

Primärenergieeinsparung durch KWK-Anlagen in der häuslichen Energieversorgung

Dipl.-Wirt.-Ing. Elmar Pohl*, Dipl.-Ing. David Diarra

OWI – Oel Waerme Institut GmbH, Kaiserstraße 100, 52134 Herzogenrath, *e.pohl@owi-aachen.de

KWK-Anlagen kleiner Leistung, sogenannte Mikro-KWK-Anlagen, drängen derzeit auf den Markt der häuslichen Energieversorgung. Mit der verfügbaren Anlagentechnik wird Strom und Wärme überwiegend in einem konstanten Verhältnis gewandelt, wobei Anlagen mit und ohne Leistungsmodulation angeboten werden. Für die primärenergetische Bewertung wird der Anlagenbetrieb der getrennten Versorgung (Kessel und Netzstrom) mit einer gekoppelten Versorgung (KWK mit Unterstützung von Kessel und Netzstrom) verglichen. Der heute übliche Brennwert-Kessel kann den Brennstoffeinsatz nahezu verlustfrei in Wärme umsetzen. Auf der Stromseite ist ein durchschnittlicher Kraftwerkswirkungsgrad von etwa 40 % zu erwarten. Diese Tatsache macht deutlich, dass eine Primärenergieeinsparung nur auf der Stromseite erfolgen kann, da mit der Brennwert-Nutzung bereits eine Effizienztechnologie vorliegt. In einem System mit Kraftwärmekopplung erfolgt die Versorgung durch eine KWK-Anlage, einen Kessel und ein Kraftwerk. Ein Zusatzheizkessel, sowie ein elektrischer Netzanschluss ermöglichen die Deckung von thermischen und elektrischen Spitzenlasten. Die Netzentnahme bzw. Netzeinspeisung elektrischen Stroms muss primärenergetisch berücksichtigt werden.

Bedarfsseitige und anlagenseitige Eigenschaften

In häuslichen Energiesystemen unterliegt der Strom- und Wärmebedarf sowohl saisonal als auch im Tagesverlauf großen Schwankungen. Abb. 1 verdeutlicht den Verlauf des Strom- und Wärmebedarfs am Beispiel eines Mehrfamilienhauses für einen Wintertag nach VDI 4655 [1]. Als charakteristische Größe des Energiebedarfes ist das Verhältnis von Strom- und Wärmebedarf die Bedarfsstromkennzahl. Diese ist im Allgemeinen nicht identisch mit der Anlagenstromkennzahl, welche dem Verhältnis von produziertem Strom und Wärme entspricht, vgl. Gleichung (1).

$$\sigma_{Bed} = \frac{P_{el,Bed}}{\dot{Q}_{th,Bed}} \neq \sigma_{KWK} = \frac{P_{el,KWK}}{\dot{Q}_{th,KWK}} \quad (1)$$

Für einen optimierten KWK-Einsatz ergeben sich aus dem schwach korrelierten Verlauf der Bedarfsstromkennzahl hohe Anforderungen an den Anlagenbetrieb und Speichermöglichkeiten. Berndt [2] beschreibt in seinem Beitrag, dass die größte Primärenergieeinsparung durch KWK-Einsatz dann erreicht ist, wenn sowohl Strom- als auch Wärmebedarf genau durch die KWK gedeckt werden können. Für ein System ohne Speicher bedeutet dies, dass von der KWK-Anlage zu jedem Zeitpunkt die geforderte Leistung bereitgestellt werden müsste. Heutige KWK-Systeme weisen in der Regel ein konstantes Verhältnis von Strom- zu Wärmeproduktion aus, die Einbindung erfolgt überwiegend wärmegeführt. Eine Beispielanwendung wird nachfolgend vorgestellt.

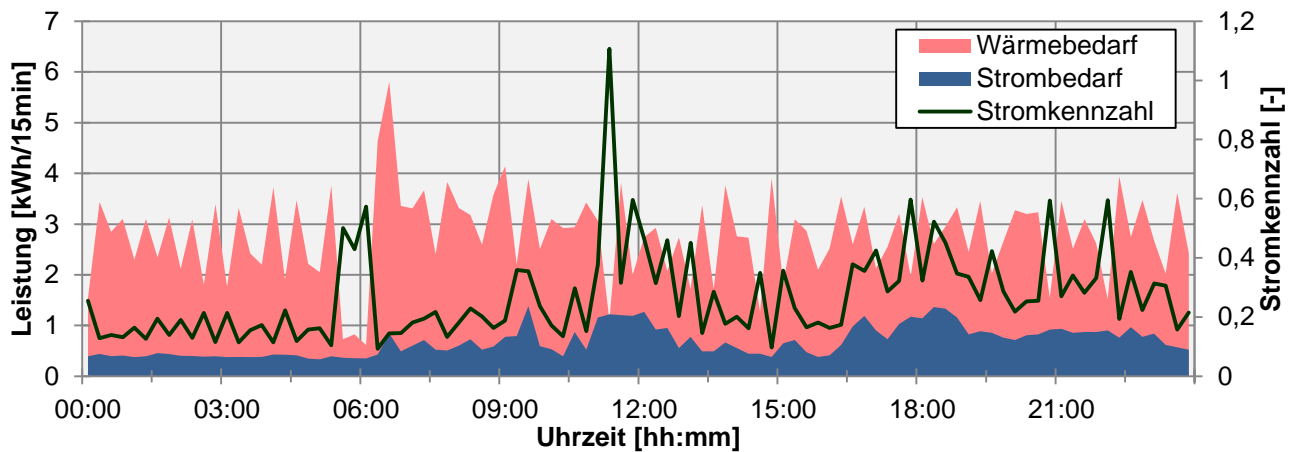


Abb. 1 Wärme- und Strombedarf für einen Wintertag nach VDI 4655 [1]

Tabelle 1 zeigt die Bedarfswerte einer Beispielanwendung. Die über den Tag gemittelte Bedarfsstromkennzahl beträgt $\bar{\sigma}_{Bed,WWH} = 0,24$. Mit Hilfe der Lastprofile der VDI 4655 kann in einem dynamischen Systemmodell der Anlagenbetrieb simuliert und analysiert werden. Der spezifische Heizwärmebedarf entspricht einem Gebäude nach Wärmeschutzverordnung 1995 mit einem Verhältnis von Umfassungsfläche zu Bauwerksvolumen von $A/V=0,7$ [3]. Eine detaillierte Beschreibung der Richtlinie VDI 4655 erfolgte in [4].

Tab. 1 Spezifische Bedarfswerte des häuslichen Energiesystems

		spez. Bedarf		Jahresbedarf		Tagesbedarf WWH	
Heizwärme	$Q_{HL,a}$	80	kWh/m ²	40.000	kWh/a	247,24	kWh/Tag
Strom	$W_{el,a}$	3.000	kWh/WE	21.000	kWh/a	65,31	kWh/Tag
Trinkwasser	$Q_{TW,a}$	1.000	kWh/WE	7.000	kWh/a	20,59	kWh/Tag

Tab. 2 Anlagenwerte der Simulationsrechnung

	Leistungen	Kennzahlen		
KWK	$P_{el,KWK,Nenn} = 4,50 \text{ kW}$	$\eta_{el,KWK} = 0,26$	$\eta_{th,KWK} = 0,69$	$\sigma_{KWK} = 0,38$
Kessel	$\dot{Q}_{K,Nenn} = 12,00 \text{ kW}$	$\eta_{th,K} = 0,95$	-	-
KKW	-	$\eta_{el,KKW} = 0,40$	-	-

Tabelle 2 zeigt die Anlagenkennzahlen für die KWK-Anlage sowie den Kessel und das Kraftwerk. Diese entsprechen den heute üblichen Anlageneigenschaften.

Methodik zur Primärenergiebewertung

Primärenergieverhältnis

In der Bewertungsmethodik wird der Primärenergiebedarf der gekoppelten Versorgung PE mit dem der getrennten Versorgung PE^* verglichen, vgl. Gleichung (2). Das resultierende Primärenergieverhältnis PE/PE^* ist die Bewertungsgröße, aus der mit $1 - PE/PE^*$ die Primärenergieeinsparung berechnet werden kann. Eine detaillierte Herleitung der Methodik erfolgte in [5].

$$\frac{PE}{PE^*} = \frac{(1 - \xi_{el}\psi_{el} - \xi_{th}\psi_{th}) \cdot PE_{KWK} + PE_K + PE_{KKW}}{PE_K + PE_{KKW}} \quad (2)$$

Bei der Netzeinspeisung müssen die primärenergetischen Anteile des eingespeisten Stroms berücksichtigt werden. Mittels des Bewertungsfaktors ξ_i wird der Primärenergieaufwand der KWK-Anlage auf die Anteile Strom und Wärme verteilt. Ein Überblick über vorhandene Bewertungsmethoden ist z.B. bei Arndt [6] oder bei Bourrelle und Gustavsen [7] zu finden. In den folgenden Berechnungen wird die Wirkungsgradmethode angewandt. Dieser Ansatz verteilt den Primärenergieaufwand nach dem energetischen Verhältnis von Strom und Wärme. Der Einspeisefaktor ψ_i drückt den Anteil der eingespeisten Energie bezogen auf die produzierte Energie aus.

$$\xi_{el} = \frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{el,KWK} + \eta_{th,KWK}} ; \xi_{th} = 1 - \xi_{el} \quad (3)$$

$$\psi_{el} = \frac{P_{el,KWK} - P_{el,Bed}}{P_{el,KWK}} ; \psi_{th} = \frac{\dot{Q}_{th,KWK} - \dot{Q}_{th,Bed}}{\dot{Q}_{th,KWK}} \quad (4)$$

Potentiale

Als *theoretisches Potential* wird die Primärenergieeinsparung definiert, die anlagenseitig maximal zu erreichen ist. Formal ausgedrückt ergibt sich folgender Zusammenhang in Abhängigkeit der Anlagenkennzahlen [5]:

$$\left(\frac{PE}{PE^*}\right)_{min} = \frac{\eta_{th,K}\eta_{el,KKW}(1 + \sigma_{KWK})}{\omega(\eta_{el,KKW} + \eta_{th,K}\sigma_{KWK})} \quad (5)$$

Das *technische Potential* ist sowohl von anlagenseitigen als auch bedarfsseitigen Eigenschaften abhängig. Zudem hat die Betriebsweise (Grundlast, wärme- oder stromgeführt) Einfluss auf die Primärenergieeinsparung. Für den Fall der Grundlastabdeckung formulierte Lucas [8] bereits einen formalen Zusammenhang, vgl. Gleichung (6). Die weiteren relevanten Fälle wärmebedarfsgeführte (7) und strombedarfsgeführte (8) Betriebsweise wurden in der Methodik ergänzt, vgl. Tab. 3.

Tab. 3 Anlagenwerte der Simulationsrechnung

Grundlast-Betrieb	$\frac{PE}{PE^*} = \frac{1 + \frac{\sigma_{Bed}\eta_{th,K}}{\eta_{el,KWK}} \left[1 - \frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{th,K}\sigma_{KWK}} + \frac{\eta_{el,KWK}}{\eta_{el,KKW}} \frac{P_{el,KKW}}{P_{el,Bed}} \left(1 - \frac{\eta_{el,KKW}}{\eta_{el,KWK}} + \frac{\eta_{el,KKW}}{\eta_{th,K}\sigma_{KWK}} \right) \right]}{\left(1 + \frac{\sigma_{Bed}\eta_{th,K}}{\eta_{el,KKW}} \right)} \quad (6)$
Wärme-geführt	$\frac{PE}{PE^*} = \frac{\eta_{th,K} \left(1 - \xi_{el} \cdot \left[\frac{\sigma_{KWK} - \sigma_{Bed}}{\sigma_{KWK}} \right] \right)}{\eta_{th,KWK} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{Bed} \cdot \eta_{th,K}}{\eta_{el,KKW}} \right)} \quad (7)$
Strom-geführt	$\frac{PE}{PE^*} = \frac{\eta_{el,KKW} \left(1 - \xi_{th} \cdot \left[\frac{\sigma_{Bed} - \sigma_{KWK}}{\sigma_{Bed}} \right] \right)}{\eta_{el,KWK} \left(1 + \frac{\eta_{el,KKW}}{\sigma_{Bed}\eta_{th,K}} \right)} \quad (8)$

Abbildung 2 zeigt das Primärenergieverhältnis in Abhängigkeit der Stromkennzahl. Punkt ,O' in Abb. 2 beschreibt das theoretische Einsparpotential des Anlagenbetriebs der zuvor beschriebenen Beispielanwendung und beträgt nach Gleichung (5) $(PE/PE^*)_{min} = 0,73$. Dieser Betriebspunkt ist erreichbar, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind:

- Die Anlagenstromkennzahl entspricht der Bedarfsstromkennzahl.
- Die erzeugte (el. und th.) Leistung entspricht dem (el. und th.) Bedarf.

Die Bedarfsstromkennzahl des Winterprofils ist kleiner als die Anlagenstromkennzahl, in der Abb. 2 rechts von Punkt ,O' zu erkennen. Der Punkt ,U' entspricht dem technischen Potential des Energiebedarfs für den Wintertag WWH und beträgt $PE/PE^* = 0,79$. Dies ist das kleinstmögliche PE-Verhältnis unter Berücksichtigung von *Anlagen- und Bedarfswerten*. Der grün eingezeichnete Punkt ,WWH' in Abb. 2 ist der mit dem dynamischen Modell simulierte Betriebspunkt der Anlage. Das durch Simulation ermittelte Primärenergieverhältnis beträgt $PE/PE^* = 0,82$ und ist damit deutlich kleiner als das theoretische Potential. Abbildung 3 zeigt den Einfluss einer Variation der elektrischen Nennleistung auf das Primärenergieverhältnis und die Deckungsgrade. Im Auslegungspunkt liegt das PE-Verhältnis bereits nahe dem Minimum, eine deutliche Erhöhung oder Verminderung der Nennleistung ist mit einer Reduzierung der Primärenergieeinsparung verbunden.

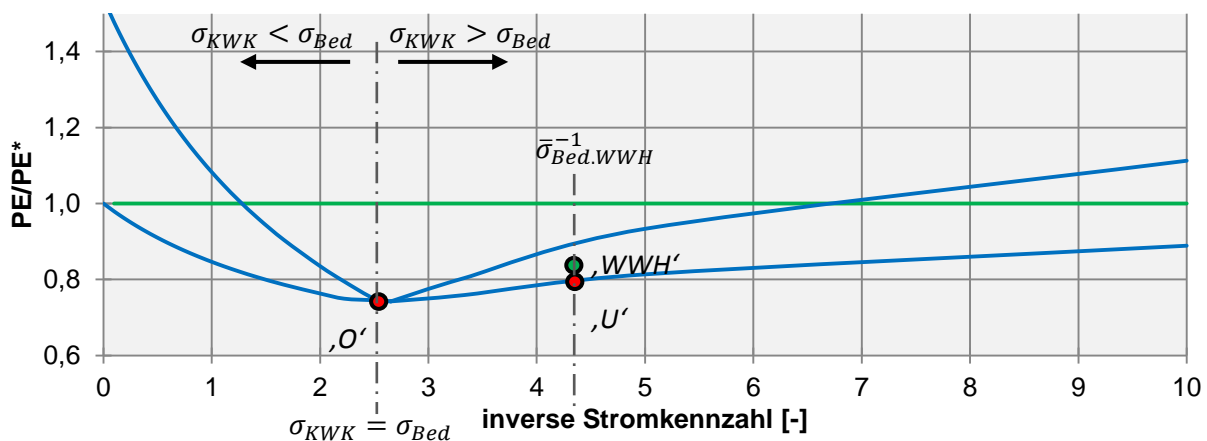


Abb. 2 Primärenergieverhältnis in Abhängigkeit der Stromkennzahl

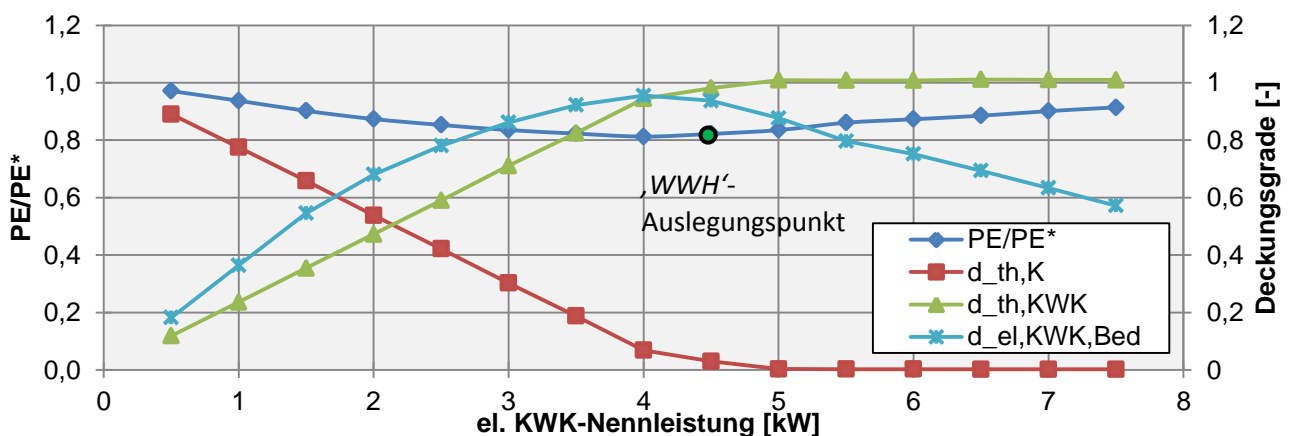


Abb. 3 Primärenergieverhältnis in Abhängigkeit der elektrischen KWK-Nennleistung

Vergleich der thermischen und elektrischen Leistungsbilanzen

Während thermische Speicher dem Stand der Technik entsprechen, haben sich elektrische Speicher (z.B. Batterien, Kondensatoren, Schwungräder etc.) bisher nicht in der Haustechnik durchsetzen können. Speicher können den zeitlichen Versatz von Angebot und Bedarf bei ausreichender Kapazität grundsätzlich ausgleichen. In jedem Speicherzyklus muss jedoch die Leistungsbilanz ausgeglichen sein, da ansonsten ein Speicher in den nächsten Zyklen entweder leer- oder überläuft.

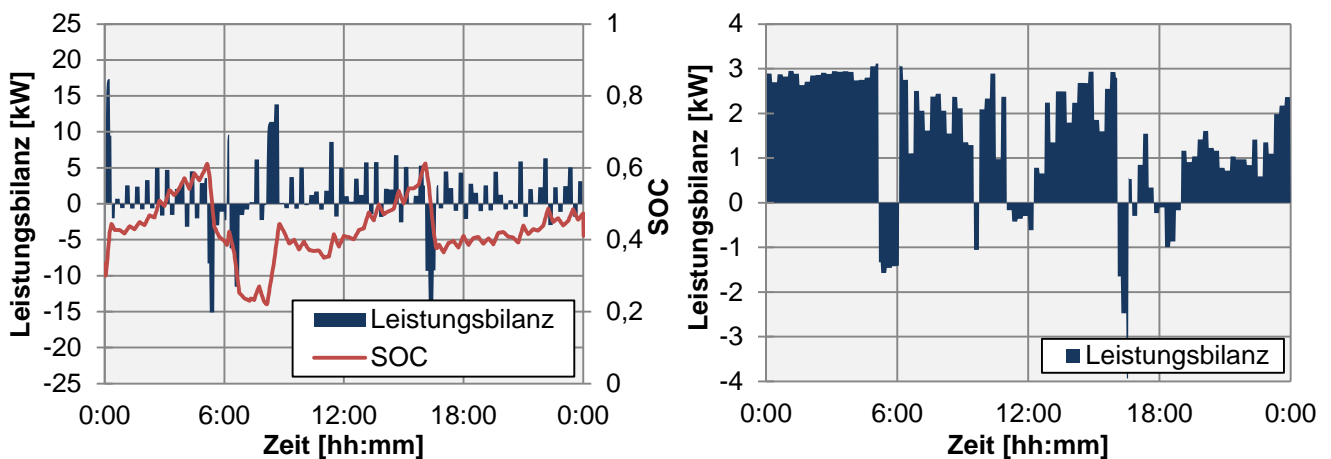


Abb. 4 Leistungsbilanzen thermisch (links) und elektrisch (rechts)

Wenn das Verhältnis von Strom- zu Wärmebedarf nicht dem Verhältnis von Strom- zu Wärmeangebot der KWK-Anlage entspricht ($\sigma_{Bed} \neq \sigma_{KWK}$), dann kann auch nur eine Energieform sinnvoll gespeichert werden. Bedarf und Angebot können in einer Leistungsbilanz gegenübergestellt werden. Abb. 4 links zeigt die Leistungsbilanz (blau) und den Speicherbeladungsgrad (rot) über die Zeit für den Wärmebedarf des Winterprofils. Die Summe der gespeicherten und entnommenen Leistungen ist ausgeglichen, der Speicherbeladungsgrad entspricht am Ende des Zyklus etwa dem Anfangszustand. Aus der Abb. 4 rechts geht hervor, dass die elektrische Leistungsbilanz nicht ausgeglichen ist. In dem hier gezeigten Fall ist die Bedarfsstromkennzahl größer als die Anlagenstromkennzahl, daher wird mehr Strom produziert als im System benötigt wird. In den folgenden Zyklen würde der Speicher überlaufen. Auch beim Einsatz von Speichern müssen die über den Zyklus gemittelten Stromkennzahlen übereinstimmen, um eine Einspeisung oder Entnahme zu verhindern. Für einen sinnvollen Speichereinsatz muss die gemittelte Stromkennzahl der Anlage, mit der des Bedarfs übereinstimmen. Aus der Leistungsbilanz können auch Rückschlüsse auf die benötigte Speichertechnologie gezogen werden. Der Speicherladungsgrad kann als dimensionslose Leistung interpretiert werden. Aus dem Verlauf zeigen sich Speicherkapazitäten, zulässige Beladungszustände und die Geschwindigkeitsänderung der Leistungsauf-, bzw. Abnahme (Leistungsgradienten).

Fazit

Für die Bestimmung des primärenergetischen Einsparpotentials durch den Einsatz von KWK-Anlagen sind sowohl anlagenseitige als auch bedarfsseitige Eigenschaften zu

untersuchen. Am Beispiel eines Wintertages wurde gezeigt, dass die tatsächliche Primärenergieeinsparung kleiner ist, als das theoretische Potential des KWK-Anlagenbetriebs. In den Sommertagen ist die Laufzeit der Anlage deutlich kürzer, das Einsparpotential reduziert sich dadurch. Die Betrachtungen haben gezeigt, dass das Einsparpotential auf der Stromseite liegt. KWK-Anlagen mit hohen Stromkennzahlen weisen ein hohes theoretisches primärenergetisches Einsparpotential auf. Damit dieses Potential erschlossen werden kann, muss die Anlagentechnik Strom und Wärme bedarfsgerecht bereitstellen. Durch eine variable Stromkennzahl und den Einsatz von Energiespeichern kann das technische Potential an das theoretische Potential angenähert werden. Durch die anlagenseitigen und bedarfsseitigen Eigenschaften ist das Einsparpotential jedoch festgelegt.

Nomenklatur

<i>Römische Buchstaben</i>		<i>Griechische Buchstaben</i>		<i>Indices</i>	
<i>d</i>	Deckungsgrad	η	Wirkungsgrad	<i>Bed</i>	Bedarf
<i>P</i>	el. Leistung	ξ	Bewertungsfaktor	<i>el</i>	elektrisch
<i>PE</i>	Primärenergie	σ	Stromkennzahl	<i>HL</i>	Heizlast
\dot{Q}	Wärmeleistung	ψ	Einspeisefaktor	<i>K</i>	Kessel
<i>Q</i>	Wärmeenergie	ω	Gesamtwirkungsgrad	<i>KWK</i>	Kraftwärmekopplung
<i>W</i>	el. Energie			<i>KKW</i>	Kraftwerk
				<i>min</i>	Minimum
				<i>th</i>	thermisch
				<i>TW</i>	Trinkwasser

Literaturverzeichnis

- [1] VDI 4655, Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, 2008.
- [2] T. Berndt, „GuD-Kraftwerk, Wärmepumpe und (oder) KWK?“, *BWK - Das Energie Fachmagazin* Jg.: 63, Nr.7/8, pp. 55-62, 2011.
- [3] WärmeschutzV, „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden“, 1994.
- [4] G. Dubielzig, Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, VDI-Verlag, 2007.
- [5] E. Pohl und D. Diarra, „Methodik zur Bewertung der Primärenergieeinsparung von KWK-Anlagen am Beispiel der häuslichen Energieversorgung (Assessment Method for Primary Energy Savings of CHP Systems)“, in *Proceedings of Aachener Oel-Waerme-Kolloquium*, Aachen, 2012.
- [6] U. Arndt, „Optimierung von KWK-Systemen zur Hausenergieversorgung mittels prüfstandsgestützter Simulation (Optimization of cogeneration systems for domestic energy supply through test rig-based simulation)“, TU München, München, 2008.
- [7] J. Bourrelle und A. Gustavsen, „Allocating GHG Emissions to the Co-Products of micro Cogeneration - The Case of Emission Balance in Zero Emission Buildings (ZEBs)“, 2011.
- [8] K. Lucas, „On the thermodynamics of cogeneration“, *International Journal of Thermal Science* Vol. 39, Issues 9-11, pp. 1039-1046, 2000.