstoffzelle ist so groß, dass auch bei sehr großem Wärmespeicher ein Abschalten des BZH nach gewisser Zeit nötig wäre, da die produzierte Wärme auch im Teillastbetrieb den Wärmebedarf übersteigt. Durch einen größeren Speicher könnte lediglich die Schalthäufigkeit reduziert werden.

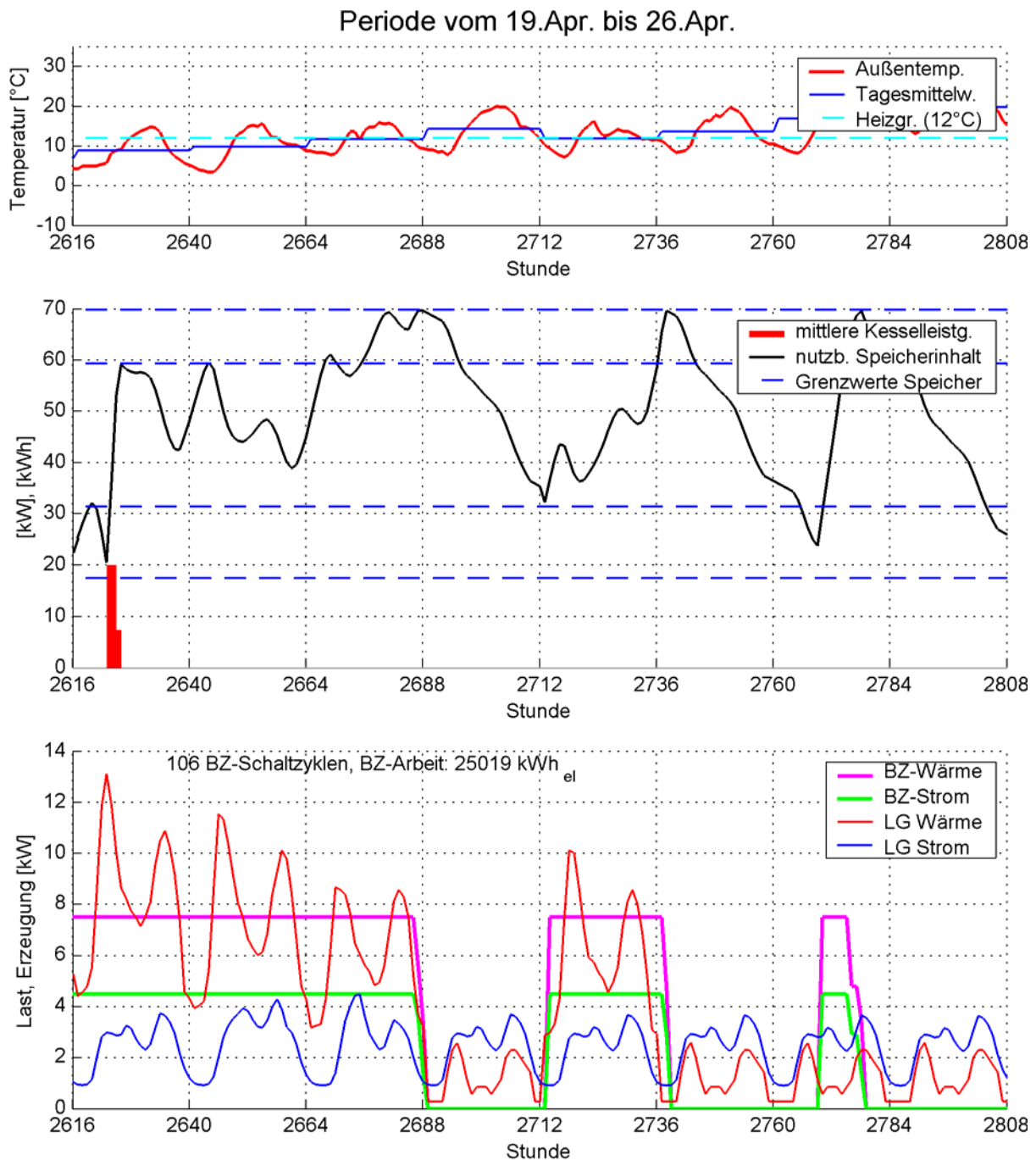


Abbildung 6: Simulation des wärmegeführten Betriebs eines Brennstoffzellen-Heizgerätes in einem Wohngebäude mit 8 Wohnungen in der Übergangszeit. Eckdaten: BZH-Leistung 4,5 kW_{el} / 7,5 kW_{th}, Kesselleistung 20 kW_{th}, Speichervolumen 3.000 l, Freitag bis Freitag (vgl. Ahammer [11]).

Betrachtet man in Abbildung 7 den Fremdstrombezug aus dem Netz in Abhängigkeit der elektrischen Nennleistung der Eigenerzeugungsanlage, so erkennt man, dass bei einer Nennleistung von 4 kW_{el} am

wenigsten Strom aus dem Netz bezogen wird. Mit zunehmender Leistung steigt der Strombezug aus dem Netz wieder an, da das BZH in der warmen Jahreszeit öfter abgeschaltet werden muss. Durch die höhere Leistung wird jedoch vor allem in der kalten Jahreshälfte mehr Strom ins Netz geliefert, die Zeitdauer, welche das BZH außer Betrieb ist, wird hingegen wegen der Wiedereinschaltbedingung immer länger.

Ab einer Leistung von 10 kW_{el} kann theoretisch – mit Ausnahme kurzer Spitzenlastzeiten im Winter – unter Zuhilfenahme des Pufferspeichers beinahe die gesamte thermische Energie durch das BZH aufgebracht werden.

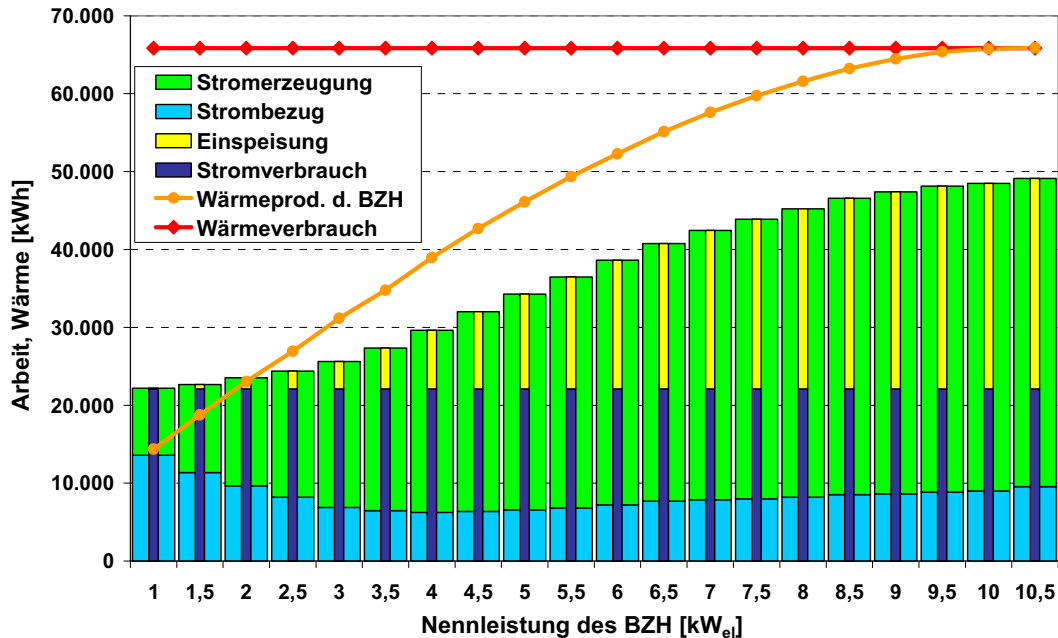


Abbildung 7: Jährliche Eigenerzeugung, Fremdbezug und Netzeinspeisung elektrischer Energie bei der Versorgung eines Wohngebäudes mit 8 Wohnungen mit Brennstoffzellen-Heizgeräten verschiedener Nennleistungen im wärmegeführten Betrieb.

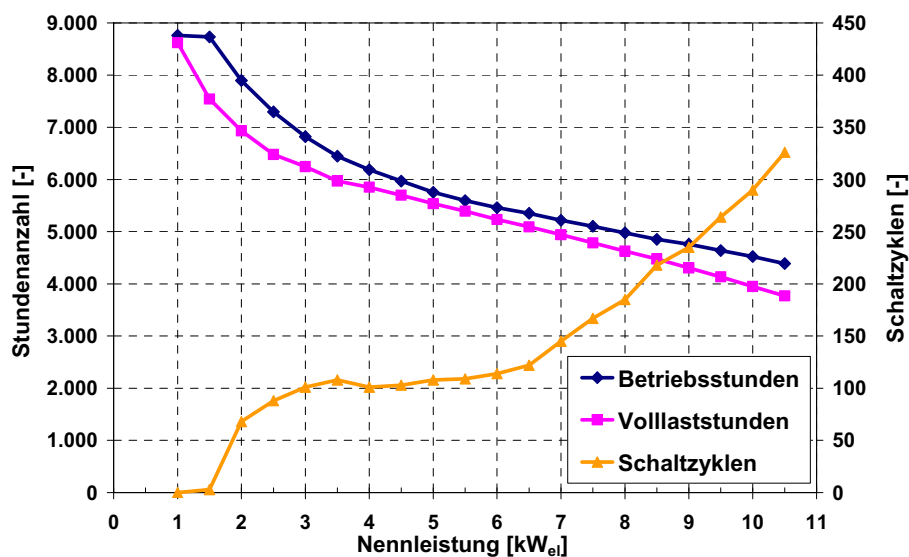


Abbildung 8: Einfluss der Nennleistung auf die Betriebs- und Volllaststunden sowie die Schalzhäufigkeit in der Simulation eines Brennstoffzellenheizgeräts im wärmegeführten Betrieb zur Versorgung eines Gebäudes mit 8 Wohnungen.

Der in Abbildung 8 dargestellte Einfluss der Nennleistung auf die Betriebsstunden, Volllaststunden sowie Schaltzyklen des BZH zeigt in allen drei simulierten Gebäudetypen einen ähnlichen Verlauf. Bei kleiner Nennleistung ist ein beinahe durchgängiger Betrieb des BZH möglich, bei zunehmender Leistung werden im Sommer aufgrund des geringen Wärmebedarfs einige Abschaltungen erforderlich. Bei weiter steigender Leistung sinkt die Betriebsdauer während der Sommermonate ab, die Anzahl der Abschaltungen bleibt jedoch nahezu konstant, da diese in den Sommermonaten durch den Pufferspeicher vorgegeben sind. Ab einer Nennleistung von etwa $6,5 \text{ kW}_{el}$ steigt die Anzahl der Abschaltungen an, da der zu geringe Wärmebedarf in der

Übergangszeit und bei steigender Leistung auch im Winter ein häufiges Abschalten bedingt. Bis zu einer Leistung von $10 \text{ kW}_{\text{el}}$ liegt die Anzahl der Volllaststunden über 4.000 h/a.

3.3.3 Schlussfolgerungen

Wie die dargestellten Fallbeispiele demonstrieren, ist der Betrieb von Brennstoffzellen-Heizgeräten in Einfamilienhäusern schwer zu realisieren. Im stromgeführten Betrieb stellt die geringe elektrische Grundlast in Kombination mit den kurzzeitigen Belastungsspitzen der elektrischen Verbraucher das wesentliche Hindernis dar. Im wärmegeführten Betrieb ist der entsprechende Wärmeverbrauch eines Einfamilienhauses nur während der Heizperiode gegeben. Die genannten Umstände erlauben nur niedrige Nennleistungen von max. 1 kW_{el} und führen zu geringer jährlicher Auslastung. Die Wirtschaftlichkeit der Anlagen im Einfamilienhaus ist aufgrund der geringen Nennleistungen, die hier eingesetzt werden können, in Frage zu stellen, da die Kosten für Installation und Inbetriebnahme, sowie die Kosten für Mess- Steuer und Regeleinrichtungen nur sehr gering von der Nennleistung des BZH abhängig sind, sich jedoch bei einer geringen erzeugten Jahresenergiemenge auf die spezifischen Erzeugungskosten beträchtlich auswirken. Der Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen in Einfamilienhäusern erscheint daher beim derzeitigen Stand der Technologie sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht wenig Erfolg versprechend.

Bei Wohngebäuden mit mehreren Wohnungen ist der Einsatz von BZH aus technischer Sicht möglich, da genügend Grundlast für eine jährliche Auslastung von mindestens 5.000 Volllaststunden gegeben ist. Für die simulierten Fallbeispiele des Einsatzes eines BZH in einem Wohngebäude mit 8 Wohnungen bzw. mit 18 Wohnungen sind die Ergebnisse jeweils für strom- und wärmegeführte Betriebsart in Tabelle 4 gegenübergestellt. Trotz der im wärmegeführten Betrieb höheren Nennleistungen des BZH ist die Schalthäufigkeit deutlich geringer, da als einzige Ausschaltbedingung eine fehlende thermische Last in den Sommermonaten zum Tragen kommt. Im stromgeführten Betrieb stellen hingegen die elektrischen Schwachlastzeiten eine Ursache für häufiges Abschalten des BZH dar. Beim wärmegeführten Betrieb ist die elektrische Eigenenerzeugung höher als im stromgeführten Betrieb, ein Teil des erzeugten Stromes muss jedoch ins öffentliche Netz eingespeist werden. Insgesamt ergibt sich im wärmegeführten Betrieb erwartungsgemäß eine höhere realisierbare Nennleistung und eine höhere Anzahl jährlicher Volllaststunden bei gleichzeitig geringerer Schalthäufigkeit als im stromgeführten Betrieb. Aus technischer Sicht ist also der wärmegeführte Betrieb eindeutig zu bevorzugen. Sowohl in wärmegeführter als auch in stromgeführter Betriebsweise ergeben sich Probleme in den Sommermonaten aufgrund des zu geringen Wärmebedarfs.

Das Volumen des Pufferspeichers hat ab einer bestimmten Mindestgröße kaum mehr wesentliche Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Anlage.

Tabelle 4: Übersicht über die Parameter und Ergebnisse der Simulation des Betriebs von Brennstoffzellen-Heizgeräten in unterschiedlichen Gebäudetypen

Gebäudetyp			Gebäude mit 8 Wohnungen		Gebäude mit 18 Wohnungen	
Betriebsart des Brennstoffzellen-Heizgeräts			stromgeführt	wärmegeführt	stromgeführt	wärmegeführt
Jahresenergieverbrauch E_0	elektrisch	[kWh]	22.120	22.120	58.950	58.950
	thermisch	[kWh]	64.320	64.590	181.950	182.170
Nennleistung des BZH	elektrisch	[kW]	3	4,5	8	10
	thermisch	[kW]	5,0	7,5	13,3	16,7
Volumen des Wärmespeichers		[l]	2.250	3.000	6.000	7.000
produzierte Energie	elektrisch	[kWh]	14.960	25.020	41.300	58.770
		[% E_0]	68	113,1	70	99,7
	thermisch	[kWh]	25.500	41.700	70.410	98.050
		[% E_0]	40	65	39	54
Strombezug	[kWh]	7.165	7.050	17.650	18.370	
	[% E_0]	32	31,9	30	31,2	
Stromeinspeisung		[kWh]	0	9.950	0	18.190
Anzahl der Schaltzyklen		[-]	163	106	163	121
Betriebsstunden		[h]	6.382	5.650	6.610	6.040
Volllaststunden		[h]	4.987	5.560	5.163	5.877

4 Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellen-Heizgeräten als Mikro-KWK im Wohnbereich

Ist die Möglichkeit des Einsatzes eines BZH durch einen entsprechenden Bedarf an thermischer und elektrischer Energie von technischer Seite gegeben, so muss anschließend die Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Ob der Betrieb einer Mikro-KWK im Wohnbereich wirtschaftlich werden kann, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Dabei spielen neben den Investitionskosten die Kosten für die bezogene Energie, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie die geforderte Verzinsung eine Rolle. Die Lebensdauer des Systems und die erreichbare Vollaststundenzahl pro Jahr sind ebenfalls sehr wichtige Größen, die in die Berechnung mit einfließen. Bei der stromgeführten Betriebsweise stellen die vermiedenen Strombezugskosten den finanziellen Nutzen des BZH dar, beim wärmegeführten Betrieb kann durch die Einspeisung von Strom in das öffentliche Netz bei entsprechender Vergütung ein zusätzlicher Nutzen entstehen. Dabei sind die gebotenen Einspeisetarife von wesentlicher Bedeutung.

4.1 Annahmen

Für die zuvor simulierten Einsatzfälle von BZH in Mehrparteienwohnhäusern wird in Folge eine Berechnung der für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlichen maximalen spezifischen Investitionskosten durchgeführt. Als Eingangsdaten der Wirtschaftlichkeitsrechnung dienen Energiebezugpreise für österreichische Haushalte im Jänner 2007. Die Kosten für den Strombezug setzen sich aus Energiepreis, Netzpreis sowie Steuern und Abgaben zusammen. Die variablen Strombezugskosten werden in den folgenden Berechnungen mit 16 ct/kWh_{el} brutto angenommen, sämtliche Fixkosten mit 25,00 €/a zuzüglich dem jeweiligen Entgelt für die Messleistungen, welches vom eingesetzten Zähler abhängig ist. Die spezifischen Kosten für den Strombezug sind in den Berechnungen unabhängig vom Jahresverbrauch angenommen, was der Realität im Bereich der Haushaltskunden entspricht.

Die Vergütung der Einspeisung elektrischer Energie in das öffentliche Netz ist von der Jahreszeit, eingeteilt in Sommertarif und Wintertarif, und von Wochentag bzw. Tageszeit, eingeteilt in Hochtarif- und Niedertarifzeit, abhängig. Weiters erfolgt eine Unterscheidung nach Einspeiseart und eine Unterteilung in Überschusseinspeiser und Volleinspeiser. Im beschriebenen Fall des wärmegeführten Betriebs des BZH ist eine Überschusseinspeisung vorliegend, die Einspeisetarife liegen hier je nach Tarifzeit im Bereich von rund 2,3 bis 4,8 ct/kWh_{el}. (Stand Anfang 2007)

Die Kosten für den Bezug von Erdgas setzen sich aus Energiepreis und Netzpreis sowie Steuern und Abgaben zusammen. Die variablen Kosten für den Bezug von Erdgas sind für Haushaltskunden in der Regel von der jährlichen Bezugsmenge abhängig. Die für die Berechnung verwendeten Werte wurden in Anlehnung an die Tarife eines österreichischen Stadtwerkes gewählt und sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Fixkosten für den Gasbezug wurden mit 50,00 €/a angenommen. In den angegebenen Werten sind alle Steuern und Abgaben berücksichtigt.

Tabelle 5: angenommene Bruttobezugskosten für Erdgas, bezogen auf den Brennwert

Jahresbezugsmenge	Gaskosten
0 - 8.000 kWh	6,57 ct/kWh
8.001 -15.000 kWh	5,50 ct/kWh
15.001 - 40.000 kWh	5,35 ct/kWh
40.001 - 80.000 kWh	5,02 ct/kWh
80.001 - 200.000 kWh	5,00 ct/kWh

Für die folgende Wirtschaftlichkeitsrechnung wird die Differenz der Energiebezugskosten zwischen dem Ausgangsfall der Versorgung des Wohngebäudes ohne BZH bzw. der Variante der Versorgung mittels BZH und Spitzenkessel betrachtet. Somit sind für die Wirtschaftlichkeitsrechnung die jeweiligen Grenzkosten des Strom- und Gasbezugs von besonderer Relevanz, diese betragen für elektrische Energie 16,00 ct/kWh_{el} bzw. gemäß Tabelle 5 für Erdgas 5 ct/kWh. Die Gesamtinvestitionskosten des BZH inklusive der Installationskosten sind als Zusatzinvestitionen anzusehen, welche durch verringerte Energiebezugskosten finanziert werden müssen.

4.2 Betriebsweise des Brennstoffzellen-Heizgeräts

In den nächsten beiden Kapiteln erfolgt eine grundlegende wirtschaftliche Betrachtung, welche Aufschluss über eine wirtschaftlich sinnvolle Betriebsweise geben und die Anforderungen an die zukünftigen Zielwerte für Gesamtinvestitionskosten von Brennstoffzellen-Heizgeräten – aus heutiger Sichtweise – klären soll.

In der KWK wird die chemische Energie des Energieträgers Erdgas in die Energieformen Strom und Wärme umgewandelt. Die exakte Aufteilung der Kosten des eingesetzten Erdgases auf die erzeugten Energieformen stellt eine Kuppelproduktkalkulation dar, welche gemäß Mandl [16] nicht nach dem Verursacherprinzip lösbar ist und in der Praxis nur mittels Näherungsmethoden durchgeführt werden kann, welche teilweise Anlass zur Diskussion geben. Zur Gewährleistung eines wirtschaftlich erfolgreichen Betriebs der KWK-Anlage ist dennoch die Definition einfacher Grenzwerte nötig, um je nach Kostensituation entscheiden zu können, ob das BZH betrieben werden soll oder besser abgestellt wird. Daher soll in Folge kurz dargestellt werden, ab welchem Mindeststrompreis durch den Betrieb einer Mikro-KWK-Anlage Deckungsbeiträge erwirtschaftet werden.

Eine Mikro-KWK-Anlage im Haushaltbereich wird stets in Kombination mit einem Spitzenkessel betrieben werden, die Leistung des Spitzenkessels wird so groß dimensioniert, dass bei Ausfall oder Wartung der Mikro-KWK-Anlage der gesamte Wärmebedarf des Gebäudes vom Spitzenkessel gedeckt werden kann. Ein konventioneller Gasbrennwertkessel als Spitzenkessel mit einem brennwertbezogenen Wirkungsgrad von 95,5 % kann aus 1000 kWh Erdgas 955 kWh_{th} Wärme erzeugen. So ergeben sich beispielsweise bei einem Erdgaspreis von 5 ct/kWh für die Wärmeerzeugung variable Kosten von 5,235 ct/kWh_{th}. Diese variablen Kosten der alternativen Wärmeerzeugung stellen aus der Sicht des Betreibers einer Mikro-KWK-Anlage den maximalen Wert der in KWK erzeugten Wärme dar.

Ein Brennstoffzellen-Heizgerät mit einem Wirkungsgrad von 30 %_{el} und 50 %_{th} (brennwertbezogen 27 %_{el} und 45 %_{th}) erzeugt aus Erdgas mit einem Brennwert von 1000 kWh und variablen Bezugskosten von 50,00 € (5 ct/kWh) im Nennbetrieb 270 kWh Strom und 450 kWh Wärme. Die Kosten für die Erzeugung der gleichen Wärmemenge mit einem Gasbrennwertkessel würden sich auf 23,56 € belaufen. Die verbleibende Kostendifferenz von 26,44 € muss durch die erzeugte Strommenge von 270 kWh gedeckt werden, was einem Mindestwert von 9,79 ct/kWh_{el} entspricht. Werden auch die Wartungs- und Instandhaltungskosten mit einer angenommenen Höhe von 1,5 ct/kWh_{el} berücksichtigt, steigt dieser Mindestwert auf 11,29 ct/kWh_{el}.

Allgemein kann bei dieser Betrachtungsweise der Mindest-Strombezugspreis, ab welchem der Betrieb einer Mikro-KWK-Anlage Deckungsbeiträge erwirtschaftet, nach der folgenden Formel errechnet werden.

$$k_{el,gr} = \frac{k_{BS} - \eta_{th} \cdot k_{th,alt}}{\eta_{el}} + k_w$$

$k_{el,gr}$ wirtschaftliche Grenze des Strompreises (Mindestwert) [ct/kWh]

k_{BS} Brennstoffkosten, brennwertbezogen [ct/kWh]

$k_{th,alt}$ Kosten der Wärmeerzeugung im Gaskessel [ct/kWh]

η_{th} thermischer Wirkungsgrad des BZH, brennwertbezogen [-]

η_{el} elektrischer Wirkungsgrad des BZH, brennwertbezogen [-]

k_w Kosten für Wartung und Instandhaltung sowie allfällige zusätzliche variable Kosten [ct/kWh]

Ist der Strombezugspreis geringer als die errechnete Wirtschaftlichkeitsgrenze, so ist es billiger, die Mikro-KWK-Anlage abzustellen und den benötigten Strom aus dem Netz zu beziehen sowie die benötigte Wärme im Gaskessel (Spitzenkessel) zu erzeugen.

Beim wärmegeführten Betrieb müssen die Energiekosten in Abhängigkeit der momentanen Gebäudelast durch verminderten Strombezug und durch die Vergütung der Einspeisung in das öffentliche Netz gedeckt werden. Die Wirtschaftlichkeitsgrenze nach der angegebenen Formel ergibt zugleich den Mindesteinspeisetarif, ab welchem im wärmegeführten Betrieb bei Einspeisung ins öffentliche Stromnetz Deckungsbeiträge erwirtschaftet werden.

Derzeit liegen die Strombezugskosten für Privathaushalte in Österreich über der errechneten Wirtschaftlichkeitsgrenze, die Einspeisetarife jedoch deutlich darunter. Somit bedeutet jede in das öffentliche Netz eingespeiste Kilowattstunde einen wirtschaftlichen Verlust für den Betreiber einer Mikro-KWK-Anlage. Die Einspeisung von KWK-Strom aus Mikro-KWK-Anlagen in das öffentliche Netz erscheint aus wirtschaftlicher

Sicht unter den momentanen Rahmenbedingungen in Österreich daher nicht sinnvoll. Der wärmegeführte Betrieb eines BZH mit Netzeinspeisung der überschüssigen Eigenerzeugung wäre zwar aus technischer Sicht vorteilhaft, aus wirtschaftlicher Sicht ist jedoch die stromgeführte Betriebsweise zu bevorzugen. Eine Ausnahme kann jener Fall darstellen, wenn im wärmegeführten Betrieb durch kurzzeitige Netzeinspeisung eine Abschaltung mit anschließendem längeren Stillstand des BZH vermieden werden kann.

4.3 Investitionsrechnung

Auf Basis der in Tabelle 4 zusammengefassten Simulationsergebnisse wurde für den stromgeführten Betrieb des BZH in einem Gebäude mit 18 Wohnungen mittels Kapitalwertmethode eine Berechnung der erforderlichen Zielkosten der spezifischen Investitionskosten durchgeführt.

Da die momentan erhältlichen Brennstoffzellen-Heizgeräte noch durchwegs für Entwicklungs-, Forschungs- oder Demonstrationszwecke betrieben werden, sind die Preise der Geräte naturgemäß hoch und können nicht als Grundlage für eine Investitionsrechnung dienen. Deswegen wird hier von den für die vorhergehende Simulation angenommenen Betriebsdaten der Brennstoffzellen und den zuvor dargestellten Kosten des Energiebezugs ausgegangen, um eine Abschätzung der Anforderungen an die zukünftigen spezifischen Investitionskosten von BZH zu erhalten. Weiters wurde von einer angenommenen Lebensdauer zukünftiger Systeme von 40.000 Volllaststunden ausgegangen, daraus ergibt sich die Lebensdauer der eingesetzten BZH über die jährliche Volllaststundenzahl. Für die Wartungskosten wird ein Wert von 1,5 ct/kWh_{el} angenommen. Die Investition wird zu 100 % eigenfinanziert, der interne Zinssatz wird variiert. Beim Preis der eingesetzten Brennstoffe und der Strombezugskosten wird eine Inflationsrate von 2 % p. a. angenommen. Die spezifischen Investitionskosten des BZH werden den Barwerten der jährlichen Ersparnis von Energiebezugskosten beim Einsatz eines BZH im Vergleich zum Einsatz eines konventionellen Heizkessels und Bezug der elektrischen Energie aus dem öffentlichen Netz gegenübergestellt.

Die berechneten Maximalwerte der spezifischen Gesamtinvestitionskosten sind in Abbildung 9 in Abhängigkeit der geforderten Projektverzinsung dargestellt. Demnach dürfen beispielsweise bei einem geforderten internen Zinssatz von 5 % und Strombezugskosten von 16 ct/kWh_{el} brutto die spezifischen Investitionskosten für ein BZH im Wohnbereich im stromgeführten Betrieb einen Wert von rund 1.420 €/kW_{el} nicht überschreiten.

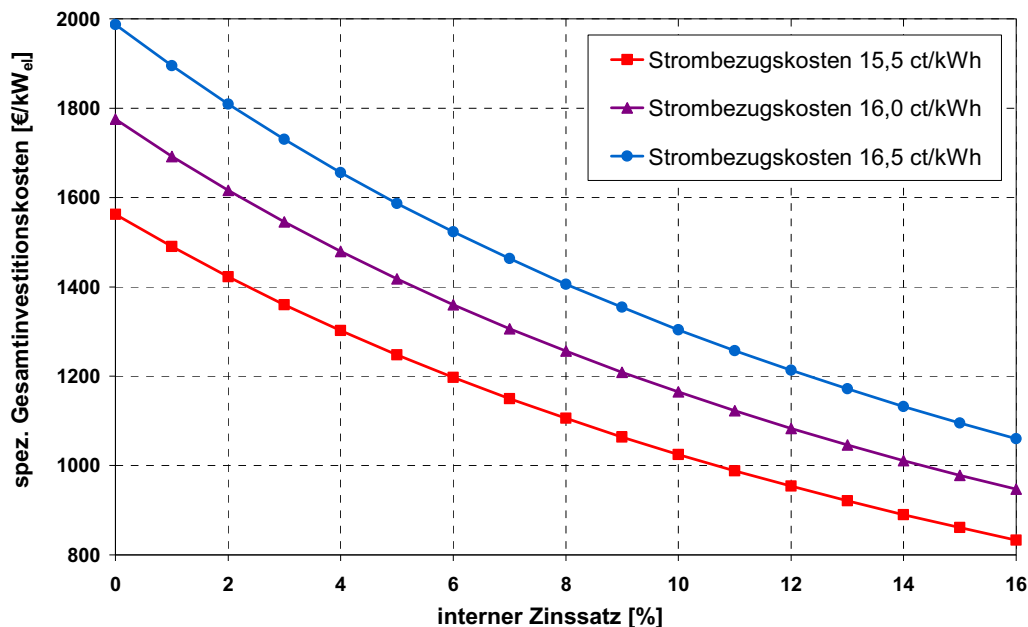


Abbildung 9: Abhängigkeit der maximalen zulässigen spezifischen Gesamtinvestitionskosten von der geforderten Projektverzinsung für ein Brennstoffzellen-Heizgerät mit einer Nennleistung von 8 kW_{el} und 13,3 kW_{th} im stromgeführten Betrieb beim Einsatz in einem Gebäude mit 18 Wohnungen.

Die Berechnung der maximalen spezifischen Investitionskosten für BZH in einem Wohngebäude mit acht Wohnungen liefert sehr ähnliche Ergebnisse und wird deshalb nicht getrennt dargestellt. In beiden Fällen dürfen beispielsweise bei Strombezugskosten von 16 ct/kWh_{el} brutto die spezifischen Gesamtinvestitionskosten einen Wert von rund 1.620 €/kW_{el} nicht überschreiten, um zumindest eine Projektverzinsung zu gewährleisten, die der Inflationsrate entspricht.

Höhere maximal zulässige Gesamtinvestitionskosten können sich bei der Wahl einer geringen Nennleistung des BZH, als in Tabelle 4 dargestellt, ergeben, da bei kleineren Nennleistungen die jährliche Volllaststundenzahl ansteigt. Dies wird in Abbildung 10 veranschaulicht, wo die errechnete Projektverzinsung als Funktion der Nennleistung und der spezifischen Gesamtinvestitionskosten des BZH beim Betrieb im simulierten Gebäude mit 18 Wohnungen dargestellt ist. Gerade bei sehr kleinen Leistungen ist jedoch mit überproportional hohen spezifischen Kosten für Installations- und Wartungsarbeiten sowie periphere Geräte wie Steuerungen, Mess- und Schutzeinrichtungen, Pumpen oder Ventilen zu rechnen. Bei diesen Positionen sind die Kosten nur wenig von der Nennleistung abhängig, was die Sinnhaftigkeit von Mikro-KWK-Anlagen mit sehr geringer Nennleistung in Frage stellen kann.

Auffallend ist in Abbildung 10 die hohe Projektverzinsung bei einem aus technischer Sicht geringfügig überdimensionierten BZH mit einer Nennleistung von 10 kW_{el}. Der Effekt kann dadurch erklärt werden, dass in diesem Fall das BZH regelmäßig in einem Teillastbereich betrieben wird, wo gemäß Abbildung 2 in der Simulation ein etwas höherer elektrischer Wirkungsgrad angenommen wurde als im Nennpunkt. Jedoch sind aufgrund der Überdimensionierung auch tägliche Abschaltungen wegen zu geringer elektrischer Last in den Nachtstunden zu erwarten, deren negativer Einfluss auf die Lebensdauer des BZH und somit auf die Wirtschaftlichkeit nicht in der Berechnung berücksichtigt wurde.

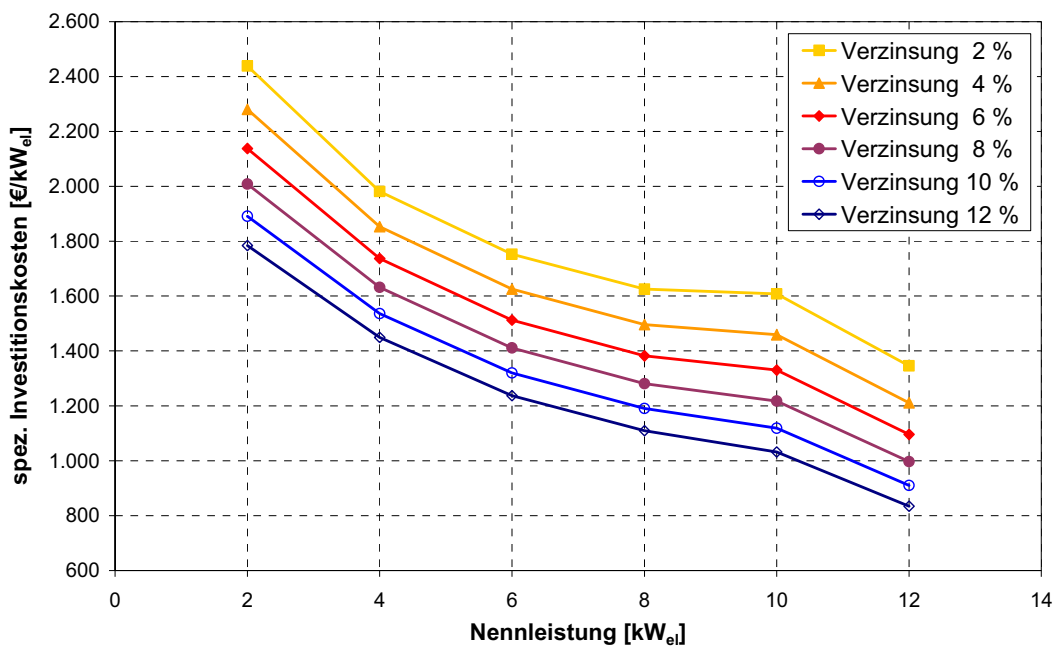


Abbildung 10: Abhängigkeit der Projektverzinsung von der Nennleistung und den spezifischen Gesamtinvestitionskosten eines Brennstoffzellen-Heizgeräts im stromgeführten Betrieb zur Versorgung eines Gebäude mit 18 Wohnungen.

5 Zusammenfassung

Der zukünftige Einsatz von Brennstoffzellen-Heizgeräten in Wohngebäuden hängt von technischer Seite vom Wärme- und Stromverbrauch der Wohngebäude und von wirtschaftlicher Seite von den Preisen für Energiebezug sowie -einspeisung, den Investitionskosten und den anfallenden Wartungskosten ab. Allgemein stellt im Wohnbereich der geringe Wärmebedarf außerhalb der Heizperiode ein Problem dar, dem nur in sehr geringem Ausmaß mit einer Vergrößerung der verwendeten Wärmespeicher entgegnet werden kann.

Die Simulation des Betriebs von BZH in unterschiedlichen Wohngebäuden führt zu dem Ergebnis, dass erst bei größeren Wohngebäuden ausreichende Grundlast für einen kontinuierlichen Betrieb gegeben ist. Der stromgeführte Betrieb in Einfamilienhäusern ist wegen der auftretenden hohen elektrischen Lastspitzen und der sehr geringen elektrischen Grundlast aus technischer Sicht schwierig zu realisieren. Grundsätzlich ist die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Anlagen in Einfamilienhäusern aufgrund der geringen Nennleistungen, die hier eingesetzt werden können, in Frage zu stellen.

In Wohngebäuden mit acht oder mehr Wohnungen erscheint ein zukünftiger Einsatz von BZH realistischer, da die thermische und elektrische Grundlast höher ist und ein niedrigeres Verhältnis zwischen elektrischer Spitzenlast und Grundlast zu erwarten ist. Der wärmegeführte Betrieb des BZH ermöglicht bei allen untersuchten Gebäudetypen die Auslegung auf eine höhere Nennleistung und eine hohe Anzahl der jährlichen Volllaststunden bei zugleich geringerer Anzahl von Schaltzyklen und ist aus technischer Sicht gegenüber der stromgeführten Betriebsweise zu bevorzugen. Unter den in Österreich derzeit gegebenen Bedingungen für die Netzspeisung elektrischer Überschussenergie aus Mikro-KWK-Anlagen erscheint jedoch ein wärmegeführter Betrieb aus wirtschaftlicher Sicht nicht empfehlenswert.

Um unter den derzeitigen Rahmenbedingungen in Österreich einen wirtschaftlichen, stromgeführten Betrieb von BZH in Wohngebäuden zu ermöglichen, müssen Richtwerte der spezifischen Gesamtinvestitionskosten von maximal rund 1.600 €/kW_{el} im Leistungsbereich unter 10 kW_{el} bei einer Lebensdauer von mindestens 40.000 h gefordert werden. Diese Zielkosten können auch auf andere Technologien der Mikro-KWK mit ähnlichen Wirkungsgraden und Betriebseigenschaften übertragen werden.

Derzeit ist die Brennstoffzelle aufgrund des technischen Entwicklungsstandes noch keine Alternative zu den Konkurrenztechnologien wie Gasmotoren, Dampfmaschinen, Stirlingmotoren oder auch Mikrogasturbinen im größeren Leistungsbereich. Für eine zukünftige wirtschaftliche Anwendung der Brennstoffzellentechnologie als Kraft-Wärme-Kopplung im Wohnbereich sind daher Weiterentwicklungen zur Erhöhung der Lebensdauer und zur Senkung der Investitionskosten zu fordern. Eine Verbesserung des Einschaltverhaltens und eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrads könnten dennoch zu entscheidenden Vorteilen der Brennstoffzelle im Vergleich zu Konkurrenztechnologien am Mikro-KWK-Markt führen.

Durch die zunehmenden Anstrengungen zur Energieeffizienzsteigerung im privaten Sektor v. a. durch thermische Sanierung von Gebäuden und die angestrebte Verringerung des Stromverbrauchs durch verbesserte Wirkungsgrade elektrischer Geräte und die Vermeidung von Stand-by-Verlusten, dürfte jedoch generell das Potenzial für Mikro-KWK im Wohnbereich in Zukunft abnehmen.

6 Abkürzungen

BZ.....	Brennstoffzelle
BZH.....	Brennstoffzellen-Heizgerät
EFH.....	Einfamilienhaus
k.A.....	keine Angabe
KWK.....	Kraft-Wärme-Kopplung
MFH18....	Mehrfamilienhaus mit 18 Wohnungen
MFH8.....	Mehrfamilienhaus mit 8 Wohnungen
MFH.....	Mehrfamilienhaus
PEM.....	Proton Exchange Membrane
PEMFC....	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
SOFC.....	Solid Oxide Fuel Cell, Oxidkeramische Brennstoffzelle
VEÖ.....	Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs

7 Literatur

- [1] Smole E., Stigler H., Theissing M. et al.: Studie über KWK-Potentiale in Österreich, Endbericht 2005; im Auftrag des BMWA, VEÖ, WKÖ und IV, 2005.
- [2] Vereinigung österreichischer Kessellieferanten, K. Felbermayer, persönliche Auskunft, Frühjahr 2006.
- [3] proPellets Austria: Pellets – die österreichische Energielösung, Presseinformation, 08.09.2005.
- [4] APA Online Journal Energie: Der österreichische Heizkesselmarkt, Austria Presse Agentur, 28.11.2005.
- [5] Benke G.: Überblick über den österreichischen Kesselbestand, Österreichische Energieagentur, Energy 2/2002.
- [6] Statistik Austria: Gebäude- und Wohnungszählung 2001, Hauptergebnisse Österreich, Wien 2004.
- [7] Statistik Austria: Statistisches Jahrbuch 2007 – Wohnungswesen, Wien 2007.
- [8] Wilk H., Zappe R., Kraus J.: Aktueller Stand und Entwicklungen der Brennstoffzelle – Konkrete Untersuchungen aus der Praxis, 9. Symposium Energieinnovation, 15.-17. Feb. 2006, Technische Universität Graz.
- [9] Kurzweil P.: Brennstoffzellentechnik, Vieweg 2003.
- [10] Larminie J, Dicks A: Fuel Cell System Explained, 2nd Edition, Wiley 2003.
- [11] Ahammer F.: Integration stationärer Brennstoffzellen in Wohngebäuden, Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2006.
- [12] Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs: E-Beratung, Verbrauchstabelle, www.veoe.at.
- [13] VDI 2067, Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, 09/2000;
Blatt 4: Berechnung der Kosten von Wärmeversorgungsanlagen; Warmwasserversorgung, 1982.
- [14] AGCS Gas Clearing and Settlement AG: Gas Lastprofile, www.agcs.at.
- [15] APCS Power Clearing and Settlement AG: Synthetische Lastprofile 2005, www.apcs.at.
- [16] Mandl, D.: Kostenrechnungs-Handbuch, 4. Auflage, Wien, Orac, 2001.
- [17] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE): BHKW-Kenndaten 2005, Module, Anbieter, Kosten, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern.

8 Danksagung

Die Autoren danken der ARGE Brennstoffzelle Oberösterreich für die Initiierung und finanzielle Unterstützung der vorliegenden Arbeit. Spezieller Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Heinrich Wilk, der durch seine langjährige Erfahrung in der Planung und im Einsatz innovativer Energietechnologien bedeutend zum Ergebnis beigetragen hat.