

Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Erdgasbasis – Eine Zukunftsoption zur urbanen Endenergiebereitstellung?

Thomas Woldt, René Pforte, Wolf Fichtner
Lehrstuhl Energiewirtschaft

Kurzfassung

Die verstärkte Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien stellt eine tragende Säule der langfristigen CO₂-Emissionsminderungsstrategien in Deutschland dar. Der vorliegende Beitrag untersucht die Wirtschaftlichkeit kleiner Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien für die dezentrale Anwendung im urbanen Versorgungsbereich. Zudem wird ein Optimiermodell zur Untersuchung von technischen und ökonomischen Aspekten der Systemintegration von Mikro-KWK-Anlagen vorgestellt.

Abstract

The enhanced use of cogeneration technologies belongs to Germany's long-term strategies in order to reduce carbon dioxide emissions. This paper analyses the economic viability of small cogeneration units as a decentralized energy supply option for urban energy supply. Furthermore an optimization model for analysing technical and economic aspects of system integration is introduced.

1 Ausgangssituation und Problemstellung

Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit sind die energiepolitischen Ziele zur Entwicklung nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen. Diese Ziele sollen langfristig gleichrangig verfolgt werden, was sich aufgrund teilweise konkurrierender Zielbeziehungen mitunter schwierig gestaltet. In den letzten Jahren ist durch die internationale Klimaschutzdiskussion die Umweltverträglichkeit als energiepolitisches Nachhaltigkeitsziel gerade auch in Deutschland wieder stärker in den Vordergrund getreten. Die gemeinhin als globaler Klimawandel bezeichneten Umweltauswirkungen werden vor allem auf die Erhöhung der Jahresmitteltemperaturen infolge des stark angestiegenen und anthropogen verursachten Anteils von Treibhausgasen in der Atmosphäre zurückgeführt. Infolgedessen wird die Begrenzung dieser Temperaturerhöhung auf ein langfristig tolerierbares Maß als das wesentliche Klimaschutzziel angesehen (IPCC 2007, S.1-5).

Anthropogene Kohlendioxidemissionen (CO₂-Emissionen) haben Schätzungen zufolge den größten Anteil an den klimarelevanten Treibhausgasen (FEES 1998, S.3). Folgerichtig wird auch in Deutschland angestrebt, die CO₂-Abgabe in die Atmosphäre langfristig deutlich zu ver-

ringern. Ein erstes Zwischenziel besteht in der Reduktion des Anteils von Treibhausgasemissionen um 21% bis zum Zeitraum 2008-2012 gegenüber dem Basisjahr 1990 (BMU 2005a, S.5).

Ein maßgeblicher Teil der deutschen CO₂-Emissionen stammt aus dem stationären Energieversorgungsbereich, in dem hauptsächlich Großkraftwerke fossile Primärenergieträger in Elektroenergie wandeln, die dann über elektrische Transport- und Verteilnetze dem Endverbraucher zugeführt wird. Um die genannten Reduktionsziele zu erreichen, wurden in Deutschland verschiedene Maßnahmen zur Senkung der energiebedingten CO₂-Emissionen initiiert. Tragende Säulen deutscher CO₂-Minderungsstrategien sind neben der Steigerung der Energiewandlungseffizienz im Großkraftwerksbereich die stärkere Nutzung regenerativer Energiequellen und der Ausbau der dezentralen Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien.

Eine Steigerung der Energiewandlungseffizienz im Großkraftwerksbereich wird von Wirkungsgradverbesserungen im Rahmen von prozesstechnischen Optimierungen erwartet. Die regenerativen Energietechnologien können durch die Bereitstellung von Elektroenergie, welche gegenüber fossiler Primärenergieverstromung mit wesentlich geringeren CO₂-Emissionen verbunden ist, zum Erreichen der genannten Ziele beitragen. Der Beitrag dezentraler Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien (KWK-Technologien) liegt in der vergleichsweise effizienteren Primärenergiewandlung, da sie durch die gleichzeitige Produktion von elektrischer **und** thermischer Nutzenergie eine höhere Brennstoffausnutzung gegenüber konventionellen Kraftwerkstechnologien erreichen können. Zudem lässt sich die dezentrale Bereitstellung der Nutzenergien am Ort des Bedarfes zumeist ohne große Transport- und Verteilungsverluste realisieren. Lokale Wärmebedarfe vorausgesetzt, können so Primärenergieträger effizienter genutzt und die spezifischen aber auch absoluten CO₂-Emissionen gesenkt werden. Deutschland hat sich für den Ausbau emissionsmindernder Technologien ambitionierte Ziele gesetzt. Der Anteil regenerativer Energien an der Elektroenergieversorgung soll bis zum Jahr 2010 mindestens 12,5% betragen und bis 2020 auf mindestens 20% erhöht werden (EEG 2004). Mit der stärkeren Nutzung von KWK-Technologien wird angestrebt, die jährlichen CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2010 um mindestens 20 Millionen Tonnen zu senken (KWKModG 2002).

Die Technologien zur Wandlung regenerativer Energieträger und kleiner dezentraler KWK-Anlagen haben gegenüber der Elektrizitätserzeugung mit Großkraftwerken komparative Kostennachteile, welche vor allem auf größenbedingte Skaleneffekte zurückzuführen sind. Um trotz

Energieanlagen zur thermischen Endenergiebereitstellung durchführen lassen. Die Jahreskosten werden unterschieden in kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundene Kosten (VDI 2000). Die kapitalgebundenen Kosten beinhalten die Kosten für die Anlagenkomponenten, baulichen Komponenten, den Anlagenanschluss, die Inbetriebsetzung sowie die Finanzierungskosten. Die verbrauchsgebundenen Kosten berücksichtigen die Kosten für den verwendeten Brennstoff (hier Erdgas) und die Kosten für die Betriebsstoffe. Zu den betriebsgebundenen Kosten gehören die Kosten für Bedienung, Reinigung und Instandhaltung der Anlagen.

Nach der Berechnung der jährlichen Gesamtkosten werden die spezifischen Energiegestehungskosten ermittelt. Hierzu wird das Verhältnis der jährlichen Gesamtkosten der Mikro-KWK-Anlagen zu den bereitgestellten Nutzenergien gebildet. Da die Mikro-KWK-Anlagen im Bereich urbaner Einzelobjektversorgung mit der Wärmebereitstellung durch konventionelle Wärmekessel konkurrieren, werden die Energiegestehungskosten eines solchen Referenzsystems als Wärmegutschrift (anlegbarer Wärmepreis) für die Bewertung der thermischen Nutzenergie aus den Mikro-KWK-Anlagen herangezogen. Die thermische Jahresarbeit wird mit dem anlegbaren Wärmepreis bewertet und die sich ergebende Wärmegutschrift von den Jahresgesamtkosten der Mikro-KWK-Anlagen abgezogen. Der verbleibende Kostenanteil lässt sich dann der elektrischen Nutzenergie zuordnen. Bezogen auf den elektrischen Jahresoutput ergeben sich die Elektroenergiegestehungskosten der untersuchten Anlagen, welche dann als Wirtschaftlichkeitskriterium mit dem Endverbraucherpreis für den Bezug von Elektroenergie (hier durchschnittlicher Haushaltstarif) von einem Energieversorgungsunternehmen verglichen werden können. Ist davon auszugehen, dass die Elektroenergiegestehungskosten im Rahmen der geplanten Anlagenutzungsdauer unter den Fremdbezugstarifen bleiben, so wäre ein wirtschaftlicher Mikro-KWK-Anlagenbetrieb möglich.

Wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK-Anlagen haben die elektrische und thermische Nachfragestruktur des zu versorgenden Objektes. Da im urbanen Wohngebäudebereich der Nutzwärmebedarf aufgrund der Abhängigkeit von der Außentemperatur über das gesamte Jahr stark schwankt, werden dezentrale KWK-Anlagen zumeist auf die thermische Teillast ausgelegt, um dann mit wärmegeführter Betriebsführung ausreichend hohe Jahresvolllaststunden zu erzielen. Beim wärmegeführten Betrieb erfolgt die Anlagenbetriebsweise entsprechend der lokalen Wärmenachfrage und der elektrische Nutzenergieoutput ergibt sich gemäß der Anlagenstromkennzahl. Für die Bewertung der elektrischen Nutzenergie im Rahmen der Ermittlung der Elektroenergiegestehungskosten, muss die Unterscheidung zwischen lokal, im Gebäude eigengenutzten Anteil und dem in das öffentliche Elektroenergienetz eingespeisten Anteil unterschieden werden, da in beiden Fällen eine unterschiedliche ökonomische Wertigkeit einer Kilowattstunde Elektroenergie vorliegt. Dieser Sachverhalt soll anhand der Abb. 2 kurz erläutert werden. In diesem Diagramm ist eine beispielhafte, auf die Maximallast normierte, elektrische Nachfragekurve eines Mehrfamilienhauses dargestellt (gestrichelte Linie). Die Fläche unter dieser Kurve stellt den Bedarf an Elektroenergie (Kilowattstunden) des Gebäudes über den Tag dar.

Dieser Elektroenergiebedarf kann zum Teil durch die Mikro-KWK-Anlage abgedeckt werden bzw. durch den Bezug von einem Energiever-

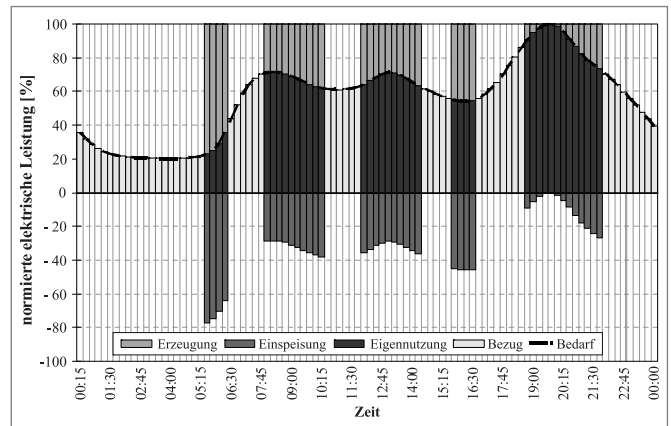


Abbildung 2: Schematische Darstellung auf den Maximalwert normierter Elektroenergieanteile bei einem wärmegeführten KWK-Anlagenbetrieb

sorgungsunternehmen. Da die Mikro-KWK-Anlage aus den genannten Gründen wärmegeführt betrieben wird, steht der Elektroenergieoutput nur zu den Anlagenbetriebszeiten zur Verfügung. Die abgegebene elektrische Leistung wird dann, je nach aktueller elektrischer Nachfrage, vor Ort verwendet (positiver Anteil unter der Nachfragekurve) oder bei Übersteigen der lokalen Nachfrage in das Elektroenergienetz zurückgespeist (negativer Anteil unter der Nachfragekurve). Die ökonomische Wertigkeit einer eigengenutzten Kilowattstunde Elektroenergie bemisst sich durch den Endverbraucherpreis für Elektroenergie, da der Bezug von einem Energieversorgungsunternehmen substituiert wird. Die Wertigkeit einer eingespeisten Kilowattstunde wird anlagenspezifisch mit den Vergütungssätzen des Gesetzes zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung bemessen (KWModG 2002). Da diese Vergütungssätze für eingespeiste Elektroenergie derzeit weit unter den Endverbraucherpreisen für Elektroenergie im Haushaltsbereich liegen, ist die Eigennutzung der Elektroenergie auch bei wärmegeführtem Anlagenbetrieb zumeist die wirtschaftlich attraktivere Option. Insofern muss für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung immer eine Abschätzung über den lokal vor Ort genutzten Anteil der Elektroenergie (elektroenergetischer Deckungsgrad) berücksichtigt werden. Diese Bestimmung des elektroenergetischen Deckungsgrades ist in der Praxis sehr aufwendig und muss für jede Anwendung im Rahmen von thermischen und elektrischen Lastganganalysen durchgeführt werden. Da im Haushaltsbereich zu Abrechnungszwecken aufgrund der hohen Kosten derzeit keine elektrischen und thermischen Leistungsmessungen vorgenommen werden, wurde für die vorliegende Untersuchung der elektrische Deckungsgrad bei Mehrfamilienhäusern mit etwa 40% abgeschätzt. Diese Abschätzung resultiert aus eigenen Untersuchungen thermischer und elektrischer Lastprofile für Mehrfamilienhäuser mit unterschiedlichen energetischen Gebäudecharakteristiken und Bewohnerzahlen.

2.3 Datenbereitstellung

2.3.1 Kapitalgebundene Kosten

Die Investition in betriebsbereite Mikro-KWK-Anlagen ist insbesondere von der Anlagenkonfiguration (Brennwerttechnik, Speichereinsatz und -volumen, Regelungstechnik usw.) und der thermischen bzw. elek-

trischen Nennleistung der einzelnen Anlagen abhängig. Diverse Hersteller bieten am Markt ihre diesbezüglichen Anlagen an. In einer Untersuchung der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. wurde eine umfangreiche Herstellerbefragung durchgeführt (ASUE/FFM 2005). Die ermittelten Investitionen streuen um eine „Ausgleichsfunktion“ (vgl. Abb. 3).

Im Rahmen der Untersuchung zum vorliegenden Beitrag wurden ver-

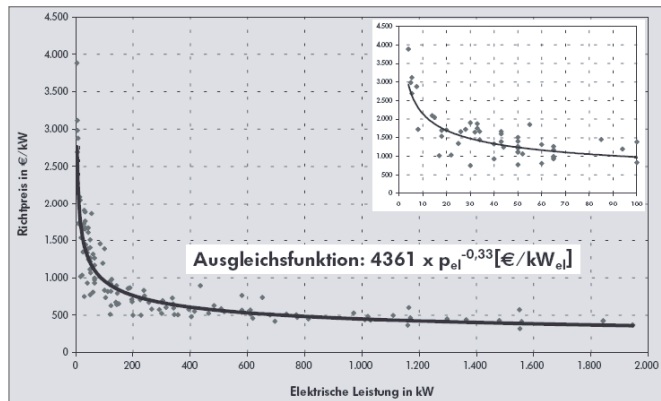


Abbildung 3:
Kostenfunktion und Befragungsergebnisse BHKW-Investitionen/ Richtpreise
(Quelle: ASUE/FFM (2005), S. 8)

gleichend zwei beispielhafte erdgasbasierte Mikro-KWK-Anlagen ausgewählt, mit 5,5 kW_{el} sowie mit 50 kW_{el} Nennleistung. Zur Unterlegung der gewählten Investitionsansätze haben die Autoren verschiedene Untersuchungen analysiert und in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1:
Investitionen für BHKW der gewählten Nennleistungen – Ergebnisse der Literaturrecherche (eigene Darstellung)

Quelle	BHKW 1-10 kW _{el} Investition [Euro/kW _{el}]	BHKW 10-100 kW _{el} Investition [Euro/kW _{el}]
[ASUE/FFM 2005], S. 8	2.700-3.900	800-1.500
[PFAFFENBERGER et al. 2004], S. A-7	1.500	1.200-1.320
[DIW/ÖKO-INSTITUT 2007], S. 158	3.418	1.350
[IER 2005], S. 29	2.650	1.350
[HESSEN-ENERGIE 2004], S. 27	2.691	k.A.
[SAWILLION 2004], S. 19 (Trendwerte 2002-2004)	3.300-4.600	1.700-3.300
[SIMADER et al. 2004], S. 51	k.A.	950-2.600
[IUTA 2002], S. II.61	1.600-1.900	800-1.600
[BMW-AT 2005], S. 65	k.A.	1.320-4.800
Vorliegende Untersuchung	2.500	1.350

Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang auf eine deutliche Kostensteigerung von Anlagen und deren Komponenten in der Energietechnik seit etwa 2004. Insbesondere Stahl, Edelstahl- und Kupfererzeugnisse erfordern seitdem einen deutlichen Marktpreisanstieg. Die Auswirkungen davon sind in allen Bereichen der Energiewirtschaft zu spüren (FLAUGER 2007). Bei den nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden deshalb auch besonders die Auswirkungen steigender Investitionen untersucht. Für die Untersuchung wurden die Gesamtinvestitionen mit einer Annuitätenrechnung als gleichgroße

Periodenbeträge auf die Anlagennutzungsdauer verteilt. Es wird angenommen, dass eine Generalüberholung der Anlagen nach ca. 60.000 Betriebsstunden erfolgt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass diese Mikro-KWK-Anlagen über eine Nutzungsdauer von 15 Jahren betrieben werden können. Der Kalkulationszinssatz wurde mittels des WACC-Ansatzes (weighted average cost of capital) bestimmt. Aufgrund der grundsätzlichen Förderwürdigkeit von Investitionen in die betrachteten Anlagen mittels zinsvergünstigter Darlehen der KfW wurde ein Fremdkapitalanteil von 75% bei einer Laufzeit von 15 Jahren (Annuitätendarlehen) und ein Zinssatz zwischen 3,2% und 4,0% sowie einer als angemessen angenommenen Eigenkapitalverzinsung von durchschnittlich 8% angesetzt. Damit ergibt sich ein Kalkulationszins von 4,7%.

2.3.2 Betriebsgebundene Kosten

Zur Abbildung der für den Betrieb der KWK-Anlagen notwendigen betriebsgebundenen Kosten wird häufig nach Instandhaltungskosten, Kosten einer Generalüberholung sowie Personal- und sonstige Kosten unterschieden. Die Ergebnisse einer am Lehrstuhl Energiewirtschaft diesbezüglich durchgeführten Literaturrecherche sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2:
Betriebskosten für BHKW der gewählten Nennleistungen – Ergebnisse der Literaturrecherche (eigene Darstellung)

Quelle	BHKW 1-10 kW _{el} Betriebskosten	BHKW 10-100 kW _{el} Betriebskosten
[ASUE/FFM 2005], S. 9f. Instandhaltung Generalüberholung Personal/Sonstige Kosten	2,8-3,5 ct/kWh _{el} 550-850 Euro/kW _{el} k. A.	1,5-3,5 ct/kWh _{el} 200-500 Euro/kW _{el} k. A.
[PFAFFENBERGER et al. 2004], S. A-7 Instandhaltung Generalüberholung Personal/Sonstige Kosten	2,5 ct/kWh _{el} k. A. 17 Euro/kW _{el} *a	1,3 ct/kWh _{el} k. A. 0
[DIW/ÖKO-INSTITUT 2007], S. 158 Instandhaltung Generalüberholung Personal/Sonstige Kosten	5 % der Investition enthalten 1 % der Investition	5 % der Investition enthalten 1 % der Investition
[IER 2005], S. 29 Instandhaltung Generalüberholung (fixe BK) Personal/Sonstige Kosten (var. BK)	enthalten 95,4 Euro/kW _{el} *a 1,28 ct/kWh _{el}	enthalten 48,6 Euro/kW _{el} *a 1,28 ct/kWh _{el}
[HESSEN-ENERGIE 2004]	k. A.	k. A.
[SAWILLION 2004]	k. A.	k. A.
[SIMADER et al. 2004], S. 56 Instandhaltung Generalüberholung Personal/Sonstige Kosten	2,0 ct/kWh _{el} enthalten enthalten	1,0-1,8 ct/kWh _{el} enthalten enthalten
[IUTA 2002], S. II.61 Instandhaltung Generalüberholung Personal/Sonstige Kosten	vgl. [ASUE/FFM 2005]	vgl. [ASUE/FFM 2005]
[BMW-AT 2005], S. 65 Instandhaltung Generalüberholung Personal/Sonstige Kosten	k. A. k. A. k. A.	0,9-2,1 ct/kWh _{el} enthalten 0,38-1,56 ct/kWh _{el}
Vorliegende Untersuchung Instandhaltung Generalüberholung (nach 60 000 h) Personal/Sonstige Kosten	2,0 ct/kWh _{el} 625 Euro/kW _{el} enthalten	1,5 ct/kWh _{el} 338 Euro/kW _{el} enthalten

2.3.3 Verbrauchsgebundene Kosten

Den Großteil der verbrauchsgebundenen Kosten machen in dem unteren Leistungsbereich die Kosten für den Brennstoff aus. Der Brennstoff der untersuchten Mikro-KWK-Anlagen für den Mehrfamilienhausbereich ist Erdgas. Die Endverbraucherpreisentwicklung für Erdgas im Haushaltsbereich (Jahresverbrauch 125,6 GJ) innerhalb des Zeitraumes 1991-2007 (erstes Halbjahr) zeigt die Abb. 4

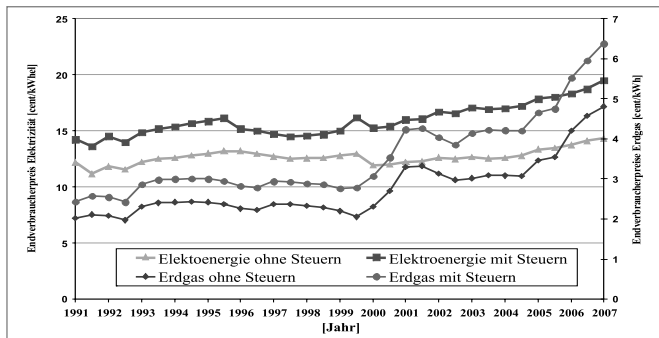


Abbildung 4: Entwicklung der Endverbraucherpreise für Elektroenergie und Erdgas 1991 bis 2007 (eigene Darstellung unter Verwendung von (EUROSTAT 2007))

Die Endverbraucherpreise des angegebenen Nachfragebereiches haben sich in den letzten Jahren nahezu verdoppelt. Diese Verteuerung des Erdgases führt zu einem höheren Kostenansatz sowohl beim Referenzsystem (Brennwert-Heizkessel) als auch bei den Mikro-KWK-Anlagen, da annahmegemäß alle erdgasbasiert sind. Da die Mikro-KWK-Anlagen jedoch vergleichsweise mehr Erdgas benötigen, um Elektroenergie **und** Nutzwärme bereitzustellen, führt eine Erdgaspreiserhöhung in Summe zu komparativen Kostennachteilen gegenüber dem Referenzsystem. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Annahme getroffen, dass die notwendigen jährlichen Anlagennutzungsgrade zur Rückerstattung des Öko- und Mineralölsteueranteils erreicht werden können. Insofern wurden bei den Berechnungen die Erdgaspreise um diesen Anteil reduziert.

2.3.4 Sonstige Parameter

Im Rahmen der Durchführung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind des Weiteren folgende Parameter abzuschätzen. Die Berechnung der Wärmegutschrift (anlegbarer Wärmepreis) erfolgte mit einer Vollkostenrechnung für die Wärmegestehungskosten eines neuen Brennwert-Heizkessels auf Erdgasbasis. Als Vergleichskriterium für die ermittelten Elektroenergiegestehungskosten der KWK-Anlagen wurde der Elektroenergiebezugspreis für Haushaltskunden mit einem Jahresverbrauch von 3.500 kWh_{el} herangezogen. Die bestehenden Unsicherheiten im Hinblick auf die preisliche Bewertung der Nutzenergien verdeutlicht Abb. 4. Diese stellt die Entwicklung des Halbjahresdurchschnittspreises für den Bezug von Elektroenergie deutscher Haushalte bis zu einem Jahresbedarf von 3.500 kWh_{el} für den Zeitraum 1991-2007 (erstes Halbjahr) dar. Es ist zu erkennen, dass der durchschnittliche Elektroenergiepreis für deutsche Haushalte seit dem Jahr 2000 stetig angestiegen ist. Betrug er im Jahr 1991 noch weniger als 15 ct/kWh_{el}, so müssen Endverbraucher dieses Nachfragebereiches im Jahr 2007 durchschnittlich mehr als 19 ct/kWh_{el} bezahlen. Für die Einspeisevergütung wurden rd. 9.0 ct/kWh_{el} angenommen. Diese setzt sich zusammen aus der staatlichen Zuschlagszahlung für

KWK-Anlagen dieses Leistungsbereiches gemäß KWModG 2002 in Höhe von 5,11 ct/kWh_{el}, dem üblichen Preis (hier Durchschnittspreis für Baseload-Strom an der Strombörse EEX des 2. Quartals 2007) in Höhe von 3,1 ct/kWh_{el} und den vermiedenen Netznutzungsentgelten, welche mit etwa 0,78 ct/kWh_{el} abgeschätzt wurden (KWK-Info 2007).

3 Modellergebnisse

3.1 Jahresbenutzungsstunden

Als zentrales Ergebnis der Untersuchungen ergeben sich die notwendigen Jahresbenutzungsstunden der Mikro-KWK-Anlagen, um unter den angenommenen Rahmenbedingungen einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb sicherzustellen. Definitionsgemäß sollen die Elektroenergiegestehungskosten der Mikro-KWK-Anlagen das Wirtschaftlichkeitskriterium darstellen. Ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb wäre dann möglich, wenn diesbezüglich zumindest Gleichheit gegenüber den Elektroenergetariffen für den Fremdbezug besteht. In der Abb. 5 sind die ermittelten spezifischen Elektroenergiegestehungskosten der beiden Mikro-KWK-Technologien in Abhängigkeit der Jahresbenutzungsstunden dargestellt. Die obere der beiden Kurven bildet die spezifischen Gestehungskosten der kleineren KWK-Technologie ab. Die horizontale, gestrichelte Linie markiert den Elektroenergiebezugstarif für den Haushaltsbereich, der unabhängig von den Benutzungsstunden konstant ist. Als Vergleichstarif werden 19 ct/kWh_{el} angenommen. Die Jahresbenutzungsstunden wurden in 500h-Schritten variiert.

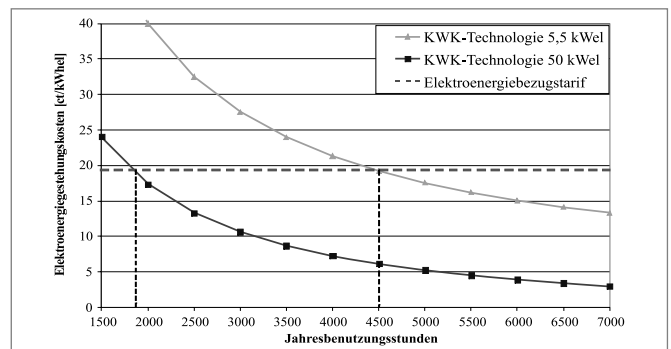


Abbildung 5: Spezifische Elektroenergiegestehungskosten der untersuchten KWK-Technologien in Abhängigkeit von den Jahresbenutzungsstunden

Für die große Anlage besteht Kostengleichheit bereits bei etwas weniger als 2.000 Jahresbenutzungsstunden. Für die kleinere Mikro-KWK-Anlage wird ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb erst ab 4.500 Jahresbenutzungsstunden möglich. Die Ergebnisse lassen keine Schlussfolgerungen dazu zu, ob diese Jahresbenutzungsstunden auch tatsächlich erreicht werden können. Denn dies hängt maßgeblich von dem zu versorgenden Objekt und der energetischen Gebäudecharakteristik ab. Betrachtet man große Mehrfamilienhäuser als mögliche Versorgungsobjekte, so erscheinen die für die kleine Anlage notwendigen 4.500 Jahresbenutzungsstunden aufgrund der saisonalen Wärmebedarfscharakteristik zunächst sehr hoch, aber nicht unrealistisch. Im Hinblick auf die Anwendung der größeren KWK-Technologien mit 50 kW_{el} sind die 2.000 Jahresbenutzungsstunden als durchaus erreichbar

bar anzusehen, wenn es sich dabei um große Mehrfamilienhäuser handelt. Bei kleinen Mehrfamilienhäusern oder Einfamilienhäusern sind solche Jahresbenutzungsstunden wohl eher die Ausnahme, insbesondere dann, wenn es sich um Gebäude handelt, die nach den energetischen Gebäudestandards der letzten Jahre errichtet wurden. Da eine Wirtschaftlichkeitsaussage neben den energetischen Bedarfcharakteristika der Versorgungsobjekte auch sehr stark von den jeweiligen ökonomischen Rahmenbedingungen abhängt, können die Ergebnisse auch nur unter den dazu getroffenen Annahmen interpretiert werden. Um die Unsicherheiten bei den getroffenen Annahmen zu den ökonomischen Parametern abzuschätzen, wurden im Rahmen der Untersuchungen Sensitivitätsanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden.

3.2 Sensitivitäten

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen werden Ergebnisabweichungen im Verhältnis zur Veränderung von Eingangsparametern ermittelt. Ziel solcher Analysen ist die Feststellung von Wirkungsbeziehungen zwischen Eingangs- und Ergebnisgrößen. Nachfolgend werden zur Ermittlung der Sensitivitäten verschiedene ökonomische Parameter (Erdgaspreis, Jahresbenutzungsstunden, Kalkulationszinssatz und elektrischer Deckungsgrad) variiert und die sich ergebenden Veränderungen der Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsrechnung beschrieben. Die Auswirkungen der Parametervariationen auf die Elektroenergiegestehungskosten der Mikro-KWK-Anlagen sind in Abb. 6 und Abb. 7 dargestellt.

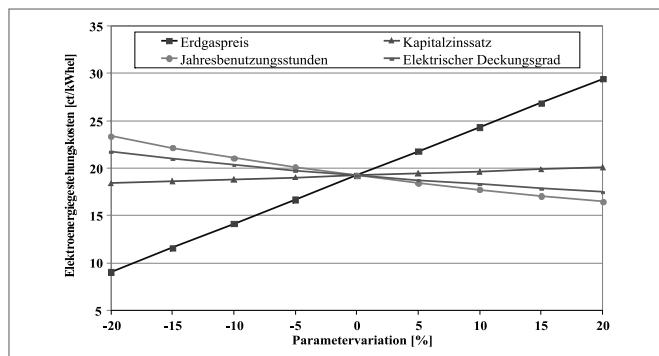


Abbildung 6: Parametersensitivitäten für die KWK-Anlage mit 5,5 kW_{el} ausgehend von 4 500 Jahresbenutzungsstunden

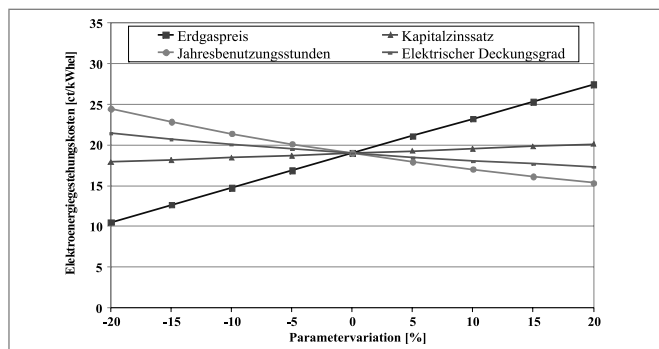


Abbildung 7: Parametersensitivitäten für die KWK-Anlage mit 50 kW_{el} ausgehend von den 2 000 Jahresbenutzungsstunden

Die Parameter wurden jeweils in 5%-Schritten bis zu einer Gesamterhöhung bzw. Gesamtverringerung von 20% verändert. Es ist zu erkennen, dass ausgehend von den 4.500 bzw. 2.000 Jahresgrenzbenutzungsstunden für die Wirtschaftlichkeit eine Erdgaspreisänderung die größten Änderungen bei den Elektroenergiegestehungskosten hervorruft. Hier haben bereits geringfügige Abweichungen einen äußerst signifikanten Einfluss auf die Elektroenergiegestehungskosten der Mikro-KWK-Anlagen und damit auf deren Wirtschaftlichkeit. Zwischen beiden besteht eine sehr starke positive Korrelation. Bereits Erdgaspreiserhöhungen von 10% würden für beide Technologien zu einer starken Erhöhung der Elektroenergiegestehungskosten führen und die Wirtschaftlichkeit bei den angegebenen Jahresbenutzungsstunden gegenüber der Referenzvariante in Frage stellen. Dies ist insofern als kritisch zu betrachten, da die Erdgaspreise sich für den Endverbraucherbereich in den vergangenen Jahren deutlich erhöht haben (vgl. Abb. 4).

Die zweite positive Korrelation besteht zwischen dem Kalkulationszinssatz und den Elektroenergiegestehungskosten. Eine Erhöhung des Zinses um 20% führt zu vergleichsweise moderaten Veränderungen bei den Elektroenergiegestehungskosten. Negative Korrelationen bestehen zwischen Elektroenergiegestehungskosten und den Jahresbenutzungsstunden bzw. dem elektrischen Deckungsgrad. Veränderungen der Jahresbenutzungsstunden haben erwartungsgemäß den größten Einfluss auf die Elektroenergiegestehungskosten der Mikro-KWK-Anlagen. Aber auch bei einer deutlichen Verringerung des eigengenutzten Anteils der Elektroenergie aus den Mikro-KWK-Anlagen (elektrischer Deckungsgrad) verschlechtert sich die Wirtschaftlichkeit, da annehmegemäß sich dann der eingespeiste Elektroenergieanteil erhöht und dieser vergleichsweise geringer vergütet wird.

4 Schlussfolgerungen und energiewirtschaftliche Implikationen

Im Rahmen der durchgeführten Analysen konnte gezeigt werden, dass ein wirtschaftlicher Betrieb der untersuchten erdgasbasierten Mikro-KWK-Anlagen unter den angenommenen ökonomischen Rahmenbedingungen ab einer Jahresbenutzungsstundenzahl in Höhe von 4.500 h/a für die Anlage mit einer elektrischen Leistung von 5,5 kW_{el} und ab etwa 2.000 h/a für die Anlage mit 50 kW_{el} möglich ist. Diese Aussagen lassen jedoch noch keine Schlussfolgerungen zu, ob die notwendigen Jahresbenutzungsstunden auch tatsächlich erreicht werden können. Dies ist jeweils abhängig von dem zu versorgenden thermischen Bedarf. Um solche dezentralen Mikro-KWK-Technologien für die thermische Versorgung einzelner Gebäude einzusetzen, müssen die jeweiligen lokalen Wärmebedarfe entsprechend hoch sein und über das Jahr die notwendigen Anlagenbenutzungsstunden gewährleisten. Sehr sensitiv reagieren die Elektroenergiegestehungskosten auf Veränderungen beim Erdgaspreis. Hier führen, trotz steuerlicher Förderung, bereits geringfügige Erhöhungen zu einem unwirtschaftlichen Anlagenbetrieb. Da die zukünftigen Erdgaspreisentwicklungen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet sind und die Entwicklung der letzten Jahre zudem eher auf tendenziell weiter steigende, als auf sinkende Erdgaspreise hindeutet ist eine verbreitete Anwendung von erdgasbasierten Mikro-KWK-Anlagen auch in den nächsten Jahren ohne veränderte Rahmenbedingungen nicht zu erwarten.

Im Hinblick auf die deutschen Zielstellungen zur verstärkten Anwendung von KWK-Technologien auch im dezentralen Bereich muss somit konstatiert werden, dass mit den bestehenden Förderanreizen über die Einspeisevergütung und dem Steuervorteil beim eingesetzten Brennstoff bislang nur ein geringer zielorientierter Beitrag geleistet wird. Das Erreichen der gesetzten Ziele zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung muss als sehr kritisch angesehen werden. Insofern sollten die bestehenden Fördermaßnahmen für den Bereich kleiner KWK-Anlagen ernsthaft hinterfragt werden. Da unter den aktuellen Rahmenbedingungen eine Eigennutzung der KWK-Elektroenergie bei den bestehenden Vergütungssätzen in den meisten Fällen die wirtschaftlichere Option gegenüber der Einspeisung in das elektrische Netz darstellt, besteht eine mögliche Handlungsoption in einer signifikanten Erhöhung der Vergütungssätze für diesen niedrigen Leistungsbereich. Eine weitere Option wären aufgrund der festgestellten hohen Sensitivität Förderansätze beim Brennstoff. Vorstellbar sind hier neben ausgeweiteten steuerlichen Rückvergütungen auch andere Ansätze, die den Brennstoffpreis im Endverbraucherbereich direkt beeinflussen.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen besonders die hohe Sensitivität der Wirtschaftlichkeit der Mikro-KWK-Anlagen in Bezug auf den Erdgaspreis. Aktuelle Marktentwicklungen und wissenschaftliche Studien zeigen insbesondere für Deutschland, dass ein bedeutender Anteil des importierten Erdgases mittels Biomassefermentation oder Biomassevergasung einheimischer Energiepflanzen ersetzt werden könnte (IE 2007). Allerdings ist neben der Nutzung von Biomasse zur Biogas-erzeugung auch die stoffliche (insbesondere Nahrungs- und Futtermittel, Holz usw.), die chemische (biogene Treibstoffe) und die direkte Nutzung in Wärmeerzeugungsanlagen bereits etabliert und wird sich aufgrund der skizzierten Klimaschutzanstrengungen weiter ausweiten. Welche der genannten Nutzungsoptionen welchen Anteil an der erzeugbaren Biomasse beanspruchen wird, ist nicht mit Sicherheit abzuschätzen und maßgeblich von den politischen Rahmenbedingungen (Förderumfang bezüglich ausgewählter Alternativen) abhängig (vgl. die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Biodiesel- und Bioethanolherstellung in Deutschland). Jedoch ist anzunehmen, dass die Marktpreise für Biogas sich den energetisch bewerteten Marktpreisen des Erdgases annähern werden (Opportunitätskostenprinzip). Ähnliche Marktverhältnisse sind aus der Preisrelation Erdöl zu Erdgas in der Vergangenheit gut bekannt. Deshalb könnte auch der verstärkte Einsatz von Biogas keine Veränderung der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnungen nach sich zu ziehen. Lediglich die höhere Förderung des ausschließlichen Einsatzes nachwachsender Energieträger (gemäß EEG) hinsichtlich der Netzeinspeisung der Elektroenergie würde die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Biogas erhöhen. Zu anderen Ergebnissen könnte eine verstärkte Lenkungswirkung von expliziten Steuern oder Abgaben auf fossile Energieträger und eine gleichzeitige Bevorzugung nachwachsender und damit klimaneutraler Energieträger führen.

5 Ausblick

Bestimmend für die vergleichsweise geringe Wirtschaftlichkeit der untersuchten Mikro-KWK-Anlagen sind u. a. die hohen Investitionen in die Anlagentechnik und der hohe Erdgaspreis. Zum Einsatz kommen

hier bereits weitgehend ausgereifte Technologien (z.B. Verbrennungsmotoren in BHKW). Die automatisierte Serienfertigung von motorischen BHKW in sehr großen Stückzahlen kann aufgrund von Skaleneffekten die spezifischen Investitionen weiter sinken lassen. Andererseits verteuern aktuell gestiegene Rohstoffpreise (Buntmetalle, Stahl) die Fertigung der Anlagen. Einen Ausweg zur signifikanten Senkung der Investition könnten neue Technologien, wie z.B. Hochtemperatur-Brennstoffzellen, Dampfexpansionsmaschinen, Mikrogasturbinen oder Stirlingmotoren bieten. In einer Untersuchung im Auftrag des BMU aus dem Jahr 2005 wurden die in Abb. 8 dargestellten zeitlichen Entwicklungspfade skizziert (BMU 2005b). Insbesondere die Entwicklung von Dampfexpansionsmaschinen mit spezifischen Zielinvestitionen von 1.500,- Euro/kW_{el} wird verstärkt vorangetrieben (FVS 2004, S. 163).

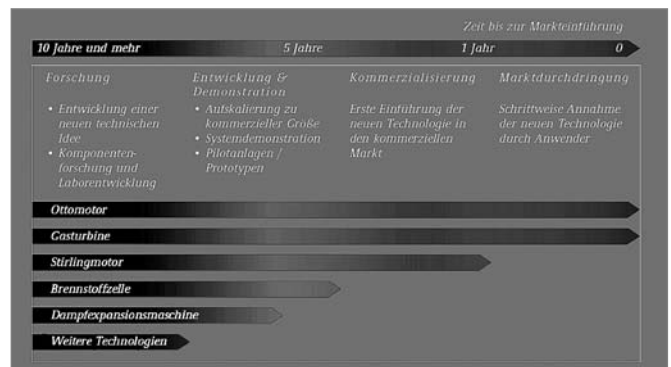


Abbildung 8:
Zeitliche Entwicklungspfade kleiner KWK-Anlagen ((BMU 2005b), S. 19)

Eine weitere Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit der kleinen KWK-Anlagen positiv zu beeinflussen, besteht in der Optimierung der Betriebsmittelauslegung des gesamten KWK-Anlagensystems. Eine optimale Auslegung ist von den lokalen energetischen Nachfragestrukturen der zu versorgenden Objekte abhängig. Da die Mikro-KWK-Anlagen derzeit aufgrund der Herstellerspezifikationen festen energetischen In- und Outputverhältnissen unterliegen, besteht das Systemoptimierungspotenzial im Wesentlichen bei den Wärmespeichern. Hier ist es zukünftig vorstellbar, dass abgeleitet aus den lokalen Wärmebedarfsstrukturen, bei einer optimierten Speicherauslegung entsprechend der KWK-Anlagencharakteristik, Einsparpotenziale durch anschließend optimalen Anlagenbetrieb zu erzielen sind. Diese Einsparungen würden sich durch eine bessere Anlagenauslastung und einen zumindest kurzfristig stromgeführten Anlagenbetrieb ergeben. Dies bedeutet, dass zur Erhöhung des eigengenutzten Elektroenergieanteils eine optimierte Speicherauslegung von den Anlagenherstellern berücksichtigt werden sollte. Problematisch wäre hier die Ermittlung der individuellen Wärmebedarfsstrukturen, welche mit zusätzlichem Aufwand bei der Gesamtsystemauslegung verbunden sind.

Nicht zuletzt können Optimierungspotenziale bei der Anlagenbetriebsführung eine Möglichkeit bieten, um Synergien zwischen lokalen Versorgungszielen des KWK-Anlagenbetreibers und denen des Energieversorgungsunternehmens zu generieren. Wie beiderseitiger Nutzen erzeugt werden kann und welcher Art die Synergieeffekte sein können, wird derzeit mit dem vorgestellten mathematischen Optimiermodell untersucht.

Literatur

- ASUE/FFM 2005:** Arbeitsgemeinschaft für sparsamen umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (ASUE) und Stadt Frankfurt am Main (FFM): BHKW-Kenndaten 2005, Kaiserslautern und Frankfurt, 2005
- BITSCH et al. 2005:** Bitsch, R.; Gjardy, G.; Woldt, T.: Systemintegration großflächig verteilter dezentraler Energieerzeugungen kleiner Leistungen, in: ew – Das Magazin für die Energiewirtschaft, Jg. 104 (2005), Heft 1-2, S. 58-60
- BMU 2005a:** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Nationales Klimaschutzprogramm – Sechster Bericht der interministeriellen Arbeitsgruppe „CO₂-Reduktion“, Berlin: BMU, 2005
- BMU 2005b:** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Kleine Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz, Berlin: BMU, 2005
- BMU 2006:** Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit: Monitoring zur Wirkung des novellierten EEG auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Solarenergie, insbesondere der Photovoltaik-Freiflächen, 2. Zwischenbericht, Berlin, 31.01.2006
- BMU 2007:** Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit: Erfahrungsbericht 2007 zum Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG), Berlin, 05.07.2007
- BMWA-AT 2005:** Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Industriellenvereinigung, Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs sowie Wirtschaftskammer Österreich: Studie über KWK-Potentiale in Österreich, Villach, November 2005
- DIW/ÖKO-INSTITUT 2007:** DIW, Öko-Institut, VIK: Ermittlung der Potenziale für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung und der erzielbaren Minderung der CO₂-Emissionen einschließlich Bewertung der Kosten (Verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung), Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Dessau, Juli 2007
- EEG 2004:** Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 40: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich, i. d. F. v. 21.07.2004
- EUROSTAT 2007:** Statistisches Amt der europäischen Gemeinschaften, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/> (08/2007)
- FEES 1998:** Fees, E.: Umweltökonomie und Umweltpolitik, 2., völlig überarbeitete und erweiterte Aufl., Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 1998
- FLAUGER 2007:** Flauger, Jürgen: Kraftwerks-Projekten droht das Aus, Handelsblatt v. 5. September 2007, S. 11, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Düsseldorf
- FVS 2004:** Forschungsverbund Sonnenenergie: Brennstoffzellen im Vergleich mit anderen Energiekonversionstechnologien, FVS Themen 2004, S. 162-166, Berlin, 2004
- HESSEN-ENERGIE 2004:** Hessisches Förderprogramm „Klein-Blockheizkraftwerke“, Auswertung des Förderprogramms, Langfassung, Wiesbaden, Oktober 2004
- IE 2007:** Institut für Energetik und Umwelt GmbH: Möglichkeiten einer europäischen Biogaseinweisungsstrategie, Teilbericht 1, Leipzig, 2007
- IER 2005:** Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung: Untersuchung der Wirksamkeit des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes, Stuttgart, 2005

- IPCC 2007:** Intergovernmental Panel on Climate Change.: 4. Sachstandsberichts (AR4) des IPCC über Klimaänderungen – Auswirkungen, Anpassungsstrategien, Verwundbarkeiten. Kurzzusammenfassung, 2007
- IUTA 2002:** Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V.: Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung, Duisburg, 2002
- KWKModG 2002:** Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil I Nr. 19: Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz), i. d. F. v. 19.03.2002
- PFÄFFENBERGER et al. 2004:** Pfaffenberger, W.; Hille, M.: Investitionen im liberalisierten Energiemarkt: Optionen, Marktmechanismen, Rahmenbedingungen, Abschlussbericht, Untersuchung im Auftrag des VDEW u. a., Bremen, 2004
- SAWILLION 2004:** Sawillion, M.: Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH: Das Förderprogramm „Klimaschutz-Plus“ des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg – Auswertung des Förderjahrs 2004, Karlsruhe, 2005
- SIMADER et al. 2004:** Simader, G.; Ritter, H.; Benke, G.; Pinter, H.: Mikro- und Mini-KWK-Anlagen in Österreich, Untersuchung im Auftrag der Energieverwertungsagentur – the Austrian Energy Agency (Hrsg.), Wien, 2004
- VDI 2000:** VDI Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenrechnung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000



Dipl.-Ing. Thomas Woldt, geboren 1977, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit Schwerpunkt Energieversorgung an der BTU Cottbus 1997-2003, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Dezentrale Energiesysteme und Speichertechnik 2003-2005, seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Energiewirtschaft der BTU Cottbus mit Forschungsschwerpunkt energiewirtschaftlicher Bewertung dezentraler Energiesysteme und Effizienzsteigerung durch verbrauchsnahe Energieeinsatzoptimierung.



Dipl.-Wirtsch.-Ing. René Pforte, geboren 1971, Ausbildung zum Datenverarbeitungskaufmann 1991-1992, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der TU Dresden 1993 bis 1998, Unternehmensberater für Genossenschaftsbanken 1998 bis 2002, von 2002 bis 2006 Mitarbeiter Controlling, Finanzen und Unternehmensentwicklung im Projektentwicklungsunternehmen BOREAS Energie GmbH, seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Energiewirtschaft mit Forschungsschwerpunkt Erneuerbare Energien.



Prof. Dr. rer. pol. Wolf Fichtner, geboren 1967, Studium des Wirtschaftsingenieurwesens, Universität Karlsruhe 1988-1994, Mitarbeiter am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Universität Karlsruhe 1994-1999, Leitung der Forschungsgruppe Energiesystemanalyse und Umwelt am IIP, Universität Karlsruhe 2000-2004, Leitung verschiedener Projekte bei der EnBW Energie Baden-Württemberg AG 2004-2005, Ruf auf eine W 3 Professur für Energiewirtschaft an die BTU Cottbus (Nachfolge Prof. Schieferdecker), seit 2005 Professur für Energiewirtschaft, BTU Cottbus.