

Vorschlag zur Neuregelung der Brennstoff-Allokation bei der Kraft-Wärme-Kopplung

Ad hoc Arbeitsgruppe KWK-Bewertung
DIN NA 041-05-01 NHRS

Überarbeitete und ergänzte Version
Darmstadt, den 19.02.2014
Autor: Michael Hörner

Inhalt

1	Vorschlag einer künftigen Brennstoff-Allokation bei Kraft-Wärme-Kopplung	1
2	Einleitung.....	4
3	Brennstoffallokation bei der Kraft-Wärme-Kopplung.....	5
3.1	Grundlagen und Nomenklatur.....	5
3.2	Allokationsverfahren	7
4	Herleitung der Bestimmungsgleichungen für die zugeordneten Größen	7
4.1	Stromgutschrift-Methode	7
4.2	Stromkompensations-Methode	9
4.3	Exergie-Methode	10
4.4	Gesamteffizienz-Methode.....	11
5	Vergleich der Methoden	12
5.1	Randbedingungen der Allokation.....	12
5.2	Vergleich für verschiedene KWK-Systeme	13
5.3	Ergebnisse des Vergleichs.....	15
5.3.1	Zugeordnete Nutzungsgrade	15
5.3.2	Zugeordnete Primärenergiefaktoren	18
5.3.3	Zugeordnete CO ₂ -Faktoren.....	22
5.4	Vor- und Nachteile der Methoden	24
6	Energiebezug am Gebäude	26
6.1	Wärme	26
6.2	Strom	26
6.3	Bilanzraum.....	27
6.4	Wärmeverteilnetze und Koppelbetrieb.....	27

1 Vorschlag einer künftigen Brennstoff-Allokation bei Kraft-Wärme-Kopplung

Das Ziel der Brennstoff-Allokation ist es, die Effizienzvorteile der Kraft-Wärme-Kopplung auf der Basis fossiler Brennstoffe gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme in geeigneter Weise auf die Koppelprodukte zu übertragen. Nur so kann ein Vergleich mit getrennten Erzeugungssystemen geführt werden, der unter anderem durch die gesetzlichen Randbedingungen im Bilanzkreis der EnEV für Wärmeerzeuger erforderlich wird.

Die zukünftige Allokationsmethode sollte folgenden Anforderungen gerecht werden:

- Sie sollte frei sein von Definitions-Problemen wie z.B. nicht definierten zugeordneten Nutzungsgraden oder negativen Primärenergie- oder CO₂-Faktoren.
- Sie sollte auf alle Arten der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme anwendbar sein, vom kleinsten Mikro-Stirling bis zum größten Heizkraftwerk
- Sie sollte für alle Brennstoffe, auch für biogene, gelten.
- Die Minimierung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im Gesamtsystem des Gebäudes ist das Ziel, über die EnEV-Anforderungen hinausgehende, Effizienzpotenziale durch erhöhten Wärmeschutz am Gebäude sollten durch „zu gut“ bewertete Wärme aus KWK-Anlagen nicht unattraktiv werden. Das Werturteil „zu gut“ lässt sich ungefähr in folgende Mindestempfehlungen übersetzen: Der zugeordnete Primärenergiefaktor der Wärme sollte größer Null sein - $f_{p,CHP,Wärme} > 0$ - und der Strom soll nicht schlechter bewertet werden als der Verdrängungsstrommix - $f_{p,CHP,Strom} \leq f_{p,Verdrängungsmix}$.
- Darüber hinaus ist eine einheitliche Allokation auf Gebäudeebene und auf der Ebene der nationalen Energiebilanzen erforderlich, um die doppelte Anrechnung der Vorteile der Kraft-Wärme-Kopplung zu vermeiden.
- Die Auswirkungen der Allokationsmethode müssen letztlich mit den Zielen des Gesamtenergiekonzepts für Deutschland bzw. Europa abgestimmt und an den Klimaschutzzielen gemessen werden.

Es wird vorgeschlagen, die Brennstoff-Allokation gemäß den Bestimmungsgleichungen 1-1, 1-2 und 1-3 für die zugeordneten Größen Nutzungsgrad, Primärenergiefaktor und CO-Faktor für Wärme und Strom vorzunehmen. Die Effizienzvorteile der Kraft-Wärme-Kopplung werden mit einem Bewertungsfaktor von $\gamma = 2,35$ in angemessener Weise auf beide Koppelprodukte aufgeteilt.

$$1-1 \quad \eta_{Wärme,CHP} = \eta_{th,CHP} + \gamma \eta_{el,CHP} \quad \text{mit } \gamma = 2,35$$

$$\eta_{Strom,CHP} = \eta_{el,CHP} + \frac{1}{\gamma} \eta_{th,CHP}$$

$$1-2 \quad f_{p,CHP,Wärme} = \frac{f_{p,Brennstoff}}{\eta_{Wärme,CHP}}$$

$$f_{p,CHP,Strom} = \frac{f_{p,Brennstoff}}{\eta_{Strom,CHP}}$$

$$1-3 \quad f_{CO_2,CHP,Wärme} = \frac{f_{CO_2,Brennstoff}}{\eta_{Wärme,CHP}}$$

$$f_{CO_2,CHP,Strom} = \frac{f_{CO_2,Brennstoff}}{\eta_{Strom,CHP}}$$

Damit geht eine Bewertung des KWK-Stroms einher, die sich vom Strommix unterscheidet. Deshalb sollen der zugeordnete Primärenergiefaktor und der CO₂-Faktor des Stromes neben den Kennwerten der Wärme immer mit ausgewiesen werden.

Zugeordnete Kenngrößen für beispielhafte Anlagenkonstellationen sind in Tabelle 1-1 dargestellt. Zur Erläuterung der Formelzeichen und Indizes siehe Kap. 3.1.

Eine Alternative zur Brennstoff-Allokation auf Gebäudeebene wäre die Erweiterung des Bilanzkreises im EnEV-Nachweis, insbesondere bei Wohngebäuden, über den Brennstoffbedarf hinaus auf den gesamten Strombedarf. Außerdem müsste der ins Netz eingespeiste Strom und seine Qualität ebenfalls ausgewiesen werden. Wie auch immer allokiert wird, auch die KWK-Systeme müssen sich der Tatsache stellen, dass fossile Brennstoffe zum überwiegenden Teil ersetzt werden müssen, wenn die Klimaschutzziele auch nur annähernd erreicht werden sollen.

Tabelle 1-1 Zugeordnete Kenngrößen der vorgeschlagenen Allokationsmethode für Brennstoff bei verschiedenen KWK-Systemen

KWK-Technologien		Mikro-Stirling (Brennwert- nutzung)	Mikro-KWK	Mini-KWK	Gasmotor (140 kW)	Gasmotor (3,4 MW)	Dieselmotor (1 MW)	Gasturbine (200 kW)	Gasturbine (5,5 MW)	Dampfturbin e (100 MW)	GuD (100 MW)	Brennstoff- zelle (200 kW)	ORC (200 kW)	Kohle-KW Dampfturbin e (100 MW)	Biogas- BHKW (140 kW)
elektrische Leistung	kW	1	5	50	140	3.400	1.000	200	5.500	100.000	100.000	200	200	100.000	140
elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el, CHP, Hi}$	0,04	0,26	0,34	0,36	0,44	0,45	0,19	0,31	0,25	0,5	0,38	0,15	0,35	0,36
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th, CHP, Hi}$	1,03	0,63	0,56	0,55	0,43	0,4	0,56	0,49	0,63	0,45	0,52	0,6	0,45	0,55
Stromkennzahl	σ_{CHP}	0,04	0,41	0,61	0,65	1,02	1,13	0,34	0,63	0,40	1,11	0,73	0,25	0,78	0,65
zugeordnete Nutzungsgrade															
thermisch	$\eta_{Wärme, CHP, Hi, Geff}$	1,12	1,24	1,36	1,40	1,47	1,46	1,01	1,22	1,22	1,63	1,41	0,95	1,27	1,40
elektrisch	$\eta_{Strom, CHP, Hi, Geff}$	0,48	0,53	0,58	0,59	0,62	0,62	0,43	0,52	0,52	0,69	0,60	0,41	0,54	0,59
zugeordnete Primärenergiefaktoren															
Wärme	$f_{p, CHP, Wärme, Hi, Geff}$	0,98	0,89	0,81	0,79	0,75	0,75	1,09	0,90	0,90	0,68	0,78	1,15	0,86	0,36
Strom	$f_{p, CHP, Strom, Hi, Geff}$	2,30	2,08	1,90	1,85	1,77	1,77	2,57	2,12	2,12	1,59	1,83	2,72	2,03	0,84
zugeordnete CO₂-Faktoren		$g_{CO_2/kWh_{Hi}}$													
Wärme	$f_{CO_2, CHP, Wärme, Hi, Geff}$	178	161	147	143	136	137	199	164	164	123	141	210	550	0
Strom	$f_{CO_2, CHP, Strom, Hi, Geff}$	419	379	346	337	321	323	467	386	386	289	333	494	1293	0

2 Einleitung

Im Zusammenhang mit der energetischen Bewertung von Gebäuden ist die Stromgutschrift-Methode das derzeit gängige Allokationsverfahren bei der Kraft-Wärme-Kopplung, es ist in Gestalt der Primärenergiefaktoren für Wärme aus KWK-Anlagen auch in der EnEV 2014¹ normativ verankert. Da sich das zugehörige Referenzsystem, der nationale Mix der Stromerzeugung, mit der Zeit ändert, sind häufige Anpassungen der Faktoren zu erwarten, würde sich auch die Bewertung der Koppelprodukte Wärme und Strom mit der Zeit ändern. In der Brennstoffzuordnung bei Wärme ergeben sich zudem Definitionsschwierigkeiten: Es können negative Werte auftreten, die per Definition zu Null gesetzt werden. Die Wärme wird in der Stromgutschrift-Methode extrem gut bewertet, während der erzeugte Strom auf das Niveau des sogenannten Verdrängungsmixes mit einem Primärenergiefaktor nach EnEV 2014 von $f_{p,ref,el} = 2,8$ „entwertet“ wird. Dabei wird der allgemeine Strommix in kurzen Abständen immer besser bewertet, mit $f_{p,mix} = 2,4$ ab 01.05.2014 und $f_{p,mix} = 1,8$ ab 01.01.2016. KWK-Strom ist also schlechter als der durchschnittliche Strommix. In einer Gebäudeenergiebilanz nach gültiger und auch zukünftiger EnEV kann das zu Problemen in der Bewertung der Wärme führen. Extrem niedrige Primärenergiefaktoren für die Wärme treten in Konkurrenz zum Wärmeschutz, Potenziale eines erhöhten Wärmeschutzes bleiben möglicherweise ungenutzt, ein hoher Energiebedarf von Gebäuden würde langfristig, im wahrsten Sinne des Wortes, „zementiert“. Die Stromgutschrift-Methode steht aus diesen Gründen in der Kritik.

Problematisch erscheint auch die Tatsache, dass der Brennstoffeinsatz in KWK-Anlagen auf der Ebene der nationalen Energiebilanzen² nach einer anderen Methode, nämlich in Anlehnung an die EU-Richtlinie „2004/8/EG über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt“, aufgeteilt wird. Dadurch wird der Wärme auf der nationalen Ebene deutlich mehr und dem Strom deutlich weniger Brennstoff zugeordnet als auf der Gebäudeebene.

Es stellt sich die Frage, wie der Effizienzvorteil der Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber der überwiegend getrennten Erzeugung von Strom und Wärme im heutigen Energiesystem besser abgebildet werden kann, ohne die oben dargestellten, unerwünschten Nebeneffekte. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass die KWK-Anlage mit einer reinen Wärmeerzeugungsanlage verglichen werden soll.

Die Hauptschwierigkeit bei der Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung entsteht durch die Tatsache, dass die Koppelprodukte Strom und Wärme thermodynamisch sehr unterschiedliche Qualitäten haben. Ein Allokationsverfahren, das den Brennstoffeinsatz auf einfache Weise aus dem Prozess heraus den Koppelprodukten zuordnet, wurde bisher nicht vorgeschlagen. Es ist daher nicht möglich, den zugeordneten Nutzungsgrad oder die Heizzahl einer KWK-Anlage zu bestimmen, ohne zusätzliche, außerhalb des Prozesses liegende Annahmen zu treffen³.

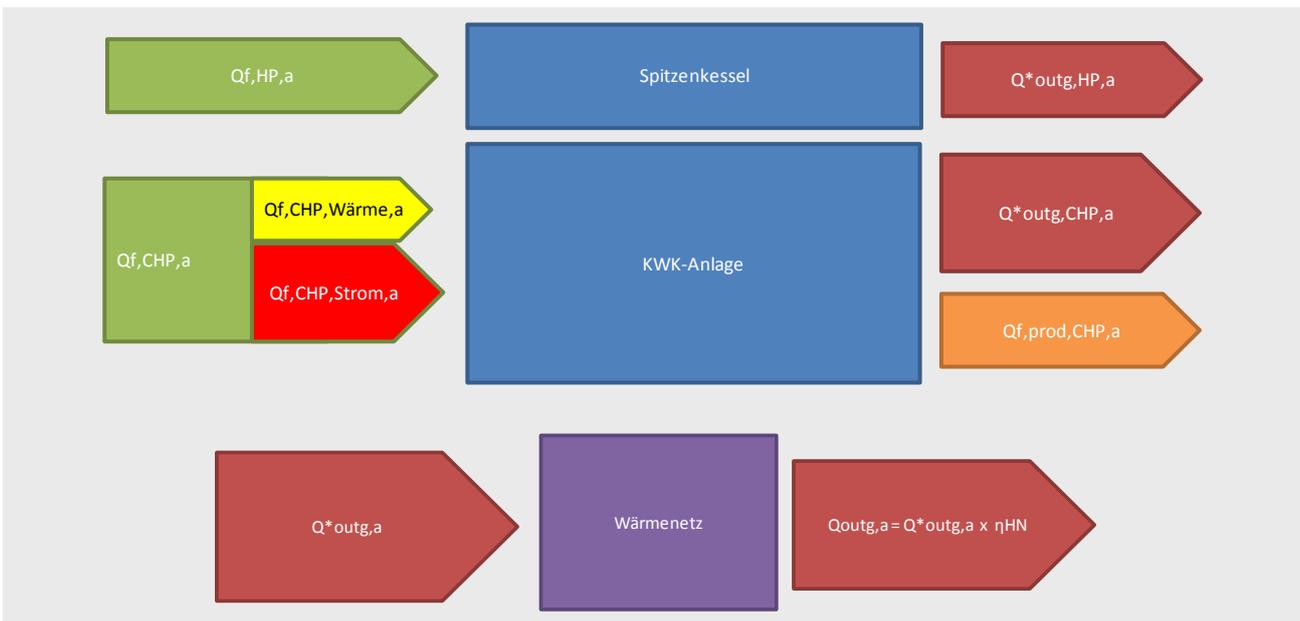
Vier Allokationsmethoden sind im Folgenden beschrieben und werden hinsichtlich ihrer Konsequenzen für die Allokation des Brennstoffs auf die Koppelprodukte analysiert. Die Grundlagen der Brennstoff-Allokation bei Kraft-Wärme-Kopplungssystemen und die Nomenklatur werden in Kap. 3 vorgestellt. Drei Allokationsmethoden werden als Alternativen zur Stromgutschrift-Methode (vgl. Kap. 4.1) betrachtet, die Stromkompensationsmethode (vgl. Kap. 4.2), die Exergie-Methode (vgl. Kap. 4.3) und die Gesamteffizienz-Methode (vgl. Kap. 4.4). In Kap. 5 werden die Ergebnisse der Anwendung der Methoden auf übliche KWK-Systeme verschiedener Größenordnung und Ausprägung verglichen. Was bei einer Gebäudeenergiebilanz beachtet werden muss, wenn KWK-Systeme berücksichtigt werden, ist Gegenstand von Kap. 6.

3 Brennstoffallokation bei der Kraft-Wärme-Kopplung

3.1 Grundlagen und Nomenklatur

Bei der Brennstoffallokation wird der in einer Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) eingesetzte Brennstoff auf die Produkte Strom und Wärme aufgeteilt. Diese Allokation ist von praktischer Bedeutung, wenn Wärme aus KWK-Anlagen mit solcher aus ungekoppelter Erzeugung verglichen werden soll. Dies geschieht z.B. häufig bei Berechnungen im Bilanzkreis nach EnEV, der insbesondere bei Wohngebäuden hauptsächlich den Brennstoff-/Fernwärmebedarf zur Wärmeerzeugung und nur einen sehr geringen Anteil des elektrischen Energiebedarfs bilanziert.

Bild 3-1 Nomenklatur der Energieströme in der Darstellung des Allokationsverfahrens in Anlehnung an DIN V 18599



Zu bestimmen sind die beiden in Bild 3-1 in gelb und rot dargestellten Größen $Q_{f,CHP,Wärme,a}$ und $Q_{f,CHP,Strom,a}$, also der Brennstoffanteil, der der erzeugten Wärme zugeordnet wird, und der Anteil des Brennstoffs, der dem erzeugten Strom zugeordnet wird. Für die Darstellung wird eine Nomenklatur in Anlehnung an die DIN V 18599 verwendet. Anders als dort gilt in den weiteren Ausführungen der Heizwert-Bezug bei Brennstoffen.

Es gelten die üblichen Definitionen des thermischen und elektrischen Nutzungsgrads einer KWK-Anlage und die entsprechenden Definitionen für Referenzanlagen

3-1

$$\eta_{th,CHP} = \frac{Q_{out,CHP,a}}{Q_{f,CHP,a}}$$

$$\eta_{el,CHP} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,CHP,a}}$$

$$\eta_{ges,CHP} = \eta_{th,CHP} + \eta_{el,CHP}$$

$$\eta_{th,Ref} = \frac{Q_{out,CHP,a}}{Q_{f,Ref,th,a}}$$

$$\eta_{el,Ref} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,Ref,el,a}}$$

Es wird dabei angenommen, dass die erzeugten Mengen an Wärme $Q_{out,CHP,a}$ und Strom $Q_{f,prod,CHP,a}$ im Referenzsystem gleich denen im KWK-System sind. $Q_{f,Ref,th,a}$ und $Q_{f,Ref,el,a}$ stehen für den Endenergiegehalt der Brennstoffe, die zur Wärme- oder Stromerzeugung im Referenzsystem eingesetzt werden.

Per Definition gilt die Gleichung

$$3-2 \quad Q_{f,CHP,a} = Q_{f,CHP,Wärme,a} + Q_{f,CHP,Strom,a}$$

Das ist eine Gleichung mit zwei Unbekannten, den Brennstoffanteilen $Q_{f,CHP,Wärme,a}$ und $Q_{f,CHP,Strom,a}$. Üblicherweise führt man die Allokationsfaktoren $a_{Wärme}$ und a_{Strom} ein und schreibt Gl. 3-2 in zwei Gleichungen

$$3-3 \quad a_{Wärme} = \frac{Q_{f,CHP,Wärme,a}}{Q_{f,CHP,a}}$$

$$3-4 \quad a_{Strom} = \frac{Q_{f,CHP,Strom,a}}{Q_{f,CHP,a}}$$

mit der Nebenbedingung $a_{Wärme} + a_{Strom} = 1$. Zur Bestimmung von geeigneten Allokationsfaktoren sind zusätzliche Annahmen erforderlich. Verschiedene Methoden werden in den folgenden Kapiteln dargestellt und verglichen.

Sind die den einzelnen Koppelprodukten zugeordneten Endenergiemengen bestimmt, lassen sich die zugeordneten Kenngrößen Nutzungsgrad, Primärenergiefaktor und CO₂-Faktor definieren. Die zugeordneten Nutzungsgrade ergeben sich zu

$$3-5 \quad \eta_{Wärme,CHP} = \frac{Q_{outg,CHP,a}}{Q_{f,CHP,Wärme,a}} = \frac{\eta_{th,CHP}}{a_{Wärme}}$$

$$3-6 \quad \eta_{Strom,CHP} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,CHP,Strom,a}} = \frac{\eta_{el,CHP}}{a_{Strom}}$$

Damit kann die KWK-Anlage als getrennte Wärme- oder als Stromerzeugungsanlage betrachtet und bewertet werden bzw. mit anderen getrennten Erzeugungsanlagen direkt verglichen werden. Anders als die üblicherweise verwendeten thermischen und elektrischen Nutzungsgrade bei KWK-Anlagen beziehen sich diese nicht auf den gesamten Brennstoffeinsatz sondern nur auf einen Teil desselben. Sie nehmen also immer größere Zahlenwerte an als jene.

Den Koppelprodukten können dann der Primärenergiefaktor und der CO₂-Faktor zugeordnet werden, die aus dem zugeordneten Nutzungsgrad abgeleitet werden können. Für die erzeugte Wärme gilt:

$$3-7 \quad f_{p,CHP,Wärme} = \frac{Q_{p,CHP,Wärme}}{Q_{outg,CHP}} = \frac{Q_{f,CHP,Wärme}}{Q_{outg,CHP}} \frac{f_{p,Brennstoff}}{Q_{outg,CHP}} = \frac{f_{p,Brennstoff}}{\eta_{Wärme,CHP}}$$

$$f_{CO_2,CHP,Wärme} = \frac{M_{CO_2,CHP,Wärme}}{Q_{outg,CHP}} = \frac{Q_{f,CHP,Wärme}}{Q_{outg,CHP}} \frac{f_{CO_2,Brennstoff}}{Q_{outg,CHP}} = \frac{f_{CO_2,Brennstoff}}{\eta_{Wärme,CHP}}$$

Anders als in der bisherigen Stromgutschriftmethode, in der Strom auf Grundlage des durchschnittlichen Strommixes bewertet wurde, wird durch die Brennstoff-Allokation in der hier betrachteten Methoden auch der KWK-Strom primärenergetisch individuell bewertet; das gilt auch für die Stromgutschriftmethode nach EnEV 2014 bzw. DIN V 18599:2011-12, da der KWK-Strom mit dem Verdrängungsmix schlechter als der durchschnittliche Netzmix bewertet wird. Es ergibt sich ein eigener Primärenergie- und ein CO₂-Faktor:

3-8

$$f_{p,CHP,Strom} = \frac{Q_{f,CHP,Strom} f_{p,Brennstoff}}{Q_{f,prod,CHP}} = \frac{f_{p,Brennstoff}}{\eta_{Strom,CHP}}$$

$$f_{CO_2,CHP,Strom} = \frac{Q_{f,CHP,Strom} f_{CO_2,Brennstoff}}{Q_{f,prod,CHP}} = \frac{f_{CO_2,Brennstoff}}{\eta_{Strom,CHP}}$$

In Allokationsmethoden, die Bezüge zu Referenzanlagen nutzen, gelten die Gln. 3-7 und 3-8 nur, wenn die Primärenergiefaktoren und CO₂-Faktoren der Referenzsysteme mit denen der betrachteten KWK-Anlagen übereinstimmen. In den folgenden Kapiteln werden die Formeln auch für unterschiedliche Brennstoffe verallgemeinert.

3.2 Allokationsverfahren

Ziel jedes Allokationsverfahrens ist es, den Brennstoffeinsatz der KWK-Anlage plausibel auf die Koppelprodukte Strom und Wärme aufzuteilen. Die Allokationsfaktoren in den hier betrachteten Verfahren werden jedoch nicht physikalisch aus dem Prozessablauf hergeleitet, sondern der Prozess wird als „black box“ betrachtet und den Koppelprodukten werden nach verschiedenen Verfahren Anteile des Brennstoffeinsatzes zugeordnet.

- Die Stromgutschrift-Methode bewertet den erzeugten Strom mit der Primärenergienmenge, die im Referenzenergiesystem durch die gekoppelte Stromerzeugung verdrängt wird. Als Referenzsystem wird mit der EnEV 2014 der jeweils aktuelle Verdrängungsstrommix angesetzt. Die Differenz zu der Primärenergienmenge $Q_{p,CHP,av}$, die insgesamt in die KWK-Anlage geht, wird der Wärme zugeordnet. Die Methode wird deshalb auch Wärmerestwert-Methode genannt.
- Die Stromkompensationsmethode⁴ bewertet den erzeugten Strom mit der Endenergienmenge, die durch die heute bestmögliche Vergleichsanlage der getrennten Stromerzeugung benötigt würde, einem GuD-Kraftwerk mit einem Nettonutzungsgrad von 58,5%. Der Wärme wird die Differenz zur Endenergienmenge $Q_{f,CHP,av}$, die insgesamt in die KWK-Anlage geht, zugeordnet. Damit wird jegliche Art von Stromverlust durch gekoppelte Wärmeerzeugung mit welcher KWK-Technologie auch immer oder durch die Wahl eines anderen Brennstoffes als Erdgas automatisch der Wärmeerzeugung zugeordnet.
- Die exergetische Methode macht die qualitativ unterschiedlichen Koppelprodukte Strom und Wärme über ihre Arbeitsfähigkeit vergleichbar und verteilt den Brennstoff auf die beiden Koppelprodukte im Verhältnis ihres Exergiegehalts.
- Die Gesamteffizienzmethode verteilt den Effizienzvorteil der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme gegenüber der getrennten Erzeugung in „alten“ Referenzanlagen in gleichem Maße auf die Koppelprodukte⁵, wofür auf den Effizienzstandard des Jahres 1990 zurückgegriffen wird.

4 Herleitung der Bestimmungsgleichungen für die zugeordneten Größen

4.1 Stromgutschrift-Methode

In DIN V 18599-9:2011-12 ist die Stromgutschrift-Methode in der Definition des Primärenergiefaktors für Wärme aus der KWK-Anlage enthalten⁶. Setzt man vereinfachend den KWK-Deckungsanteil $\kappa = 1$, dann gilt die Formel

$$f_{p,CHP,Wärme} \stackrel{!}{=} f_{p,Brennstoff,CHP} \frac{1 + \sigma_{CHP}}{\eta_{ges,CHP}} - \sigma_{CHP} \cdot f_{p,ref,el}$$

4-1

$$= \frac{f_{p,Brennstoff,CHP}}{\eta_{th,CHP}} - \sigma_{CHP} \cdot f_{p,ref,el}$$

und

$$f_{p,CHP,Strom} \stackrel{!}{=} f_{p,ref,el}$$

4-2

Dabei ergibt sich der Primärenergiefaktor des Verdrängungsmixes $f_{p,ref,el}$ aus dem Primärenergiefaktor des zugehörigen Brennstoffmixes und dem durchschnittlichen Nutzungsgrad der Stromerzeugung

$$f_{p,ref,el} = \frac{f_{p,ref,Brennstoff}}{\eta_{el,ref}}$$

4-3

Nach EnEV 2014 wird der Verdrängungsstrommix des aktuellen Energiesystems mit $f_{p,ref,el} = 2,8$ als Referenz definiert. Der Primärenergiefaktor $f_{p,CHP,Wärme}$ kann negative Werte annehmen, wenn der zweite Term in Gl. 4-1 größer als der erste ist. Deshalb gilt genauer gesagt

$$f_{p,CHP,Wärme} = \max \left(\frac{f_{p,Brennstoff,CHP}}{\eta_{th,CHP}} - \sigma_{CHP} \cdot f_{p,ref,el} ; 0 \right)$$

4-4

Anders ausgedrückt bedeutet die Festlegung in Gl. 4-1, dass in der Stromgutschrift-Methode dem in KWK erzeugten Strom die Primärenergie zugeordnet wird, die im heutigen Verdrängungsstrommix zur Erzeugung der gleichen Strommenge benötigt würde,

$$Q_{p,CHP,Stroma} \stackrel{!}{=} Q_{p,Ref,el,a} = Q_{f,prod,CHP,a} \cdot f_{p,ref,el}$$

4-5

und der Wärme der nach Abzug dieser Referenz-Primärenergiemenge übrige Rest der insgesamt der KWK-Anlage zugeführten Primärenergiemenge

$$Q_{p,CHP,Wärme,a} = Q_{p,CHP} - Q_{p,Ref,el,a}$$

4-6

Sinngemäß gilt dies auch für die CO₂-Faktoren mit einem Referenz-CO₂-Faktor $f_{CO_2,ref,el} \approx 750 \text{ g}_{CO_2}/\text{kWh}_{el}$

$$f_{CO_2,CHP,Strom} = f_{CO_2,ref,el}$$

4-7

$$f_{CO_2,CHP,Wärme} = \frac{M_{CO_2,CHP,Wärme,a}}{Q_{outg,CHP,a}} = \frac{f_{CO_2,Brennstoff,CHP}}{\eta_{th,CHP}} - \sigma_{CHP} \cdot f_{CO_2,ref,el}$$

Damit ergibt sich nach Gl. 3-4 für den Allokationsfaktor a_{Strom} , hier als Verhältnis der Primärenergien ausgedrückt, da der Brennstoffmix im Referenzsystem sich hinsichtlich des Primärenergiefaktors vom Brennstoff des KWK-Systems unterscheiden kann

$$a_{Strom} = \frac{Q_{p,CHP,Stroma}}{Q_{p,CHP,a}} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a} \cdot f_{p,ref,el}}{Q_{f,CHP,a} \cdot f_{p,Brennstoff,CHP}} = \eta_{el,CHP} \frac{f_{p,ref,el}}{f_{p,Brennstoff,CHP}}$$

4-8

Der Wärme wird der Rest der Brennstoff-Endenergie zugewiesen, der sich aus Gl. 4-6 ergibt

$$4-9 \quad Q_{f,CHP,Wärme,a} = \max \left(\frac{Q_{f,CHP,a} \cdot f_{p,Brennstoff,CHP} - Q_{f,prod,CHP,a} \cdot f_{p,ref,el}}{f_{p,Brennstoff,CHP}} ; 0 \right).$$

Negative Werte können sich dabei ergeben, wenn z.B. bei Stromkennzahlen über Eins oder bei biogenen Brennstoffen mit Primärenergiefaktoren deutlich kleiner als Eins. Per Definition wird dann der Brennstoffbedarf für Wärme zu Null gesetzt. Damit ergibt sich der Allokationsfaktor $a_{Wärme}$

$$4-10 \quad a_{Wärme} = \max \begin{cases} \frac{Q_{f,CHP,Wärme,a}}{Q_{f,CHP,a}} = 1 - \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,CHP,a}} \frac{f_{p,ref,el}}{f_{p,Brennstoff,CHP}} = 1 - \eta_{el,CHP} \frac{f_{p,ref,el}}{f_{p,Brennstoff,CHP}} \\ 0 \end{cases}$$

Und die zugeordneten Nutzungsgrade ergeben sich in der Stromgutschrift-Methode aus den allgemeinen Gln. 3-5 und 3-6 wie folgt

$$4-11 \quad \eta_{Strom,CHP} = \frac{\eta_{el,CHP}}{a_{Strom}} = \frac{f_{p,Brennstoff,CHP}}{f_{p,ref,el}} \approx \eta_{el,Ref}$$

$$\eta_{Wärme,CHP} = \begin{cases} \frac{\eta_{th,CHP}}{a_{Wärme}} = \frac{\eta_{th,CHP} \cdot f_{p,Brennstoff,CHP}}{f_{p,Brennstoff,CHP} - \eta_{el,CHP} \cdot f_{p,ref,el}} & \text{für } a_{Wärme} > 0 \\ \text{nicht definiert} & \text{für } a_{Wärme} = 0 \end{cases}$$

Da der Allokationsfaktor auch Null werden kann, können sich nicht gültige Werte des zugeordneten Nutzungsgrades für Wärme $\eta_{Wärme,CHP}$ ergeben. Der zugeordnete Nutzungsgrad für Strom $\eta_{Strom,CHP}$ wird ungefähr gleich dem Nutzungsgrad des Referenzsystems, wenn der zugehörige Brennstoffmix denselben Primärenergiefaktor hat wie der Brennstoff des KWK-Systems.

4.2 Stromkompensations-Methode

In der Stromkompensations-Methode wird dem in KWK erzeugten Strom die Endenergiemenge zugeordnet, die in der heute bestmöglichen Vergleichsanlage der getrennten Stromerzeugung als Referenzprozess, einem GuD-Kraftwerk mit einem Nettonutzungsgrad von $\eta_{el,ref} = \eta_{el,GuD} = 58,5\%$, benötigt würde

$$4-12 \quad Q_{f,CHP,Strom,a} = Q_{f,GuD,el,a} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{\eta_{el,GuD}},$$

und der Wärme der Rest des gesamten Endenergieeinsatzes

$$4-13 \quad Q_{f,CHP,Wärme,a} = Q_{f,CHP,a} - Q_{f,CHP,Strom,a} = Q_{f,CHP,a} - \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{\eta_{el,GuD}}.$$

Damit ergibt sich nach Gln. 3-3 und 3-4 für die Allokationsfaktoren

$$4-14 \quad a_{Strom} = \frac{Q_{f,CHP,Strom,a}}{Q_{f,CHP,a}} = \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,GuD}}.$$

$$4-15 \quad a_{Wärme} = \frac{Q_{f,CHP,Wärme,a}}{Q_{f,CHP,a}} = 1 - \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,GuD}}$$

Die zugeordneten Nutzungsgrade in der Stromkompensations-Methode folgen aus den Gln. 3-5 und 3-6

$$\eta_{Strom,CHP} = \frac{\eta_{el,CHP}}{a_{Strom}} = \eta_{el,GuD}$$

4-16

$$\eta_{Wärme,CHP} = \frac{\eta_{th,CHP}}{a_{Wärme}} = \frac{\eta_{th,CHP} \cdot \eta_{el,GuD}}{\eta_{el,GuD} - \eta_{el,CHP}}$$

Damit sind auch die zugeordneten Primärenergie- und CO₂-Faktoren gemäß den Gln. 3-7 und 3-8 festgelegt.

4.3 Exergie-Methode

Die exergetische Methode macht die qualitativ unterschiedlichen Energieformen Strom und Wärme über ihre Arbeitsfähigkeit vergleichbar und verteilt per Definition den Brennstoff $Q_{f,CHP,a}$ auf die beiden Koppelprodukte im Verhältnis ihres Exergiegehalts E , also

$$\frac{Q_{f,CHP,Wärme,a}}{Q_{f,CHP,Strom,a}} = \frac{E_{outg,CHP,a}}{E_{f,prod,CHP,a}}$$

4-17

Das ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass die exergetischen Wirkungsgrade der Strom- und der Heizwärmeerzeugung und der des Gesamtprozesses gleich sind, denn der Exergiefaktor von Brennstoff ist wie der von Strom gleich Eins (vgl. Gln. 4-18). Die Exergiefaktoren werden wie folgt festgelegt

$$e_{Brennstoff} = \frac{E_{f,CHP,a}}{Q_{f,CHP,a}} = 1$$

4-18

$$e_{Strom} = \frac{E_{Strom,CHP,a}}{Q_{f,prod,CHP,a}} = 1$$

$$e_{Wärme} = \frac{E_{Wärme,CHP,a}}{Q_{outg,CHP,a}} = \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{Umgebung}}{T_{Wärme}}$$

Damit ergeben sich für die Allokationsfaktoren a_{Strom} und $a_{Wärme}$ die Bestimmungsgleichungen

$$a_{Strom} = \frac{E_{Strom,CHP,a}}{E_{Strom,CHP,a} + E_{Wärme,CHP,a}} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,prod,CHP,a} + Q_{outg,CHP,a} \eta_{Carnot}}$$

4-19

$$a_{Wärme} = \frac{E_{Wärme,CHP,a}}{E_{Strom,CHP,a} + E_{Wärme,CHP,a}} = \frac{Q_{outg,CHP,a} \eta_{Carnot}}{Q_{f,prod,CHP,a} + Q_{outg,CHP,a} \eta_{Carnot}}$$

Und die zugeordneten Brennstoffmengen für die Wärme gemäß Gl. 3-3 und Strom gemäß Gl. 3-4

$$Q_{f,CHP,Wärme,a} = a_{Wärme} Q_{f,CHP,a} = \frac{Q_{outg,CHP,a} \eta_{Carnot}}{Q_{f,prod,CHP,a} + Q_{outg,CHP,a} \eta_{Carnot}} Q_{f,CHP,a}$$

4-20

$$Q_{f,CHP,Strom,a} = a_{Strom} Q_{f,CHP,a} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,prod,CHP,a} + Q_{outg,CHP,a} \eta_{Carnot}} Q_{f,CHP,a}$$

Durch Umstellen der Gln. 4-20 erhält man daraus

$$\frac{Q_{out,CHP,a}}{Q_{f,CHP,Wärme,a}} = \frac{1}{\eta_{Carnot}} \frac{Q_{f,prod,CHP,a} + Q_{out,CHP,a} \eta_{Carnot}}{Q_{f,CHP,a}}$$

$$\frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,CHP,Strom,a}} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a} + Q_{out,CHP,a} \eta_{Carnot}}{Q_{f,CHP,a}}$$

und so die zugeordneten Nutzungsgrade

$$4-21 \quad \eta_{Wärme,CHP} = \eta_{th,CHP} + \frac{1}{\eta_{Carnot}} \eta_{el,CHP} = \eta_{th,CHP} + \gamma \eta_{el,CHP} \quad \text{mit } \gamma = \frac{1}{\eta_{Carnot}}$$

$$\eta_{Strom,CHP} = \eta_{el,CHP} + \eta_{Carnot} \eta_{th,CHP} = \eta_{el,CHP} + \frac{1}{\gamma} \eta_{th,CHP}$$

Der Bewertungsfaktor γ entspricht hier dem Kehrwert des Carnotfaktors für die Wärme. Er ist von der Wahl der Systemtemperatur abhängig.

Damit sind auch die zugeordneten Primärenergie- und CO₂-Faktoren gemäß den Gln. 3-7 und 3-8 festgelegt.

4.4 Gesamteffizienz-Methode

Die Gesamteffizienz-Methode geht von der Annahme aus, dass die Erzeugung von Strom und Wärme in Kraft-Wärme-Kopplung zu einer Brennstoffeinsparung ΔQ_f gegenüber der getrennten Erzeugung in Anlagen des Referenzenergiesystems führt.

$$4-22 \quad \Delta Q_f = Q_{f,Ref} - Q_{f,CHP}$$

Der Brennstoffeinsatz in der KWK-Anlage $Q_{f,CHP}$ kann also auf die Summe der Brennstoffeinsätze im Referenzsystem $Q_{f,Ref}$ bezogen werden:

$$4-23 \quad Q_{f,CHP} = Q_{f,Ref} \left(1 - \frac{\Delta Q_f}{Q_{f,Ref}} \right) = (Q_{f,Ref,th} + Q_{f,Ref,el}) \left(1 - \frac{\Delta Q_f}{Q_{f,Ref}} \right)$$

Der hier Einspar-Faktor⁷ genannte Quotient ergibt sich anhand der üblichen Definitionen in Gl. 3-1 zu

$$4-24 \quad \frac{\Delta Q_f}{Q_{f,Ref}} = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{th,CHP}}{\eta_{th,Ref}} + \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,Ref}}}$$

Stellt man die oben formulierte zusätzliche Anforderung, dass der Effizienzfortschritt der KWK-Anlage als Ganzer gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme im Referenzsystem in gleichem Maße auch für jedes Koppelprodukt gelten soll, also

$$4-25 \quad \frac{\Delta Q_f}{Q_{f,Ref}} = \frac{\Delta Q_{f,Wärme}}{Q_{f,Ref,th}} = \frac{\Delta Q_{f,Strom}}{Q_{f,Ref,el}}$$

erhält man die beiden folgenden Bestimmungsgleichungen der Brennstoff-Allokation:

4-26

$$Q_{f,CHP,Wärme} = Q_{f,Ref,th} \frac{1}{\frac{\eta_{th,CHP}}{\eta_{th,Ref}} + \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,Ref}}} = Q_{f,CHP} \frac{\eta_{th,CHP}}{\eta_{th,Ref}} \frac{1}{\frac{\eta_{th,CHP}}{\eta_{th,Ref}} + \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,Ref}}}$$

$$Q_{f,CHP,Strom} = Q_{f,Ref,el} \frac{1}{\frac{\eta_{th,CHP}}{\eta_{th,Ref}} + \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,Ref}}} = Q_{f,CHP} \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,Ref}} \frac{1}{\frac{\eta_{th,CHP}}{\eta_{th,Ref}} + \frac{\eta_{el,CHP}}{\eta_{el,Ref}}}$$

Damit sind die jeweils den Koppelprodukten zugeordneten Brennstoffmengen bestimmt und die den Koppelprodukten zugeordneten Nutzungsgrade

4-27

$$\eta_{Wärme,CHP} = \frac{Q_{outg,CHP,a}}{Q_{f,CHP,Wärme,a}} = \eta_{th,CHP} + \gamma \eta_{el,CHP}$$

$$\eta_{Strom,CHP} = \frac{Q_{f,prod,CHP,a}}{Q_{f,CHP,Stroma}} = \eta_{el,CHP} + \frac{1}{\gamma} \eta_{th,CHP}$$

mit $\gamma = \frac{\eta_{th,Ref}}{\eta_{el,Ref}}$

können abgeleitet werden. Die Bestimmungsgleichungen sind mathematisch äquivalent zu denen der Exergie-Methode in Gl. 4-21. Allerdings ist der Bewertungsfaktor γ ganz anders begründet und definiert. Er kann aber die gleichen Zahlenwerte annehmen, wodurch die beiden Methoden identisch werden.

Die zugeordneten Nutzungsgrade sind in der Gesamteffizienzmethode vom gewählten Referenz-System abhängig. Mit dem als Verhältnis der Referenznutzungsgrade einmal gewählten und oben begründeten Bewertungsfaktor γ werden die zugeordneten Nutzungsgrade alleine von den Nutzungsgraden der KWK-Anlage abhängig. Aus den Gln. 4-27 wird deutlich, dass nur das Verhältnis der Referenz-Nutzungsgrade von Bedeutung ist und weniger die Tatsache, ob es alte Anlagen oder neue Anlagen sind. Damit sind auch die zugeordneten Primärenergie- und CO₂-Faktoren gemäß den Gln. 3-7 und 3-8 festgelegt.

5 Vergleich der Methoden

5.1 Randbedingungen der Allokation

Die getrennte Bewertung der Produkte eines gekoppelten Erzeugungsprozesses aus dem Prozess selbst heraus ist mit den hier betrachteten Allokationsmethoden nicht möglich. Der Prozess selbst bleibt eine „black box“, die unterschiedliche Mengen thermischer und elektrischer Energie als Ausgangsprodukte liefert. Eine Allokationsmethode mit einem detaillierten thermodynamischen Modell, das nachvollzieht, wie und zu welchem Anteil eine Einheit der im zugeführten Brennstoff enthaltenen Energie jeweils in welches Koppelprodukt umgewandelt wird, wurde bisher nicht vorgeschlagen³.

Zur Bewertung der Produkte bedarf es deshalb immer zusätzlicher, vom eigentlichen Prozess unabhängiger Annahmen. So beginnt denn die Begründung jeder Allokationsmethode mit einem Postulat über den gewählten Ansatz. Das ist augenscheinlich bei den Allokationsmethoden, die Referenzsysteme der getrennten Erzeugung der Koppelprodukte als Maßstab der Bewertung anlegen, was in der ökonomischen Bewertung übrigens einen üblichen Weg darstellt. Es sind also in jeder Methode Annahmen zu Referenzanlagen oder Randbedingungen außerhalb der eigentlichen Anlage zu treffen, diese sind in Tabelle 5-1 zusammen gestellt.

Tabelle 5-1 Betroffene Annahmen zu den Randbedingungen außerhalb des Bilanzkreises in den betrachteten Allokationsmethoden

Brennstoffe	Primärenergiefaktor $f_{p,Brennstoff}$	CO ₂ -Faktor $f_{CO_2,Brennstoff}$ g/kWh _{Hi}	
Erdgas H	1,1	200	
Steinkohle	1,1	700	
Biogas	0,5	0	
Stromgutschrift-Methode (Verdrängungsmix)	Primärenergiefaktor $f_{p,el,ref}$	CO ₂ -Faktor $f_{CO_2,el,ref}$ g/kWh _{Hi}	Elektrischer Nutzungsgrad $\eta_{el,ref}$
	2,80	750	38%
Stromkompensations-Methode (GuD-Kraftwerk)	Primärenergiefaktor $f_{p,el,ref}$	CO ₂ -Faktor $f_{CO_2,el,ref}$ g/kWh _{Hi}	Elektrischer Nutzungsgrad $\eta_{el,GuD}$
	1,1	200	58,5%
Exergie-Methode (Systemtemperaturen)	KWK-Anlage $t_{Wärme}$ °C	KWK-Einheit ⁸ $t_{Wärme}$ °C	Umgebung t_U °C
	70	156	0
Gesamteffizienz-Methode (Referenzwirkungsgrade)	Thermischer Referenz-Nutzungsgrad	Elektrischer Referenz-Nutzungsgrad	
	80%	34%	

5.2 Vergleich für verschiedene KWK-Systeme

Die zukünftig anzuwendende Allokationsmethode soll auf die ganze Bandbreite der KWK-Technologien anwendbar sein. Zum Vergleich der drei Methoden wurden für typische, Erdgas-befeuerte KWK-Systeme sowie ein Kohle-HKW und ein Biogas-BHKW (vgl.

Tabelle 5-2) jeweils die zugeordneten Nutzungsgrade, Primärenergiefaktoren und CO₂-Faktoren berechnet und über den jeweiligen elektrischen Wirkungsgraden aufgetragen.

Die Exergie-Methode wurde jeweils für zwei Systemtemperaturen angewendet: 70°C als eine Mitteltemperatur aus Vor- und Rücklauf eines angeschlossenen Heizsystems und 156°C als thermodynamisch gewichtetes Mittel der Motorkühlung und des Abgases.

Tabelle 5-2 Kenndaten verschiedener KWK-Technologien, für die die zugeordneten Kenndaten berechnet wurden.

KWK-Technologien	elektrische Leistung kW	elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{el,CHP,Hi}$	thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th,CHP,Hi}$	Strom-kennzahl σ
Erdgas-befeuerte Systeme				
Mikro-Stirlingmotor (mit Brennwertnutzung)	1	0,04	1,03	0,19
Mikro-KWK	5	0,26	0,63	0,41
Mini-KWK	50	0,34	0,56	0,61
Gasmotor (140 kW)	140	0,36	0,55	0,65
Gasmotor (3,4 MW)	3.400	0,44	0,43	1,02
Dieselmotor (1 MW)	1.000	0,45	0,40	1,13
Gasturbine (200 kW)	200	0,19	0,56	0,34
Gasturbine (5,5 MW)	5.500	0,31	0,49	0,63
Dampfturbine (100 MW)	100.000	0,25	0,63	0,40
GuD (100 MW)	100.000	0,50	0,45	1,11
Brennstoffzelle (200 kW)	200	0,38	0,52	0,73
ORC (200 kW)	200	0,15	0,60	0,25
Steinkohle-befeuerte Systeme				
Kohle-HKW Dampfturbine (100 MW)	100.000	0,35	0,45	0,78
Biogas-befeuerte Systeme				
Biogas-BHKW (140 kW)	140	0,36	0,55	0,65

5.3 Ergebnisse des Vergleichs

Die Stromgutschrift-Methode steht wie eingangs beschrieben in der Kritik und soll durch ein zielführendes Verfahren ersetzt werden, das die dargestellten Allokationsprobleme vermeidet. Zum Vergleich sind in den folgenden Abbildungen jeweils die zugeordneten Größen für diese Methode mit angegeben.

5.3.1 Zugeordnete Nutzungsgrade

Die zugeordneten thermischen Nutzungsgrade sind in Abbildung 5-1, die elektrischen Nutzungsgrade in Abbildung 5-2 dargestellt.

Es zeigen sich die Definitionsschwierigkeiten der **Stromgutschrift-Methode**. Für sehr kleine positive Werte des Allokationsfaktors nimmt der Nutzungsgrad extrem große Werte an. Für Werte des Allokationsfaktors $a_{Wärme}$ kleiner Null würde der Nutzungsgrad Wärme negativ. Setzt man den Allokationsfaktor für diese Fälle zu Null, ist der zugeordnete Nutzungsgrad gar nicht definiert. Die elektrischen Nutzungsgrade sind unabhängig vom betrachteten KWK-System gleich dem durchschnittlichen Wert des angenommenen Referenzenergiesystems $\eta_{el,CHP} = \eta_{el,ref} = 39\%$.

Die **Stromkompensationsmethode** vermeidet das Problem der nicht definierten thermischen Nutzungsgrade. Außerordentlich hohe zugeordnete thermische Nutzungsgrade ergeben sich für das GuD-Kraftwerk, erkennbar an dem Ausreißer-Datenpunkt rechts oben in Abbildung 5-1, wenn der elektrische Nutzungsgrad des betrachteten KWK-Systems nahe an dem der Referenzanlage liegt. Die zugeordneten elektrischen Nutzungsgrade sind per Definition alle gleich $\eta_{el,CHP} = \eta_{el,GuD} = 58,5\%$, ganz unabhängig davon welches KWK-System betrachtet wird.

Im Vergleich der beiden anderen Methoden zeigt sich, dass der zugeordnete Nutzungsgrad für Strom (Abbildung 5-2) bei der **Exergie-Methode** mit Systemtemperatur 70°C generell niedriger, der für Wärme generell deutlich höher liegt als bei der **Gesamteffizienz-Methode**. Mit der Systemtemperatur 156°C rückt die exergetische Bewertung an die nach der Gesamteffizienz-Methode nahe heran (bei einer Systemtemperatur von 200°C werden die Linien identisch).

Definitionsgemäß liegen die Zahlenwerte der Nutzungsgrade generell deutlich höher als die, die sich bei der üblichen Definition der thermischen und elektrischen Nutzungsgrade bei KWK ergeben. Das liegt einfach daran, dass im Nenner nun eine kleinere Brennstoff-Endenergiemenge steht.

Abbildung 5-1 Vergleich der zugeordneten Nutzungsgrade für Wärme aus KWK gemäß den vier Allokationsmethoden Stromgutschrift (SG), Stromkompensation (Komp), Exergie (70°C und 156°C) und Gesamteffizienz (GEff) für typische KWK-Systeme unterschiedlicher Größenordnung

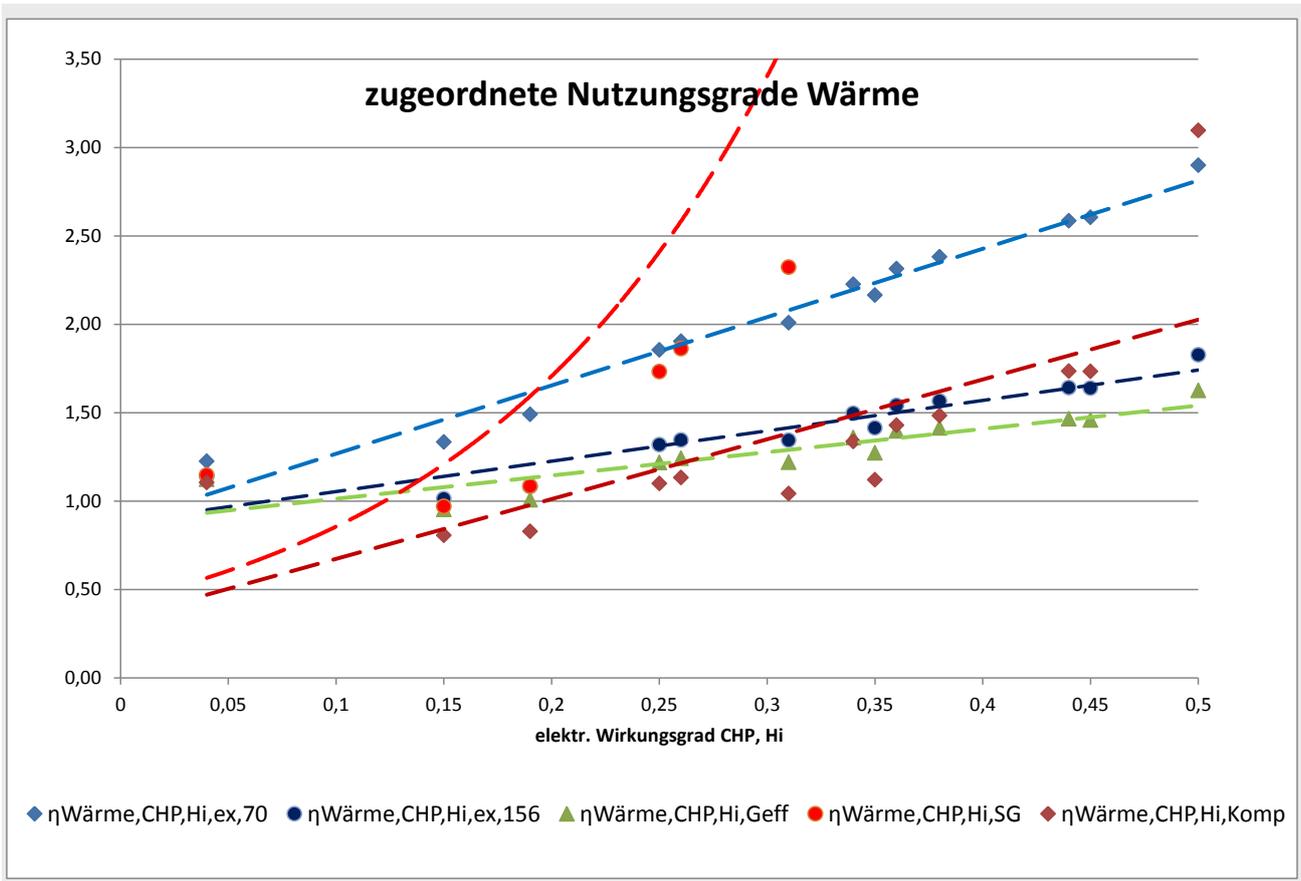
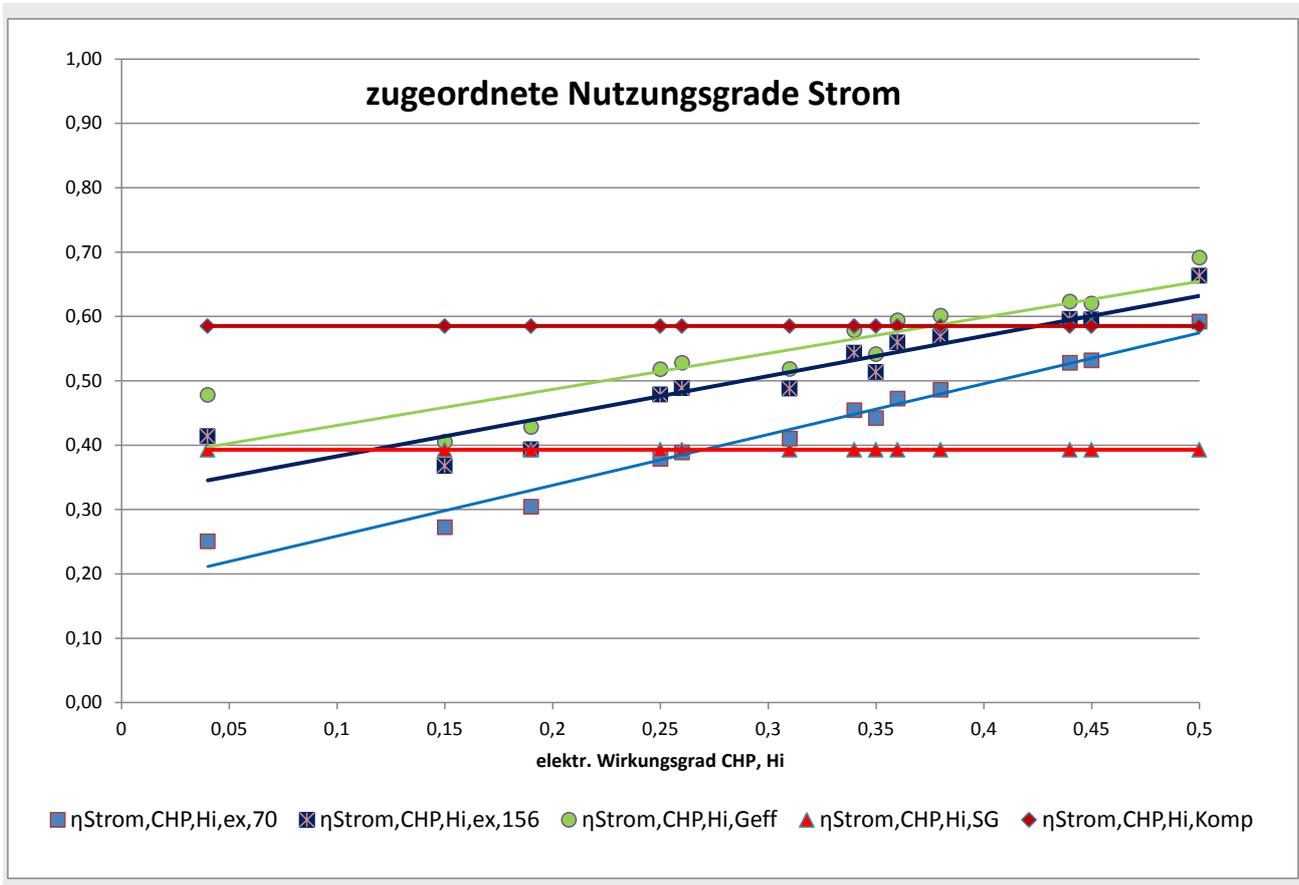


Abbildung 5-2 Vergleich der zugeordneten Nutzungsgrade für Strom aus KWK gemäß den vier Allokationsmethoden Stromgutschrift (SG), Stromkompensation (Komp), Exergie (70°C und 156°C) und Gesamteffizienz (GEff) für typische KWK-Systeme unterschiedlicher Größenordnung

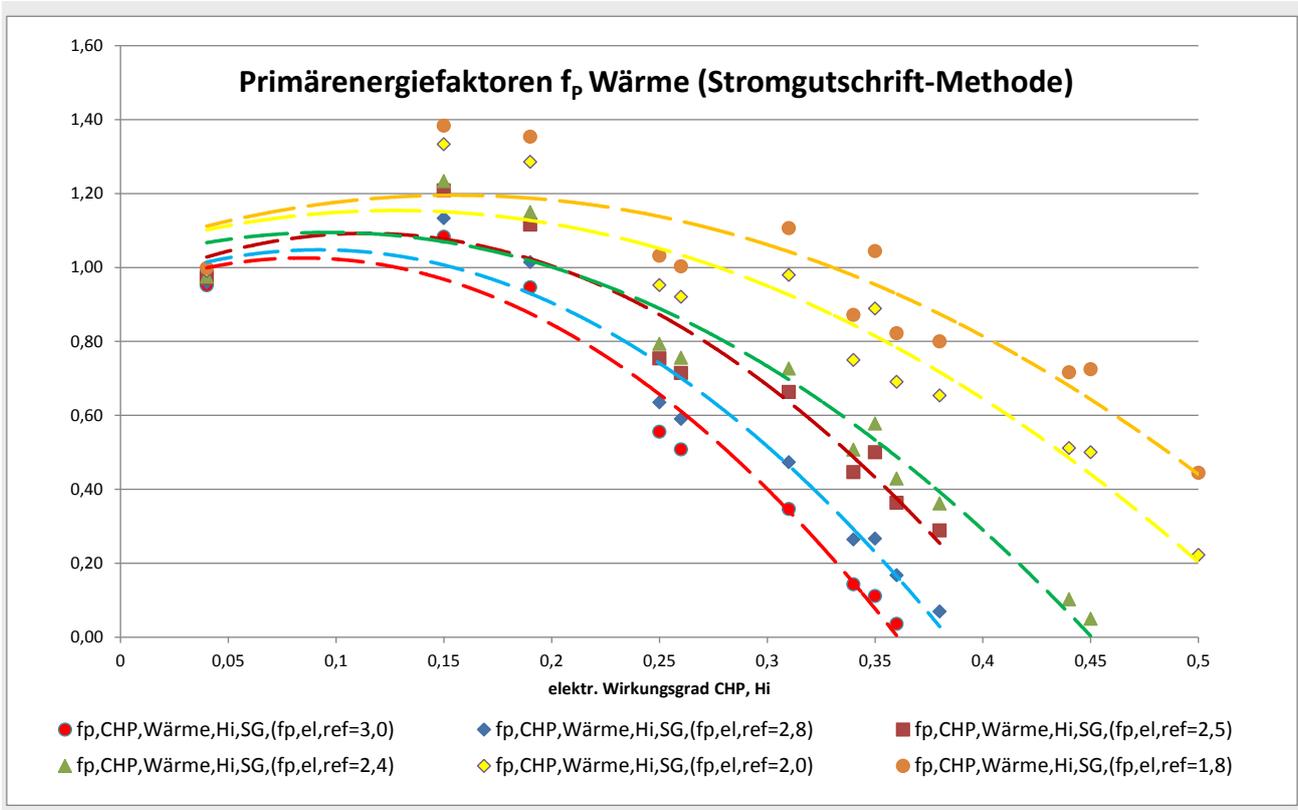


5.3.2 Zugeordnete Primärenergiefaktoren

Für die Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung im deutschen Normen- und Regelwerk sind die zugeordneten Primärenergiefaktoren $f_{p,CHP,Wärme}$ entscheidend. Aus den Gln. 3-7 und 3-8 ergibt sich der Verlauf der zugeordneten Primärenergiefaktoren.

Wie sich die Bewertung der KWK-Wärme entwickeln würden, wenn der Primärenergiefaktor des Referenzsystems für die Gutschrift von heute $f_{p,el,ref} = 3,0$ schrittweise auf 1,8 sinkt, zeigen Abbildung 5-3 und Tabelle 5-5. Je besser der Netzmix im Referenzsystem wird, desto schlechter wird die Wärme aus KWK bewertet. Bei einem Wert von $f_{p,el,ref} = 1,88$ würden die Primärenergiefaktoren der Wärme mit denen der Stromkompensationsmethode identisch. Mit dem Inkrafttreten der EnEV 2014 am 1.5.2014 wird KWK-Strom auch normativ auf jeden Fall schlechter bewertet als der jeweils durchschnittliche Netzmix.

Abbildung 5-3 Primärenergiefaktoren Wärme in der Stromgutschrift-Methode bei verschiedenen Primärenergiefaktoren des Referenzsystems



Dabei entsprechen die gewählten Werte für $f_{p,el,ref}$ ungefähr folgenden Standards

Tabelle 5-3 Eigenschaften des Referenzsystems für die Stromgutschrift in Abbildung 5-3

Primärenergiefaktoren Strom	$f_{p,el,ref}$
Netzmix nach EnEV 2009	3,0
Verdrängungsmix nach EnEV 2014	2,8
Verdrängungsmix nach DIN V 18599:2013-05 Ber. 1	2,5
Netzmix nach EnEV 2014 ab 1.5.2014	2,4
Netzmix nach DIN V 18599:2013-05 Ber. 1	2,0
Netzmix nach EnEV 2014 ab 1.1.2016	1,8

Die Zahlenwerte, die sich in den einzelnen Methoden für die verschiedenen KWK-Systeme ergeben, sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst und in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 dargestellt.

In der **Stromgutschrift-Methode** strebt der Primärenergiefaktor der Wärme sehr schnell gegen null und nimmt bei den gängigen KWK-Systemen generell sehr niedrige Werte an, die sonst nur von Wärmeerzeugern mit regenerativen Energieanteilen erreicht werden. Der Primärenergiefaktor Strom ist per Definition gleich 2,8.

Die **Stromkompensationsmethode** ordnete der Wärme deutlich mehr Brennstoffanteile zu, die Primärenergiefaktoren Wärme liegen damit generell sehr viel höher, erst bei einem elektrischen Nutzungsgrad von $\eta_{el,CHP} = \eta_{el,GuD} = 58,5\%$ wird er null. Der Primärenergiefaktor Strom ist für alle KWK-Systeme gleich 1,88.

In der **Exergie-Methode** mit 70°C Systemtemperatur wird der Wärme ein deutlich niedrigerer, dem Strom ein deutlich höherer Primärenergiefaktor zugeordnet als in der **Gesamteffizienz-Methode**. Bei einer Systemtemperatur von 156°C rückt die exergetische Bewertung auch bei den Primärenergiefaktoren an die nach der Gesamteffizienz-Methode nahe heran, bei einer Systemtemperatur von 200°C werden die Linien identisch. Die Primärenergiefaktoren können nicht null werden.

Bei Systemen mit niedrigen elektrischen Wirkungsgraden würde der erzeugte Strom in der Exergie-Methode (mit 70°C) sogar schlechter bewertet als der Verdrängungsmix. Das wäre dann wohl „Schwarzstrom“. In der mit $\gamma = 2,35$ parametrisierten Gesamteffizienz-Methode steigt der Primärenergiefaktor Strom tendenziell nicht über den Wert von 2,5.

Abbildung 5-4 Vergleich der zugeordneten Primärenergiefaktoren für Wärme gemäß den vier Allokationsmethoden Stromgutschrift (SG), Stromkompensation (Komp), Exergie (70°C und 156°C) und Gesamteffizienz (GEff) für typische KWK-Systeme unterschiedlicher Größenordnung

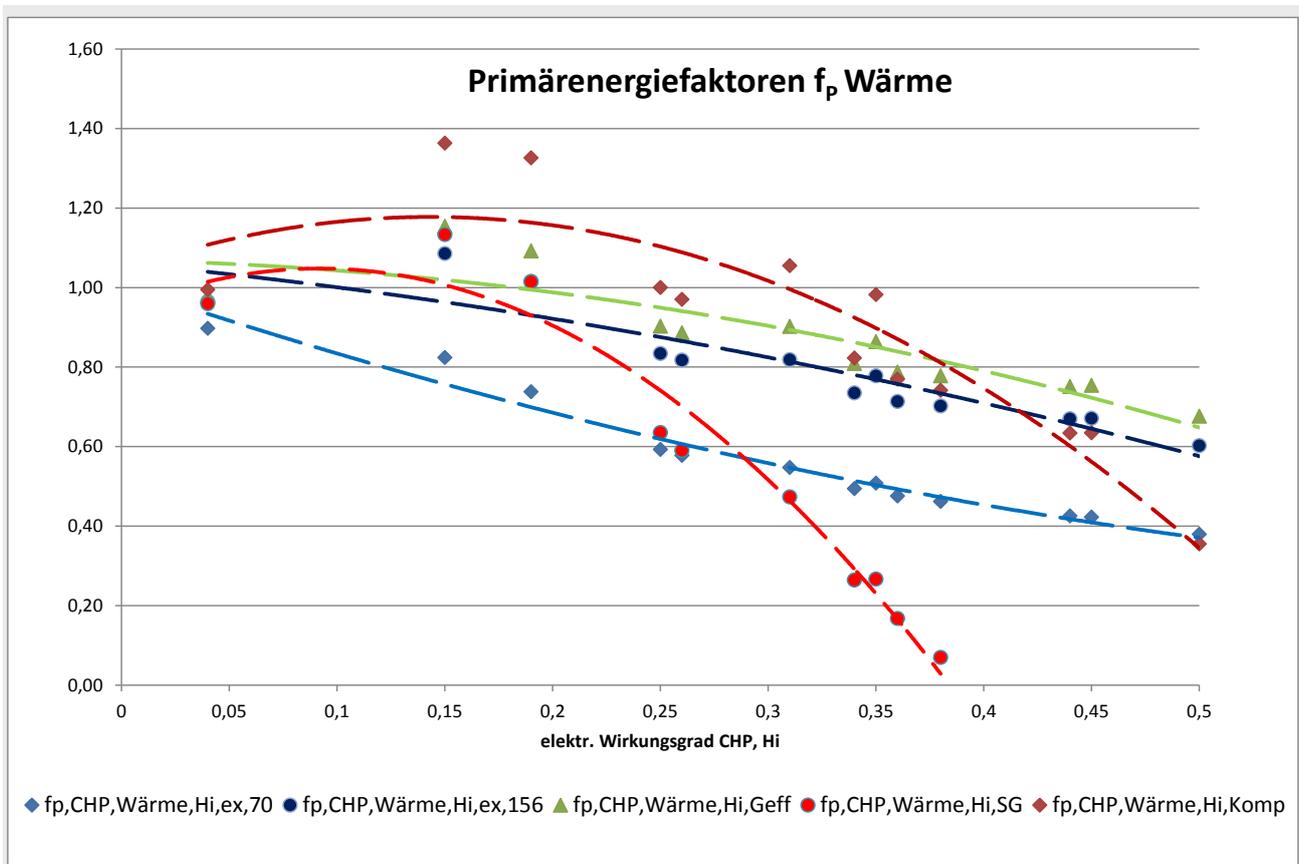


Abbildung 5-5 Vergleich der zugeordneten Primärenergiefaktoren für Strom gemäß den vier Allokationsmethoden Stromgutschrift (SG), Stromkompensation (Komp), Exergie (70°C und

200°C) und Gesamteffizienz (GEff) für typische KWK-Systeme unterschiedlicher Größenordnung

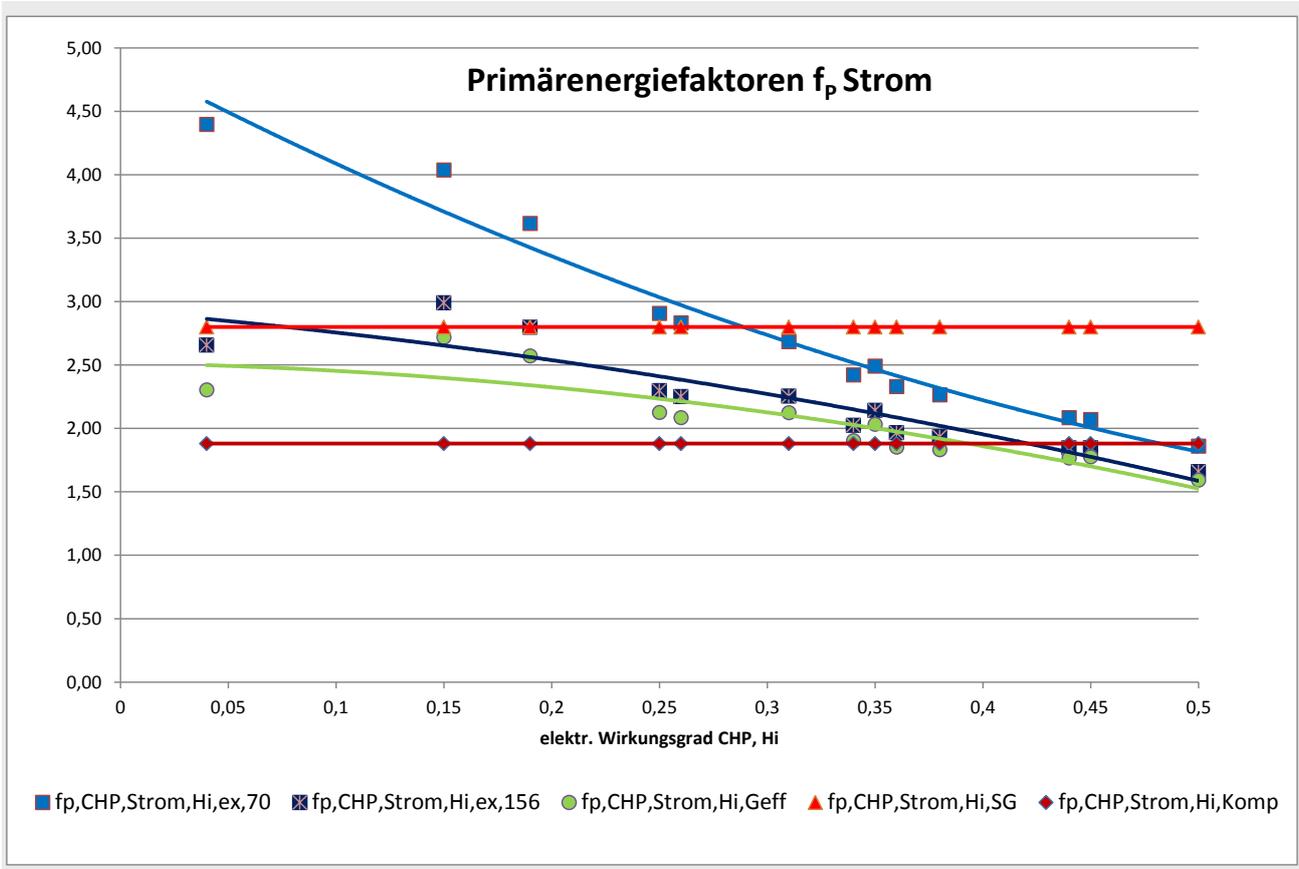


Tabelle 5-4 Überblick über die zugeordneten Primärenergiefaktoren in den verschiedenen Allokationsmethoden

KWK-Technologien		Mikro-Stirling (Brennwert-nutzung)	Mikro-KWK	Mini-KWK	Gasmotor (140 kW)	Gasmotor (3,4 MW)	Dieselmotor (1 MW)	Gasturbine (200 kW)	Gasturbine (5,5 MW)	Dampfturbin e (100 MW)	GuD (100 MW)	Brennstoff-zelle (200 kW)	ORC (200 kW)	Kohle-KW Dampfturbin e (100 MW)	Biogas-BHKW (140 kW)
elektrische Leistung	kW	1	5	50	140	3.400	1.000	200	5.500	100.000	100.000	200	200	100.000	140
elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el,CHP,Hi}$	0,04	0,26	0,34	0,36	0,44	0,45	0,19	0,31	0,25	0,5	0,38	0,15	0,35	0,36
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th,CHP,Hi}$	1,03	0,63	0,56	0,55	0,43	0,4	0,56	0,49	0,63	0,45	0,52	0,6	0,45	0,55
Stromkennzahl	σ_{CHP}	0,04	0,41	0,61	0,65	1,02	1,13	0,34	0,63	0,40	1,11	0,73	0,25	0,78	0,65
zugeordnete Primärenergiefaktoren															
Stromgutschrift-Methode															
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,SG	0,96	0,59	0,26	0,17	0,00	0,00	1,01	0,47	0,63	0,00	0,07	1,13	0,27	0,00
Strom	fp,CHP,Strom,Hi,SG	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Stromkompensationsmethode															
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,Komp	0,99	0,97	0,82	0,77	0,63	0,63	1,33	1,06	1,00	0,36	0,74	1,36	0,98	0,35
Strom	fp,CHP,Strom,Hi,Komp	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	1,88	0,85
Exergie-Methode (TW = 70°C)															
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,ex,70	0,90	0,58	0,49	0,48	0,43	0,42	0,74	0,55	0,59	0,38	0,46	0,82	0,51	0,22
Strom	fp,CHP,Strom,Hi,ex,70	4,40	2,83	2,42	2,33	2,08	2,07	3,62	2,68	2,91	1,86	2,26	4,04	2,49	1,06
Exergie-Methode (TW = 156°C)															
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,ex,156	0,96	0,82	0,74	0,71	0,67	0,67	1,02	0,82	0,83	0,60	0,70	1,09	0,78	0,32
Strom	fp,CHP,Strom,Hi,ex,156	2,66	2,25	2,02	1,97	1,85	1,85	2,80	2,25	2,30	1,66	1,93	2,99	2,14	0,89
Gesamteffizienzmethode															
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,Geff	0,98	0,89	0,81	0,79	0,75	0,75	1,09	0,90	0,90	0,68	0,78	1,15	0,86	0,36
Strom	fp,CHP,Strom,Hi,Geff	2,30	2,08	1,90	1,85	1,77	1,77	2,57	2,12	2,12	1,59	1,83	2,72	2,03	0,84

Tabelle 5-5 Überblick über die zugeordneten Primärenergiefaktoren Wärme in der Stromgutschrift-Methode für verschiedene Werte des Primärenergiefaktors des Referenzsystems (Verdrängungsmix)

KWK-Technologien		Mikro-Stirling (Brennwert-nutzung)	Mikro-KWK	Mini-KWK	Gasmotor (140 kW)	Gasmotor (3,4 MW)	Dieselmotor (1 MW)	Gasturbine (200 kW)	Gasturbine (5,5 MW)	Dampfturbin e (100 MW)	GuD (100 MW)	Brennstoff-zelle (200 kW)	ORC (200 kW)	Kohle-KW Dampfturbin e (100 MW)	Biogas-BHKW (140 kW)
elektrische Leistung	kW	1	5	50	140	3.400	1.000	200	5.500	100.000	100.000	200	200	100.000	140
elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el,CHP,Hi}$	0,04	0,26	0,34	0,36	0,44	0,45	0,19	0,31	0,25	0,5	0,38	0,15	0,35	0,36
thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th,CHP,Hi}$	1,03	0,63	0,56	0,55	0,43	0,4	0,56	0,49	0,63	0,45	0,52	0,6	0,45	0,55
Stromkennzahl	σ_{CHP}	0,04	0,41	0,61	0,65	1,02	1,13	0,34	0,63	0,40	1,11	0,73	0,25	0,78	0,65
zugeordnete Primärenergiefaktoren															
Stromgutschrift-Methode															
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,SG,(fp,el,ref=3,0)	0,95	0,51	0,14	0,04	0,00	0,00	0,95	0,35	0,56	0,00	0,00	1,08	0,11	0,00
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,SG,(fp,el,ref=2,8)	0,96	0,59	0,26	0,17	0,00	0,00	1,01	0,47	0,63	0,00	0,07	1,13	0,27	0,00
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,SG,(fp,el,ref=2,5)	0,97	0,71	0,45	0,36	0,00	0,00	1,12	0,66	0,75	0,00	0,29	1,21	0,50	0,00
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,SG,(fp,el,ref=2,4)	0,97	0,76	0,51	0,43	0,10	0,05	1,15	0,73	0,79	0,00	0,36	1,23	0,58	0,00
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,SG,(fp,el,ref=2,0)	0,99	0,92	0,75	0,69	0,51	0,50	1,29	0,98	0,95	0,22	0,65	1,33	0,89	0,00
Wärme	fp,CHP,Wärme,Hi,SG,(fp,el,ref=1,8)	1,00	1,00	0,87	0,82	0,72	0,73	1,35	1,11	1,03	0,44	0,80	1,38	1,04	0,00

5.3.3 Zugeordnete CO₂-Faktoren

Ganz analog zu den Primärenergiefaktoren ergeben sich die CO₂-Faktoren, dargestellt in Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7, allerdings aus Darstellungsgründen nur für die Erdgas-Systeme.

Abbildung 5-6 Vergleich der zugeordneten CO₂-Faktoren für Wärme gemäß den vier Allokationsmethoden Stromgutschrift (SG), Stromkompensation (Komp), Exergie (70°C und 156°C) und Gesamteffizienz (Geff) für typische Erdgas-befeuerte KWK-Systeme unterschiedlicher Größenordnung

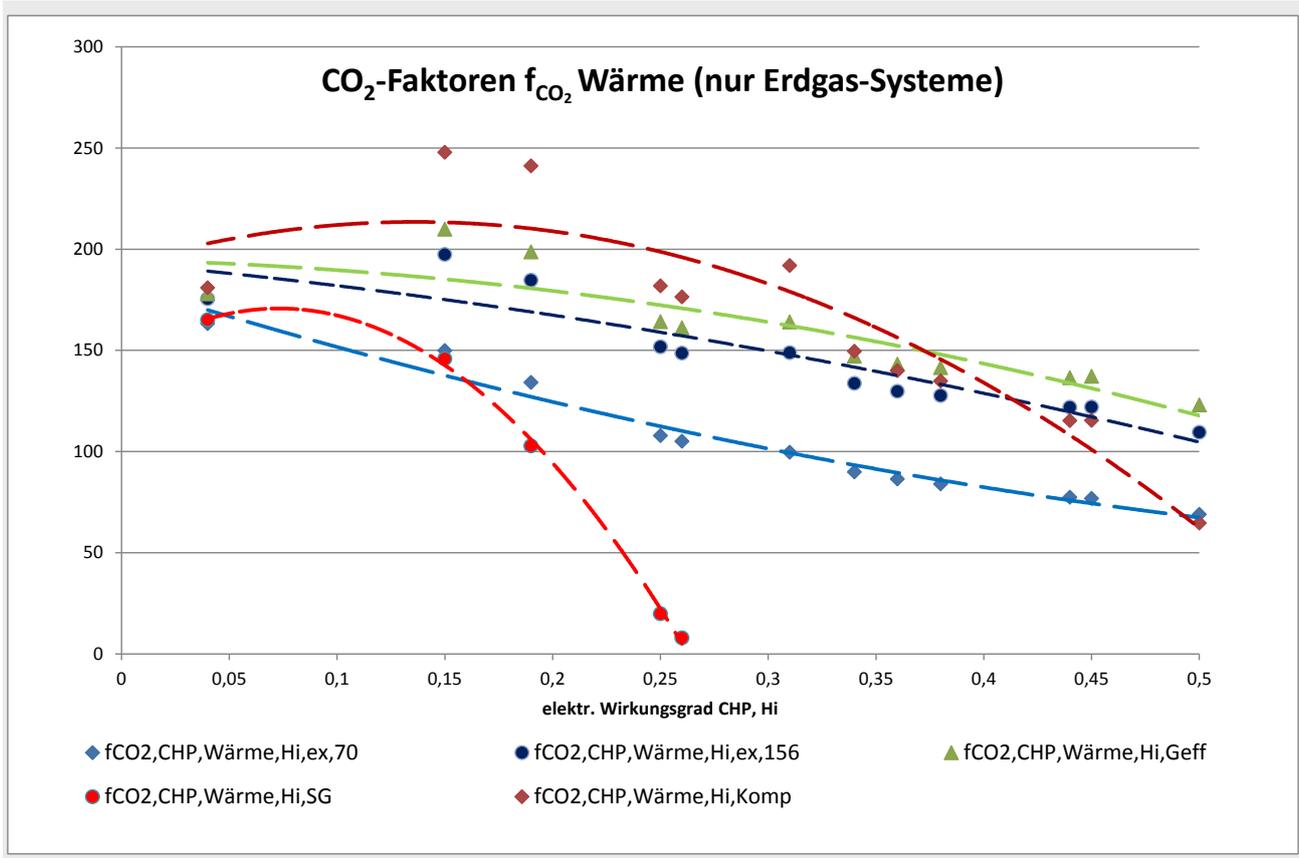
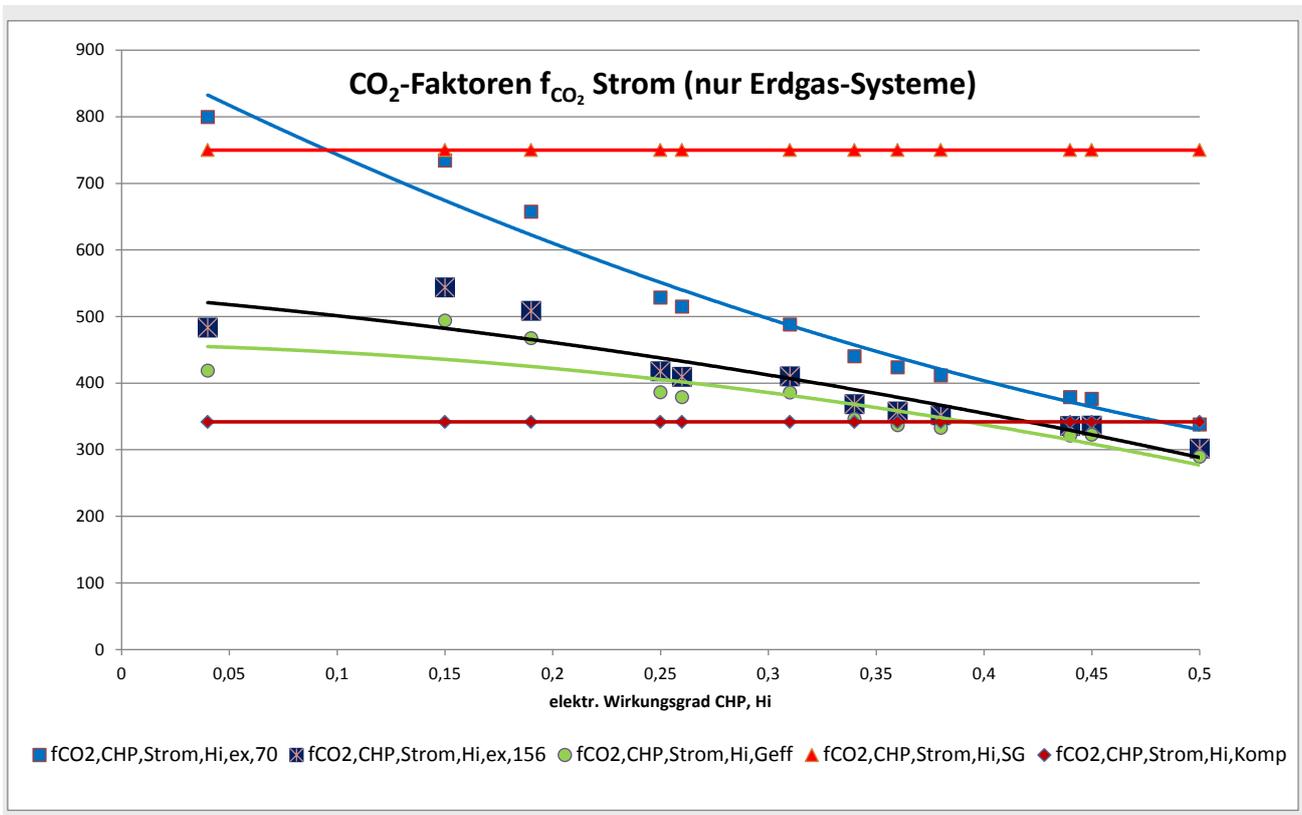


Abbildung 5-7 Vergleich der zugeordneten CO₂-Faktoren für Strom gemäß den vier Allokationsmethoden Stromgutschrift (SG), Stromkompensation (Komp), Exergie (70°C und 156°C) und Gesamteffizienz (GEff) für typische Erdgas-befeuerte KWK-Systeme unterschiedlicher Größenordnung



5.4 Vor- und Nachteile der Methoden

Die **Stromkompensations-Methode** bewertet den Strom für alle KWK-Technologien gleich. Die unterschiedlichen KWK-Systeme erzeugen zwar je nach elektrischem Wirkungsgrad unterschiedliche Mengen an Strom, als hochwertigste, weil beliebig wandelbare Energieform wird ihm aber immer die minimal mögliche Brennstoffmenge zugewiesen.

Der zugeordnete Nutzungsgrad Wärme steigt stärker mit den elektrischen Nutzungsgraden der KWK-Anlage als bei der Gesamteffizienzmethode, aber weniger stark als bei der Exergie-Methode mit 70°C. Probleme können in den Grenzbereichen extrem guter elektrischer Wirkungsgrade des betrachteten KWK-Prozesses auftreten, da in Gl. 4-16 der zugeordnete Nutzungsgrad der Wärme im Punkt $\eta_{el,GuD} = \eta_{el,CHP}$ nicht mehr definiert wäre und bei $\eta_{el,GuD} < \eta_{el,CHP}$ negativ würde. Die zugeordneten Primärenergiefaktoren Wärme sind plausibel.

Die **Exergie-Methode** und die **Gesamteffizienz-Methode** sind mathematisch äquivalent: Sie führen zu denselben Bestimmungsgleichungen Gl. 4-21 bzw. Gl. 4-27 für die zugeordneten Nutzungsgrade. Unterschiede ergeben sich in der Begründung und Festlegung des Bewertungsfaktors γ .

$$\begin{aligned}
 \eta_{Wärme,CHP} &= \eta_{th,CHP} + \gamma \eta_{el,CHP} \\
 \eta_{Strom,CHP} &= \eta_{el,CHP} + \frac{1}{\gamma} \eta_{th,CHP}
 \end{aligned}
 \quad \text{mit } \gamma = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{Carnot}} & \text{Exergie – Methode} \\ \frac{\eta_{th,Ref}}{\eta_{el,Ref}} & \text{Gesamteffizienz – Methode} \end{cases}$$

5-1

Eine exergetische Bewertung könnte die unterschiedlichen Eigenschaften und Verlustmechanismen der thermodynamischen Prozesse der Strom- und Wärmeerzeugung zur Brennstoff-Allokation abbilden, sie wäre damit unabhängig von Parametern außerhalb der Anlage selbst. Dies würde aber vermutlich zu einem komplexen und wenig praktikablen Verfahren im Rahmen einer Energiebilanz führen. Die **Exergie-Methode** der Brennstoff-Allokation beschränkt sich deshalb ebenfalls auf die Bewertung der Koppelprodukte und betrachtet den KWK-Prozess als „black box“ wie die anderen Verfahren auch. Es bleibt als Schwierigkeit, die für jede Technologie richtigen Systemtemperaturen zur Bewertung der Wärme festzulegen. Denn diese Wahl wirkt unmittelbar auf das Verhältnis der Brennstoffaufteilung zwischen Strom und Wärme. Oft wird die mittlere Temperatur aus Vor- und Rücklauf des gelieferten Heizwassers als Systemtemperatur angenommen. Diese Annahme stellt eine sehr grobe Näherung dar. Außerdem ergibt sich dadurch ebenfalls eine Abhängigkeit von der Umgebung dergestalt, dass die Art des nachgeschalteten Heizsystems oder des die Wärme nutzenden Prozesses Einfluss auf den Bewertungsfaktor γ nimmt. Die gleiche KWK-Anlage würde also unterschiedlich bewertet, je nachdem ob die Abgaswärme in einem nachgeschalteten Produktionsprozess direkt oder, über einen Wärmetauscher auf niedrigere Temperaturen transformiert, in einer normalen Heizungsanlage verwendet wird.

Mit einer mittleren Temperatur des Produkts Wärme von z.B. 70°C und einer Umgebungstemperatur im Heizfall von 0 °C ergibt sich ein Carnot-Faktor von $\eta_c = 0,204$ und ein Bewertungsfaktor $\gamma = 4,9$. Dies führt zu einer recht geringen Allokation von Brennstoff zur Wärme. Thermodynamisch sind im KWK-Prozess selbst jedoch in der Regel höhere Systemtemperaturen anzunehmen. Betrachtet man das Abgas eines BHKW-Moduls von ca. 500°C, dann ergibt sich eine anzulegende Mitteltemperatur im Abgaswärmetauscher von ca. 270°C mit $\eta_c = 0,5$ und einem Bewertungsfaktor $\gamma = 2$. Wählt man z.B. 200°C als gewichtetes Mittel der Systemtemperatur für ein Motor-BHKW, den verschiedenen Temperaturen in Abgas, Ölkühler und Motorblock Rechnung tragend, werden $\eta_c = 0,423$ und $\gamma = 2,4$. Der Wärme wird bedeutend mehr Brennstoff zugeordnet.

$$\gamma_{Carnot} = \begin{cases} 4,9 & \text{für } T_{Wärme} = 343^\circ K (70^\circ C) \\ 2,4 & \text{für } T_{Wärme} = 473^\circ K (200^\circ C) \end{cases}$$

5-2

Die **Gesamteffizienz-Methode** differenziert zwischen verschiedenen KWK-Technologien nur nach den thermischen und elektrischen Wirkungsgraden, nicht nach der Systemtemperatur. Sie nimmt explizit Bezug auf ein externes Referenzsystem, das allerdings so gewählt werden kann, dass es auf lange Zeit fest ist. Eine neu zu errichtende KWK-Anlage, die wärmegeführt betrieben wird, verdrängt vorwiegend alte Kesselanlagen in der Wärmeerzeugung und alte Kohlekraftwerke in der Stromerzeugung. Es liegt also nahe, diese als Referenz-Anlagen anzusetzen. Das IWU hat deshalb als Referenz-System alte Anlagen mit Effizienzstandards aus der Zeit um 1990 (siehe Gl. 5-3) vorgeschlagen, dem Jahr, in dem ernsthafte, weltweite Klimaschutzbemühungen auf UN-Ebene begannen und das als Referenzjahr für alle Klimaschutz-Initiativen gesetzt ist. Selbst wenn in absehbarer Zeit alle diese Altanlagen erneuert sein sollten, würde dieser Ansatz sinnvoll sein, da er ja nur zur Brennstoffallokation dient.

Mit typischen Nutzungsgraden alter Anlagen ergibt sich folgender Wert für den Bewertungsfaktor γ in der Gesamteffizienzmethode

$$5-3 \quad \gamma_{\text{Gesamteffizienz}} = \frac{\eta_{th,Ref}}{\eta_{el,Ref}} = 2,3 \quad \text{für } \eta_{th,Ref} = 0,8, \eta_{el,Ref} = 0,35$$

Die Allokation nach der Gesamteffizienz-Methode ist dann nahezu identisch zu der mit der Exergie-Methode bei einer Systemtemperatur von 200°C.

Setzt man den Bewertungsfaktor $\gamma = 2,35$, würde die Wärme mit einem zugeordneten Nutzungsgrad von $\eta_{Wärme,CHP} = 1,4$ etwa wie die einer Gasmotor-Wärmepumpe bewertet, während gleichzeitig die Stromerzeugung mit $\eta_{Strom,CHP} = 0,59$ der einer GuD-Anlage entspräche. Der zugeordnete Primärenergiefaktor Wärme nähme den Wert $f_{p,Wärme,CHP} = 0,79$, der zugeordnete CO₂-Faktor den Wert $f_{CO_2,Wärme,CHP} = 143$ g/kWh an, Strom aus dieser KWK-Anlage hätte einen Primärenergiefaktor von $f_{p,Strom,CHP} = 1,85$ und einen CO₂-Faktor von $f_{CO_2,Strom,CHP} = 337$ g/kWh. Der erhebliche Effizienzvorteil der Kraft-Wärme-Kopplung - selbst mit fossilen Brennstoffen - gegenüber der getrennten Erzeugung in vielen anderen Anlagen des heute bestehenden Energiesystems würde sehr deutlich.

Im Vergleich dazu würde die Wärme aus einer elektromotorisch angetriebenen Wärmepumpe mit einem mittleren Jahresnutzungsgrad von $\eta_{WP} = 3$ einen zugeordneten Primärenergiefaktor $f_{p,Wärme,WP} = 0,83$ und einen CO₂-Faktor von $f_{CO_2,Wärme,WP} = 250$ g/kWh annehmen. Dabei ist angenommen, dass der Strom für die Wärmepumpe dem Verdrängungsmix⁹ entspricht mit einem Primärenergiefaktor von $f_{p,Verdrängungsmix} = 2,5$ und einem CO₂-Faktor von $f_{CO_2,Verdrängungsmix} = 750$ g/kWh. Es würde also noch einer erheblichen Entwicklung des grundlastfähigen Anteils regenerativer Stromerzeugung bedürfen, bis Wärme aus Wärmepumpen hinsichtlich des CO₂-Faktors mit der Wärme aus KWK-Anlagen konkurrenzfähig wäre. Von der Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Bedarf her betrachtet, wäre natürlich auch KWK-Strom mit den oben dargestellten Faktoren für Strom bestens zum Betrieb von Wärmepumpen geeignet.

6 Energiebezug am Gebäude

6.1 Wärme

In der Regel wird eine KWK-Anlage im oder nahe bei einem Gebäude – im Weiteren als „kleine KWK“ bezeichnet - durch einen zweiten Wärmeerzeuger (HP) ergänzt. Und auch bei Fernwärme – im Weiteren als „große KWK“ bezeichnet - ist es nicht ungewöhnlich, dass nur ein Teil der Wärme aus KWK-Anlagen stammt. Bei zwei oder mehr Wärmeerzeugern, die in ein Wärmenetz oder eine Hausverteilung einspeisen, können zudem auch unterschiedliche Brennstoffe zum Einsatz kommen. Dann ergibt sich der Primärenergiefaktor der Wärme für das gesamte Gebäude

$$\begin{aligned}
 6-1 \quad f_{p,GebäudeWärme} &= \varepsilon_{Wärme,CHP} \frac{f_{p,Brennstoff1}}{\eta_{Wärme,CHP}} + (1 - \varepsilon_{Wärme,CHP}) \frac{f_{p,Brennstoff2}}{\eta_{Wärme,HP}} \\
 &= \varepsilon_{Wärme,CHP} f_{p,CHP,Wärme} + (1 - \varepsilon_{Wärme,CHP}) f_{p,HP,Wärme}
 \end{aligned}$$

mit dem thermischen Deckungsgrad der KWK-Anlage

$$6-2 \quad \varepsilon_{Wärme,CHP} = \frac{Q_{outg,CHP,a}}{Q_{outg,CHP,a} + Q_{outg,HP,a}}$$

Bei einer wärmegeführten Betriebsweise der KWK-Anlage ist eine Definition des thermischen Deckungsgrades über die Jahresbilanz ausreichend.

6.2 Strom

Die Definition eines Eigendeckungsgrades Strom ist allerdings bei wärmegeführter Betriebsweise von „kleiner KWK“ nicht so einfach, da mangels Speichermöglichkeiten für den Strom Gleichzeitigkeiten von Bedarf und Erzeugung in sehr kurzen Zeitschritten – bis zu Minuten oder gar Sekunden – betrachtet werden müssen. Jahreswerte reichen keinesfalls aus. Andererseits sind Minuten- oder Sekundenwerte für die Erstellung einer Energiebilanz selbst bei Bestandsgebäuden nur selten verfügbar, bei Neubauten müssten sie ohnehin rechnerisch simuliert werden.

Da in der DIN V 18599 generell mit Monatsbilanzen gerechnet wird, liegt es nahe, den Eigendeckungsgrad Strom auf dieser Basis anzunähern. Wir definieren den „vereinfachten“ Eigendeckungsgrad in Anlehnung an [I. Sartori, et al.]¹⁰ zu

$$6-3 \quad \varepsilon_{Strom,CHP} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} f_{glz}^m \min \left(1, \frac{Q_{f,prod,CHP}^m}{Q_{el,f}^m} \right)$$

Dabei ist klar, dass die Gegenüberstellung von Monatswerten des Bedarfs und der Erzeugung zur Definition eines Eigendeckungsgrades Strom aus der KWK-Anlage eigentlich nicht ausreicht. Deshalb wurden Gleichzeitigkeitsfaktoren f_{glz}^m auf Monatsbasis eingefügt, die für verschiedene Systemauslegungen und Lastfälle empirisch zu ermitteln wären. Mangels solcher Untersuchungen und für die Zwecke hier seien diese Faktoren bis auf weiteres $f_{glz}^m = 1$ gesetzt. Damit kann der Primärenergiefaktor Strom für das ganze Gebäude in Analogie zur Wärme wie folgt definiert werden

$$6-4 \quad f_{p,GebäudeStrom} = \varepsilon_{Strom,CHP} f_{p,CHP,Strom} + (1 - \varepsilon_{Strom,CHP}) f_{p,Bezug,Strommix}$$

Es wird dabei angenommen, dass der restliche Strombedarf, der nicht durch die KWK-Anlage gedeckt werden kann, aus dem allgemeinen Versorgungsnetz in der Qualität „Strommix“ bezogen wird. Außerdem wird es einen Anteil Strom geben, der ins Netz eingespeist wird, auch dieser sollte ausgewiesen werden.

6.3 Bilanzraum

Bei Energiebilanzen nach EnEV bzw. DIN V 18599 muss jedoch berücksichtigt werden, dass nur ein Teil des Strombedarfs bilanziert wird; bei Wohngebäuden nur Hilfsstrom für die Wärmeverteilung oder eine Wohnungslüftungsanlage, wenn angenommen wird, dass bei Betrieb einer KWK-Anlage oder Fernwärmenutzung keine elektrische Energie zur Erzeugung von Heizwärme oder Trinkwarmwasser z.B. mittels einer Wärmepumpe eingesetzt wird. Bei Nichtwohngebäuden wird außer Hilfsstrom auch der Strombedarf für Beleuchtung, Luftförderung, Kälte- und Dampferzeugung bilanziert.

Eine Möglichkeit wäre, den Bilanzkreis vor allem bei den Wohngebäuden auf Strom für Beleuchtung und Haushaltsgeräte zu erweitern. Im derzeit vorherrschenden Verständnis der Plusenergiehäuser¹¹ wird für Wohngebäude bereits der gesamte Stromverbrauch in eine Jahresbilanz einbezogen. Auch bei den Nichtwohngebäuden wäre es wünschenswert, den Bilanzkreis so zu erweitern, dass ein plausibler Bedarfs-Verbrauchs-Abgleich vorgenommen werden könnte. Dazu müsste auch der nutzerspezifische Strombedarf berücksichtigt werden.

Alternativ und/oder ergänzend ist auch eine mit den nationalen Energiebilanzen konsistente Behandlung des am Gebäude eingespeisten Stroms in Betracht zu ziehen. In der Stromgutschrift-Methode nach derzeit noch gültiger EnEV 2009 erhält der KWK-Strom automatisch den Primärenergiefaktor und den CO₂-Faktor, der dem Strommix – in Zukunft dem Verdrängungsmix – entspricht. Das ist bei allen anderen Allokationsmethoden anders. Deshalb muss auch der am Gebäude eingespeiste Strom berücksichtigt und ausgewiesen werden. Dies gilt insbesondere für die „große KWK“, die in der Regel nicht in räumlichem Bezug zu einem konkreten Gebäude Strom und Wärme produziert. Durch die Brennstoff-Allokation wird auch dem Koppelprodukt Strom eine klar definierte Brennstoffmenge zugewiesen. Auf dieser Basis können dem eingespeisten Strom ein Primärenergiefaktor und ein CO₂-Faktor zugeordnet werden. Dieser zugeordnete Brennstoffeinsatz findet dann über eine lange Meldekette (BAFA -> Statistisches Bundesamt -> AGEb) Eingang in die nationale Energiestatistik – und über GEMIS und die DIN V 18599 in die EnEV.

6.4 Wärmeverteilnetze und Koppelbetrieb

Der Einfluss der Netze darf insbesondere auf der Wärmeseite nicht vernachlässigt werden. Die gesamten Vorteile der KWK können durch Netzverluste verloren gehen. Dies lässt sich über die Angabe der Nutzungsgrade der Verteilnetze wie in DIN V 18599-9:2011-12 in den Algorithmus der Bewertung integrieren. Wie in Bild 3-1 dargestellt, muss dazu ein Netznutzungsgrad η_{HN} zwischen der Erzeugernutzwärmeabgabe der Heizzentrale $Q_{outg,a}^*$ (eventuell bestehend aus KWK-Anlage und Spitzenkessel) und Erzeugernutzwärmeabgabe an das Gebäude $Q_{outg,a}$ eingefügt werden:

$$6-5 \quad Q_{outg,a} = Q_{outg,a}^* \cdot \eta_{HN}$$

Ist der Anteil der ausgekoppelten Wärme variabel, muss $Q_{outg,a}^*$ mit einem Faktor für den Anteil der Jahresvollbetriebszeit im gekoppelten Betrieb korrigiert werden.

-
- ¹ [EnEV 2014] Energiesparverordnung Nichtamtliche Lesefassung der von der Bundesregierung am 16. Oktober 2013 beschlossenen Fassung der Änderungsverordnung, Anlage 1, Kap. 2.1.1, Satz 7: „Wird als Wärmeerzeuger eine zum Gebäude gehörige Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung genutzt, so ist für deren Berechnung DIN V 18599-9: 2011-12 Abschnitt 5.1.7 Verfahren B zu verwenden.“ Und in Satz 2 heißt es: „Als Primärenergiefaktor sind die Werte für den nicht erneuerbaren Anteil nach DIN V 18599-1:2011-12 zu verwenden.“ und weiter: „ Für elektrischen Strom ist abweichend von Satz 2 ab dem 1. Januar 2016 der Wert 1,8 zu verwenden; für den durch Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten und nach Abzug des Eigenbedarfs in das Verbundnetz eingespeisten Strom gilt unbeschadet von Halbsatz 1 der dafür in DIN V 18599-1: 2011-12 angegebene Wert von 2,8.“
- ² [AGEB 2012] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland, Stand: August 2010, Kap. 3: „Die Aufteilung des Brennstoffeinsatzes auf die Produkte Strom und Wärme bei Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie beruht auf der Richtlinie 2004/8/EGDazu werden die Referenzwirkungsgrade der getrennten Erzeugung von Strom (40%) und Wärme (80%) in Anlehnung an die Richtlinie vorgegeben.“. Kap. 4.2: „in Wärmekraftwerken ... wird nur der Brennstoffeinsatz verbucht, der der Stromerzeugung dient.“, Kap. 4.3: „Im Umwandlungseinsatz der Heizkraftwerke und Fernheizwerke wird nur der Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung verbucht.“
- ³ [VDI 1495] Kail, Christoph, Haberberger, Georg, Technik und Kosten der Kraft-Wärme-Kopplung bei GUD- und Dampfkraftwerken, VDI-Berichte Nr. 1495, 1999, S. 95-111
- ⁴ [Lük 2011] Lüking, Rolf-Michael, Die Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplung – Ein Vorschlag zu einem neuen Bewertungsansatz, Bauphysik 33 (2011), Heft 6, S. 329-337
- ⁵ [IWU 2002] Diefenbach, N., Bewertung der Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen und Biomasse-Heizsystemen, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt 2002
- ⁶ [DIN 18599-9] siehe DIN V 18599-9:2011-12, Kap. 5.1.7 Ergebnisdarstellung Verfahren (b), Formel (20)
- ⁷ Dieser Einsparfaktor wird in der EU-Richtlinie 2004/8/EG als Primärenergieeinsparung PEE bezeichnet.
- ⁸ KWK-Einheit bedeutet hier, dass Motor- und Abgaswärmetauscher getrennt anhand ihrer jeweiligen thermodynamischen Mitteltemperaturen bewertet werden und gewichtet mit den jeweiligen Wärmemengen in die Mitteltemperatur der Wärme eingehen.
- ⁹ Diese Annahme erscheint generell für Heizwärmeanwendungen von elektrischer Energie gerechtfertigt, nicht nur für Gutschriften von erzeugter elektrischer Energie aus wärmegeführten KWK-Anlage.
- ¹⁰ I. Sartori, A. Napolitano, K. Voss, Net Zero Energy Buildings: A consistent definition framework, Energy Buildings (2012), doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.032
- ¹¹ [BMVBS 2012] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Richtlinie über die Vergabe von Zuwendungen für Modellprojekte im Effizienzhaus Plus-Standard im Jahre 2012