

# Ganzheitliche Bewertung von Energiesystemen am Beispiel der Kraft-Wärme-Kopplung

Dipl.-Ing. Michael Beer  
Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München

## 1 Motivation und zentrale Fragestellung

Immer häufiger taucht die Forderung nach Bewertungsmöglichkeiten für neue Technologien, insbesondere innovative dezentrale KWK-Anlagen, auf. Diese sollen jedoch nicht nur isoliert betrachtet oder fallweise untereinander bzw. mit konventionellen Techniken verglichen werden. Für eine umfassende und primärenergetisch richtige Bewertung muss das gesamte Energiesystem betrachtet werden, da durch die isolierte Betrachtung einzelner Objekte/Anlagen zwangsläufig Einschränkungen entstehen. So werden z.B. Rück-/Wechselwirkungen vernachlässigt oder Rahmenbedingungen nicht beachtet.

Nur eine ganzheitliche Energiesystembetrachtung unter Einbeziehung des bereits existierenden Anlagenbestandes erlaubt Aussagen zu weit reichenden energiepolitischen Fragestellungen und kann Grundlage für daraus resultierende Entscheidungen sein.

Für derartige Analysen potenzieller zukünftiger Entwicklungen bietet es sich an, aus gut fundierten Basisdaten Szenarien abzuleiten. Die Grundlagen müssen besonders bei den zu betrachtenden Technologien sehr präzise sein, um Fehler bei langen Betrachtungszeiträumen klein zu halten.

Als weiterer Schritt bietet die ganzheitliche Betrachtung unter Einbeziehung von Herstellungsaufwendungen für Anlagen die Möglichkeit, ähnlich dem Unterschied betriebs- und volkswirtschaftlicher Berechnungen, auch die Auswirkungen auf das gesamte Energiesystem zu erkennen.

Hier soll daher eine Methodik dargestellt werden, wie auf Basis vorhandener, öffentlich zugänglicher Energiebilanzen ein Referenzsystem zur ganzheitlichen Bewertung von Energiesystemen – speziell zur Verwendung in KWK-Szenarien - aufgebaut werden kann. Dieses soll nicht nur detaillierte und nachvollziehbar interpretierbare Informationen zu Zusammenhängen im Energiesystem Deutschland enthalten, sondern auch die Herstellungsaufwendungen für die Energiewandlungsanlagen abbilden.

Die Ausführungen untergliedern sich in drei Teile:

- Die Kraft-Wärme-Kopplung in Energiesystemen:  
Es soll aufgezeigt werden, wie die KWK derzeit in Energiebilanzen dargestellt wird. In einem nächsten Schritt wird eine Möglichkeit vorgestellt, die Einbindung der KWK-Informationen transparenter zu gestalten.
- Die Einbindung von Herstellungsaufwendungen in energiebilanzbasierte Szenarien:  
Nach der Definition des kumulierten Energieaufwandes (KEA) werden typische Herstellungsaufwendungen von Stromerzeugungsanlagen vorgestellt. Anschließend wird gezeigt, wie die Daten in Szenarien auf Basis von Energiebilanzen eingebunden werden können.
- Eine Darstellung von Basisdaten zum Energiesystem Deutschland 2003:  
Für das Jahr 2003 wurde die Methodik auf die verfügbaren Daten in Deutschland angewendet und die Ergebnisse grafisch dargestellt.

## 2 Methodische Vorgangsweise

### 2.1 Einbindung der KWK in energiebilanzbasierte Szenarien

#### 2.1.1 Die amtlichen Energiebilanzen

Das Energiesystem Deutschland ist in amtlichen Energiebilanzen aufbereitet dargestellt. Diese werden von der AG Energiebilanzen e.V. bestehend aus Verbänden der Energiewirtschaft und Forschungseinrichtungen veröffentlicht. Sie „(...) wertet die vorhandenen Statistiken aus allen Gebieten der Energiewirtschaft nach wissenschaftlichen Gesichtspunkten aus, erstellt Energiebilanzen und macht diese der Öffentlichkeit zugänglich“ /AGEB 07/.

Energiebilanzen bilden in sich geschlossen den Energiefluss von der Primärenergie bis zur Endenergie ab. Die Endenergie lässt sich mit Kenntnis der nutzungsseitigen Technikstrukturen auf die Anwendungsarten Licht, mechanische Energie, IuK sowie Wärme aufteilen. Die Wärme beinhaltet wiederum die Prozesswärme (inkl. Warmwasserbereitung) und die Raumheizwärme. Abbildung 1 zeigt schematisch den Energiefluss von der Primärenergie bis zur Anwendung.

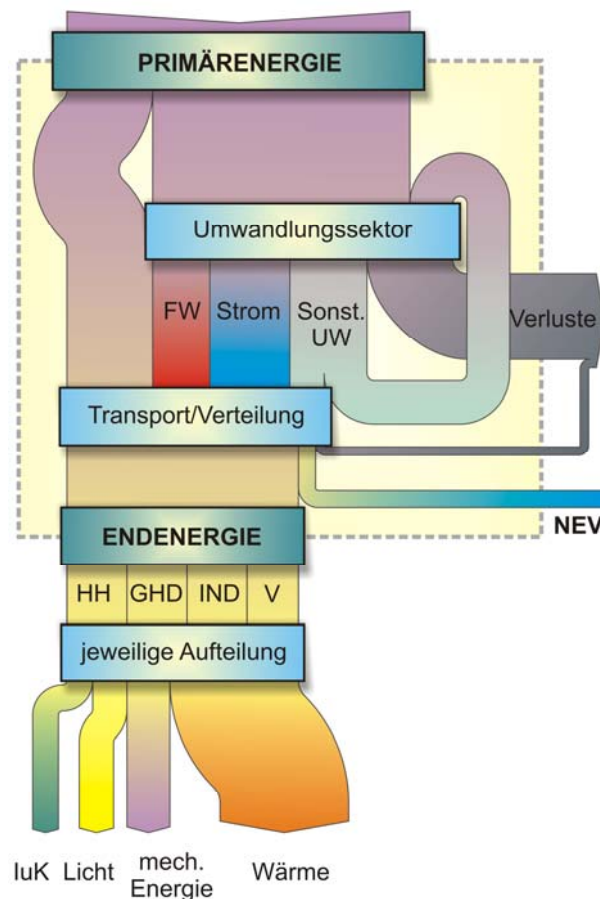


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Energieflusses in Deutschland

Für den Umwandlungssektor wird nach dem so genannten „Bruttoprinzip“ vorgegangen. Energieträger, die aus Umwandlungsprozessen entstehen und wiederum der Umwandlung zugeführt werden, werden sowohl als Ausstoß, als auch Einsatz bilanziert. Das ist z.B. bei Heizöl der Fall, das in Raffinerien aus Rohöl hergestellt und in Kraftwerken in Strom umgewandelt wird. Diese Doppelbilanzierung wird dadurch bereinigt, dass eine Zeile „Energieangebot im Inland nach Umwandlungsbilanz“ ein-

geführt wird, die nur das in den anderen Sektoren zur Verfügung stehende Endenergieangebot ausweist.

Das gleiche Problem ergibt sich jedoch auch, wenn nun Strom aus dezentralen Eigenerzeugungsanlagen ins Stromnetz eingespeist wird. Dann wäre er als Endenergieträger „Strom“ in der Statistik erfasst. Dies ist auch für die zur Erzeugung eingesetzten Energieträger (z.B. Erdgas) der Fall. Es kommt zur Doppelbilanzierung.

Für die geringe Anzahl der Anlagen in Haushalten und Gewerbe-Handel-Dienstleistung ist dieser Effekt (noch) vernachlässigbar, nicht jedoch für die Industriekraftwerke und -heizkraftwerke. Deshalb wird in den Energiebilanzen eine Aufteilung vorgenommen und Strom aus Eigenerzeugungsanlagen der Industrie im Umwandlungssektor ausgewiesen. Er wird dazu bewertet, als wäre er in reinen Kraftwerken erzeugt worden. Für die Wärmeerzeugung ist daher je nach Anwendung eine andere Allokation des Brennstoffeinsatzes notwendig. Die KWK-Wärme taucht dann versteckt in den Bilanzen an unterschiedlichen Stellen auf, wie im Folgenden nochmals genauer erläutert wird.

### 2.1.2 Bewertung der KWK mit einem Referenzkraftwerk (Stromgutschriftmethode)

Abbildung 2 zeigt das methodisch richtige Vorgehen bei der Bewertung der KWK nach einer energetischen Allokation. Während in diesem Beispiel aus hundert Energieeinheiten im Kraftwerkspark 40 Einheiten Strom produziert werden, kommen aus den KWK-Anlagen 30 Einheiten Strom und 50 Einheiten Wärme.

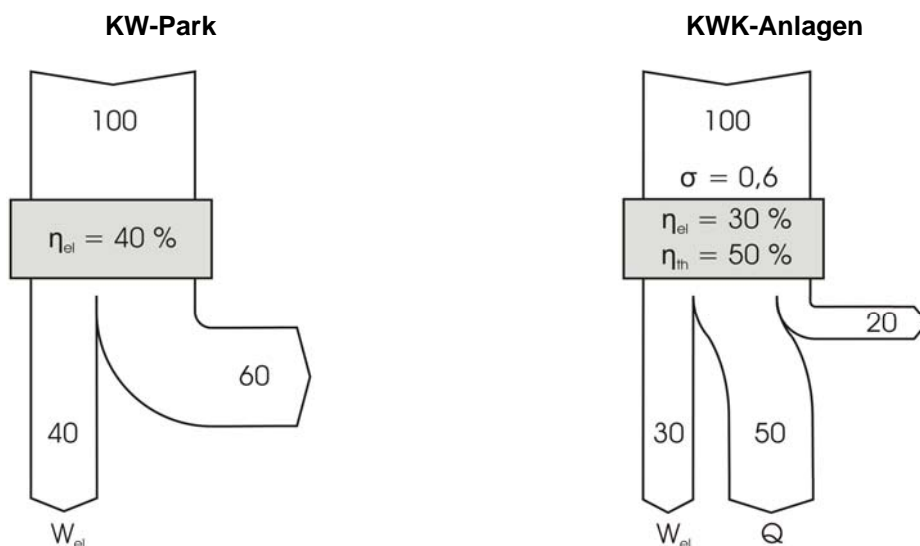


Abbildung 2: Richtige Bewertung der KWK im Energieflussbild

KWK-Anlagen werden in den Bilanzen wie reine Kraftwerke behandelt. Durch die Bewertung mit einem Referenzkraftwerk wird der Brennstoff virtuell auf die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung aufgeteilt. Nur der Brennstoffmehraufwand der gekoppelten gegenüber der ungekoppelten Stromerzeugung wird so der Heizwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung angelastet. Diese Methode wird auch als Stromgutschrift bezeichnet.

In Abbildung 3 ist dieser Sachverhalt dargestellt. Die 30 Einheiten KWK-Strom aus dem oberen Beispiel führen mit dem Nutzungsgrad von 40 % des konventionellen Kraftwerkes zu einem Brennstoffbedarf von 75 Einheiten. Der Brennstoffmehraufwand, also die übrigen 25 Brennstoffeinheiten, werden der Wärmeerzeugung zugerechnet, was zwar den Brennstoffeinsatz summenrichtig wiedergibt, aber bei der Wärmebereitstellung zu einem Nutzungsgrad von 200 % führt.

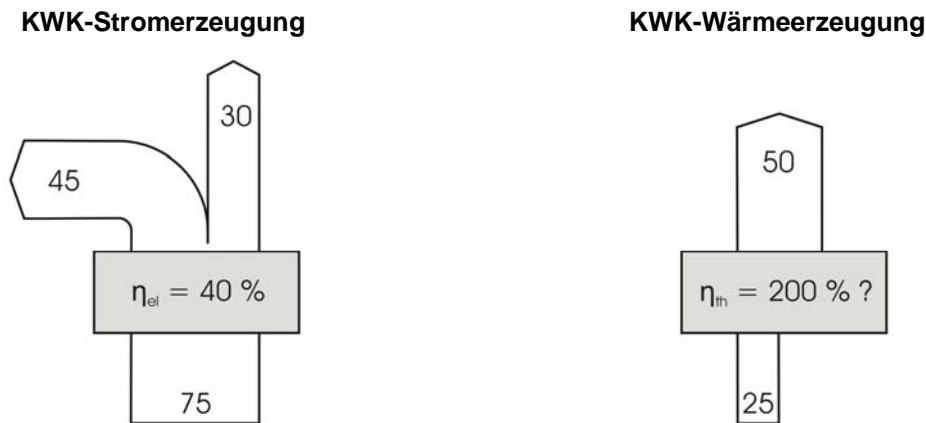


Abbildung 3: Bewertung der KWK mit einem Referenzkraftwerk

KWK-Anlagen werden in unterschiedlichen Sektoren betrieben – von der dezentralen Hausenergie- und Objektversorgung über industrielle Anwendungen bis hin zum Großkraftwerk mit Fernwärmeauskopplung. Alle diese Sektoren werden in der einen oder anderen Form in der geschlossenen Energiebilanz statistisch erfasst.

Nachfolgend sind die unterschiedlichen Bewertungsverfahren für die KWK in den Energiebilanzen und deren Auswirkungen erläutert.

### 2.1.3 KWK der allgemeinen Versorgung in den Energiebilanzen

In den Energiebilanzen für Deutschland /AGEB 07/ wird für die allgemeine Versorgung die Stromerzeugung aus KWK-Anlagen mit derjenigen aus reinen Kraftwerken zusammengefasst. Die Wärme aus Heizkraftwerken ist mit dem nach oben beschriebener Methode ermittelten Energieträgereinsatz aufgeführt (vgl. Abbildung 4).

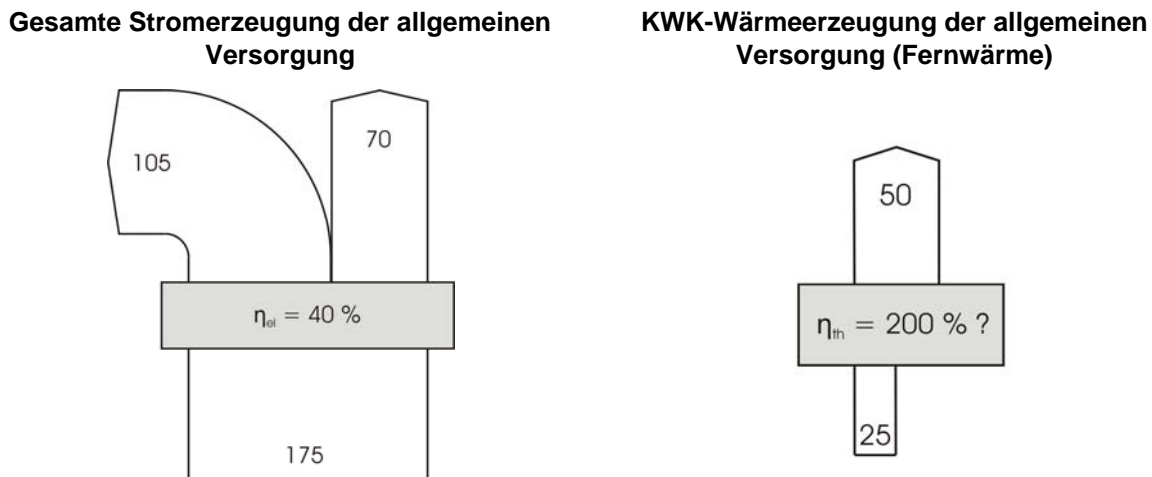


Abbildung 4: KWK in der allgemeinen Versorgung

Allerdings ist die Stromkennzahl, das Verhältnis von Strom- zu Wärmeerzeugung, der Heizkraftwerke in der allgemeinen Versorgung zum Teil deutlich größer als eins. Gleichzeitig ist der Gesamtnutzungsgrad bei Anlagen mit wenig Wärmeauskopplung, z.B. großen Braunkohleblöcken, niedriger, als die im Beispiel angenommenen 80 %. Das führt dazu, dass sich anstatt der 200 % niedrigere, obgleich zu hohe, Nutzungsgrade errechnen.

**2.1.4 KWK in der industriellen Eigenversorgung**

KWK-Anlagen der Industrie werden wie reine Kraftwerke behandelt und der Strom im Posten „Industriewärme- und Kraftwerke“ bilanziert. Die gleichzeitige Wärmeerzeugung wird auf ein Brennstoff-äquivalent zurückgerechnet. Dieses wird mit den Endenergieträgern zusammengefasst als Endenergie ausgewiesen. In Abbildung 5 ist dies als 25+x gekennzeichnet.

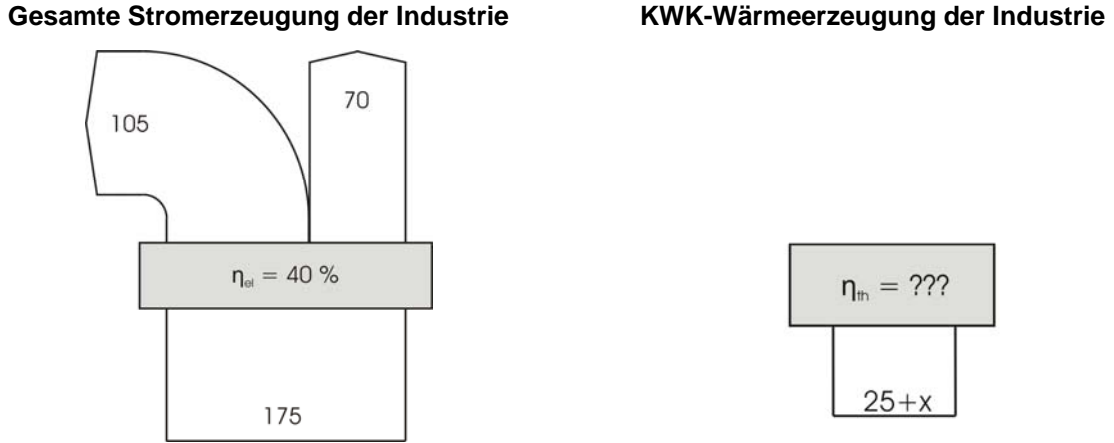


Abbildung 5: KWK in der industriellen Eigenversorgung

Dieses Vorgehen birgt eine große Gefahr, da zusätzlich nicht nachvollziehbar ist, wie viel Energie in konventionellen Wärmeerzeugern eingesetzt wird. Die Interpretation von Szenarienrechnungen mit durchschnittlichen Nutzungsgraden von Heizkesseln kann und wird daher zu Fehlern führen.

Sonstige KWK-Anlagen zur Eigenversorgung, wie BHKW, sind nicht explizit in den Energiebilanzen enthalten. Hier sind lediglich der gesamte Endenergieeinsatz und der gesamte Stromverbrauch der Sektoren bekannt. Dies verursacht daher, wie oben erläutert, eine Doppelbilanzierung.

In Tabelle 1 ist zusammenfassend dargestellt, in welchen Posten die einzelnen KWK-Anteile in den Energiebilanzen /AGEB 07/ bilanziert sind.

Tabelle 1: Bilanzierung der unterschiedlichen KWK-Anlagen bei den amtlichen Energiebilanzen

	KWK-Strom	KWK-Wärme
Allgemeine Versorgung	Zusammen mit ungekoppelter Erzeugung der allgemeinen Versorgung	Als Fernwärme mit dem restlichen Brennstoffeinsatz nach Referenzkraftwerk
Industrielle Eigenerzeugung	Zusammen mit ungekoppelter Erzeugung der industriellen Eigenerzeugung	Als Brennstoffäquivalent nach Referenzkraftwerk zusammen mit dem restlichen Endenergieträgerverbrauch der Industrie
Sonstige Eigenerzeugung	Nicht explizit enthalten	Nicht explizit enthalten

### 2.1.5 Methodik zur Darstellung der KWK in energiebilanzbasierten Szenarien

Diese Intransparenz ist für die Erstellung von energiebilanzbasierten Szenarien zur KWK-Bewertung nur bedingt brauchbar. Durch ein ähnliches Vorgehen wären die Ergebnisse von Szenarienrechnungen nur schwer interpretierbar.

Um die genannten Probleme bei der Bewertung der KWK-Prozesse in den Energiebilanzen zu umgehen wird vorgeschlagen, die KWK-Anlagen vollständig in den Umwandlungssektor aufzunehmen. Dazu ist es notwendig, auf der Endenergieseite einen Posten „Wärmeeigenerzeugung in KWK-Anlagen“ für alle Sektoren einzuführen, in denen dezentrale KWK-Anlagen eingesetzt werden. Diese Endenergieform kann ohne zusätzliche Bilanzierung der Netzverluste an die Anwendung „Wärme“ übergeben werden.

Für eine derartige Umgestaltung der Energiebilanzen müssen die vorhandenen Energiestatistiken neu ausgewertet und bereinigt werden. Erst dann stehen alle notwendigen Informationen zu Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in Deutschland zur Verfügung.

**Zwischenfazit:** Auf Basis der derzeitigen Energiebilanzen ist eine Modellierung von umfassenden KWK-Szenarien nicht möglich, da nicht genügend Informationen abgebildet sind. Zur Erhöhung der Transparenz sollten die KWK-Anlagen vollständig, d.h. inkl. Wärmeeigenerzeugung im Umwandlungssektor bilanziert werden.

## 2.2 Verknüpfung von KEA-Daten mit den Energiebilanzen

### 2.2.1 Definition des Kumulierten Energieaufwandes

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) gibt die Gesamtheit des über Bereitstellungsnutzungsgrade primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes, also eines Produkts oder einer Dienstleistung, entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Der kumulierte Energieaufwand stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung ( $KEA_H$ ), die Nutzung ( $KEA_N$ ) und die Entsorgung ( $KEA_E$ ) des ökonomischen Gutes dar, wobei für die Teilsummen anzugeben ist, welche Vor- und Nebenstufen mit einbezogen sind:

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$$

#### **Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung ( $KEA_H$ ):**

$KEA_H$  wird die Summe der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich bei der Herstellung selbst, sowie bei der Gewinnung, Verarbeitung, Herstellung und Entsorgung der Fertigungs-, Hilfs- und Betriebsstoffe und Betriebsmittel einschließlich der Transportaufwendungen für einen Gegenstand oder eine Dienstleistung ergeben.

#### **Kumulierter Energieaufwand für die Nutzung ( $KEA_N$ ):**

$KEA_N$  wird die Summe der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich beim Betrieb und der Nutzung eines Gegenstandes oder einer Dienstleistung ergeben. Diese Summe beinhaltet neben dem Betriebsenergieverbrauch den KEA für die Herstellung, Einbau und Entsorgung von Ersatzteilen, von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie von Betriebsmitteln, die für Betrieb und Wartung erforderlich sind. Die zugrunde gelegten Betriebs- und Nutzungszeiten sind stets anzugeben. Der Energieaufwand für Transporte ist mit einzuschließen.

#### **Kumulierter Energieaufwand für die Entsorgung ( $KEA_E$ ):**

$KEA_E$  wird die Summe der primärenergetisch bewerteten Energieaufwendungen genannt, die sich bei der Entsorgung eines Gegenstandes oder Teilen des Gegenstandes, d.h. dem endgültigen Ausschleusen aus dem Nutzungskreislauf, ergeben. Diese Summe beinhaltet neben dem Energieaufwand für die Entsorgung auch den KEA für die Herstellung und Entsorgung von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie von Betriebsmitteln, die für die Entsorgung erforderlich sind. Der Energieaufwand für Transporte ist hier ebenfalls zu bilanzieren.

**Spezifischer KEA:**

Insbesondere für die Berechnung des Primärenergieaufwandes, der den Energiegehalt der Rohstoffe in ihrer Lagerstätte angibt, wird der Spezifische KEA verwendet. Er beschreibt den Kumulierten Energieaufwand, der benötigt wird, um eine bestimmte Menge Endenergie am Einsatzort bereitzustellen. Er kann in den Einheiten kWh<sub>prim</sub> pro kWh<sub>end</sub> oder auch MJ<sub>prim</sub> pro MJ<sub>end</sub> angegeben werden.

Bei energiewandelnden Anlagen stellt der spezifische KEA<sub>N</sub> den Kehrwert des Nutzungsgrades dar und wird oft auch als spezifischer Brennstoffverbrauch bezeichnet. Er gibt an, wie viel Energie aufgewendet werden muss, um eine Einheit der Zielenergie (Strom und/oder Wärme) zu erhalten.

Der KEA erlaubt eine primärenergetische Bewertung von der Lagerstätte der Primärenergieträger bis zur Zielenergie (bei KWK: Strom und Wärme), was insbesondere bei Energiewandlern mit unterschiedlichen Energiequellen eine entscheidende Rolle spielen kann, wenn deren Gesamteffizienz verglichen werden soll.

**2.2.2 Beispiele des KEA von Energiewandlern**

Bei der Bestimmung von Lebenszyklusdaten ist die Ermittlung von Herstellungsaufwendungen meist mit einem höheren Aufwand verbunden als die Berechnung des KEA<sub>N</sub> und KEA<sub>E</sub>. Meist wird ausgehend von Massenbilanzen über Datenbanken, in denen der Bereitstellungsaufwand für die einzelnen Materialien angegeben ist, ein Energieverbrauch für die Herstellung der Anlagen ermittelt.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Energiebilanz zur Herstellung eines 360 MW GuD-Kraftwerkes. Neben der Bautechnik, die mit den Gebäuden den größten Anteil in der Massenbilanz einnimmt, hat die Energietechnik mit den aufwändig herzustellenden Metallbauteilen den größten Einfluss auf den KEA<sub>H</sub>. Insgesamt werden zur Herstellung des Kraftwerkes ca. 440 TJ an Primärenergie verbraucht.

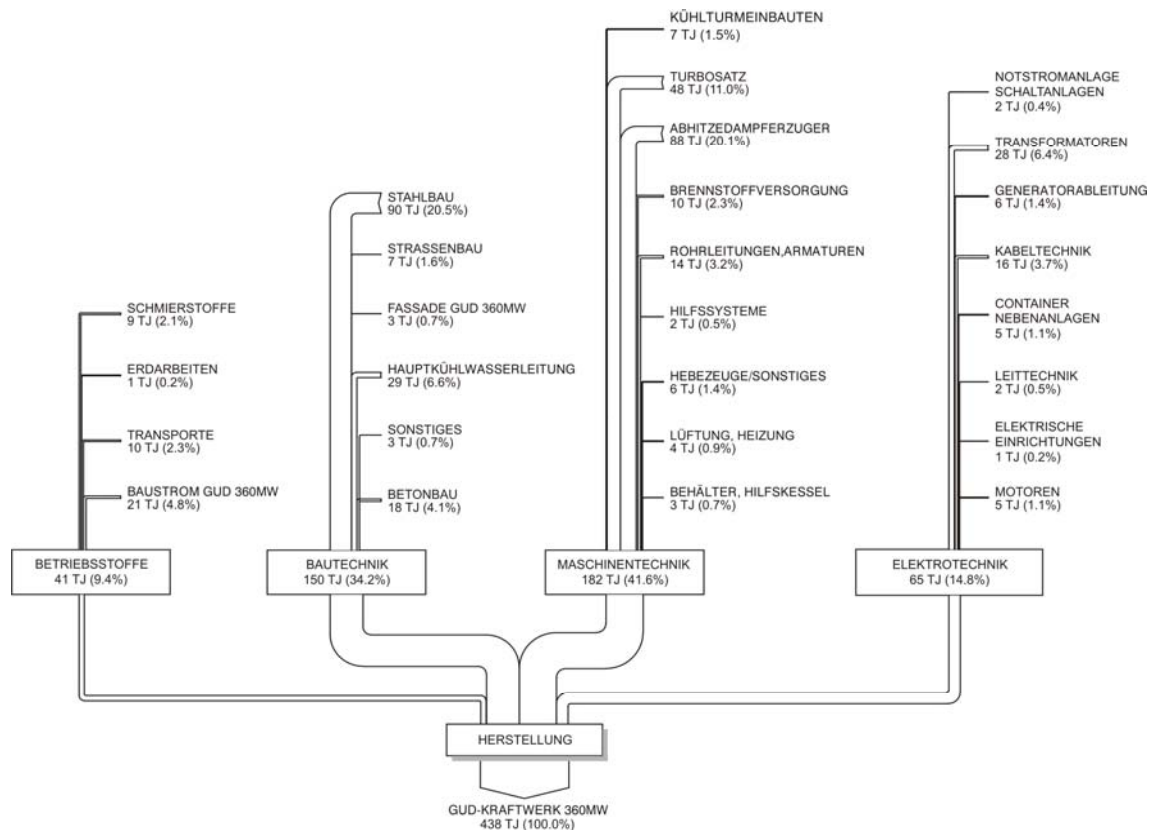


Abbildung 6: Energiebilanz eines GuD-Kraftwerkes /HOFF 96/

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der Herstellungsaufwendungen verschiedener Stromerzeugungstechniken. Zusätzlich sind die Leistungsgrößen, typische Lebensdauer und jährliche Vollbenutzungsstunden angegeben. Der energiespezifische  $KEA_H$  kann errechnet werden, indem die Herstellungsaufwendungen auf die daraus abgeleiteten typischen Erzeugungsmengen bezogen werden.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Herstellungsaufwendungen verschiedener Stromerzeugungstechniken /HOFF 96/, /LCI 04/

Anlage	Spezifikation	$P_{el,brutto}$ in MW	$L_d$ a	$t_a$ h	$KEA_H$ GJ	Quelle
Kernkraftwerk		1410	32	7.700	7.732.000	FfE (Gabie)
Braunkohlekraftwerk		978	40	7.500	6.722.000	FfE (Gabie)
Steinkohlekraftwerk		553	40	5.000	2.635.000	FfE (Gabie)
GuD-Kraftwerk		353	30	7.000	438.000	FfE (Gabie)
BHKW I		2,17	15	5.090	11.200	FfE (Gabie)
BHKW II		0,48	15	4.856	3.870	FfE (Gabie)
Laufwasserkraftwerk		9,1	90	4.600	280.000	FfE (Gabie)
Windkraftanlage		0,5	20	2.000	11.250	FfE (Gabie)
PV		1	20	1.500	63.000	FfE (Gabie)
PV	sc-Si	0,00312	20	900	63	LCI (FfE)
	pc-Si	0,00312	20	900	67	LCI (FfE)
	a-Si	0,00312	20	900	73	LCI (FfE)
	CIS	0,00312	20	900	64	LCI (FfE)
Brennstoffzelle	PAFC	0,2	15	6.667	4.228	LCI (DLR)
	PEFC	0,2	15	6.667	2.850	LCI (DLR)
	SOFC	0,25	15	6.667	2.771	LCI (DLR)
	SOFC Hybrid	0,3	15	6.667	2.771	LCI (DLR)
Fossile KW	Erdgas-GuD	832,5	35	7.500	781.448	LCI (IER)
	Stk-DT	645	35	7.500	3.645.199	LCI (IER)
	Stk-DWSF	471	35	7.500	3.096.689	LCI (IER)
	Stk-IGCC	480	35	7.500	3.275.258	LCI (IER)
	Brk-IGCC	480	35	7.500	3.275.258	LCI (IER)
	Brk-DT	1105	35	7.500	9.225.455	LCI (IER)
Wind	Offshore WEA	5	20	4.400	38.479	LCI (LEE)

Der energiespezifische Herstellungsaufwand von Kraftwerken ist im folgenden Diagramm (Abbildung 7) bezogen auf die erzeugte Strommenge aufgezeigt. Die Herstellungsaufwendungen der Anlagen sind über deren elektrischer Leistung doppeltlogarithmisch eingetragen.

Es lässt sich erkennen, dass der spezifische Herstellungsaufwand bei fast allen Anlagen mit zunehmender Leistung abnimmt. Lediglich bei stark modular aufgebauten Einheiten wie Photovoltaik- und Windkraftanlagen, sowie auch bei Wasserkraftwerken bleibt der KEA konstant. Zu beachten ist, dass bei dieser Berechnung auch die KWK-Anlagen wie reine Kraftwerke behandelt wurden. Der Herstellungsaufwand ist daher nicht auf Strom und Wärme aufgeteilt, sondern allein auf die erzeugte Strommenge bezogen.

Ein breiter Bereich – zwischen 50 % und 1 ‰ – der erzeugten Energiemenge muss bei den Kraftwerken für deren Herstellung aufgewendet werden. Bei nahezu allen energieumwandelnden Anlagen wird der KEA vom Energieeinsatz während der Nutzungsphase dominiert. Die Entsorgung ist energetisch meist vernachlässigbar.



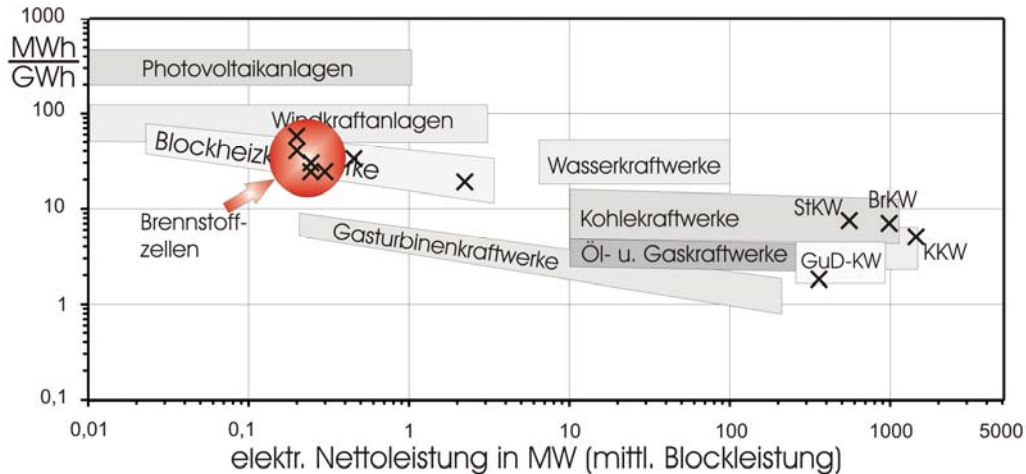


Abbildung 7: Energiespezifische Herstellungsaufwendungen für verschiedene Stromerzeugungsanlagen /eigene Berechnungen/, /KOE 99/, /VIE 04/

### 2.2.3 Einbindung von Lebenszyklusdaten in die Energiebilanzen

In den Energiebilanzen ist der kumulierte Herstellungsaufwand ( $KEA_H$ ) für Anlagen bereits implizit in dem Bereich erfasst, in dem die Produkte hergestellt werden. Das sind bei Kraftwerken beispielsweise die Baubranche und die Industriezweige „Herstellung von elektrischen Anlagen“, „Metallerzeugung und -verarbeitung“, usw. Eine zusätzliche Bewertung dieses Energieverbrauchs durch die Einrechnung des  $KEA_H$  führt daher zu einer Doppelbilanzierung, wenn der  $KEA_H$  zu der Primärenergie addiert würde.

Sollen die Szenarien daher explizite Daten zu Herstellungsaufwendungen für diese Anlagen beinhalten, muss der  $KEA_H$  für den abgeschlossenen Bereich des Umwandlungssektors als separate Information ausgewiesen werden.

Der gesamte  $KEA$  für die Strombereitstellung kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$KEA_{el,Verbrauch} = W_{el,Verbrauch} \cdot \left( \underbrace{\frac{1}{\eta_{Netz} \cdot \eta_{KW} \cdot \eta_{BS}} + KEA_{H,Netz}}_{\text{Netzanlagen}} \right) + \sum_i W_{el,netto,i} \cdot \left( \underbrace{KEA_{H,KW,i}}_{\text{Kraftwerke}} + \underbrace{\frac{KEA_{H,BS,i}}{\eta_{KW,i}}}_{\text{Förderanlagen}} \right)$$

*i: Brennstoffart*

Ressourcenverbrauch

Die einzelnen Herstellungsaufwendungen sind energiespezifisch, bezogen auf die jeweilige Outputenergie, anzusetzen.

Der Ausbau der erneuerbaren Energie und auch die Dezentralisierung, z.B. durch eine Einführung von Brennstoffzellen, führt notwendigerweise zu einer Erhöhung der Kraftwerkskapazitäten, um Reserveleistung bereitstellen zu können. Dadurch steigt auch der kumulierte Energieaufwand im Anlagenpark. Dieser Mehraufwand kann durch die Verwendung obiger Formel nicht adäquat abgebildet werden, da alle Herstellungsaufwendungen auf eine sich verändernde Erzeugungsmenge bezogen werden.

Für eine Szenarienbildung muss dies im energiespezifischen  $KEA$  berücksichtigt werden oder aber mit Kenntnis der Anlagenstruktur ein leistungsspezifischer Herstellungsaufwand verwendet werden.

**Zwischenfazit:** Für die Verwendung von KEA-Daten in Szenarien muss ggf. eine Vielzahl mehr an Informationen über die eingesetzten Anlagen bekannt sein, als aus den reinen Energiebilanzen ersichtlich ist. Die Verwendung energiespezifischer KEA-Werte ist nur möglich, wenn die Rahmenbedingungen (z.B. Ausnutzungsdauern) sich nicht oder nur unwesentlich ändern. Die Lebenszyklusdaten, insbesondere unter Berücksichtigung der energetischen Herstellungsaufwendungen, können als Entscheidungshilfe für eine nachhaltige Entwicklung dienen.

### 3 Ergebnisse

Abbildung 8 zeigt zusammengefasst abgebildet die Ergebnisse der methodischen Vorgehensweise zur ganzheitlichen Bewertung des Energiesystems Deutschland im Jahr 2003. Die KWK-Anlagen werden dabei komplett (inklusive der Wärmeerzeugung) im Umwandlungssektor bilanziert. Auf diese Weise ist die Berechnung einer Gesamtenergieeffizienz für die Wärme- und Strombereitstellung möglich. Nur im Gesamtenergiesystem, d.h. im Kontext mit der ungekoppelten Wärmeerzeugung, kann die KWK in der Gesamtheit richtig bewertet werden.

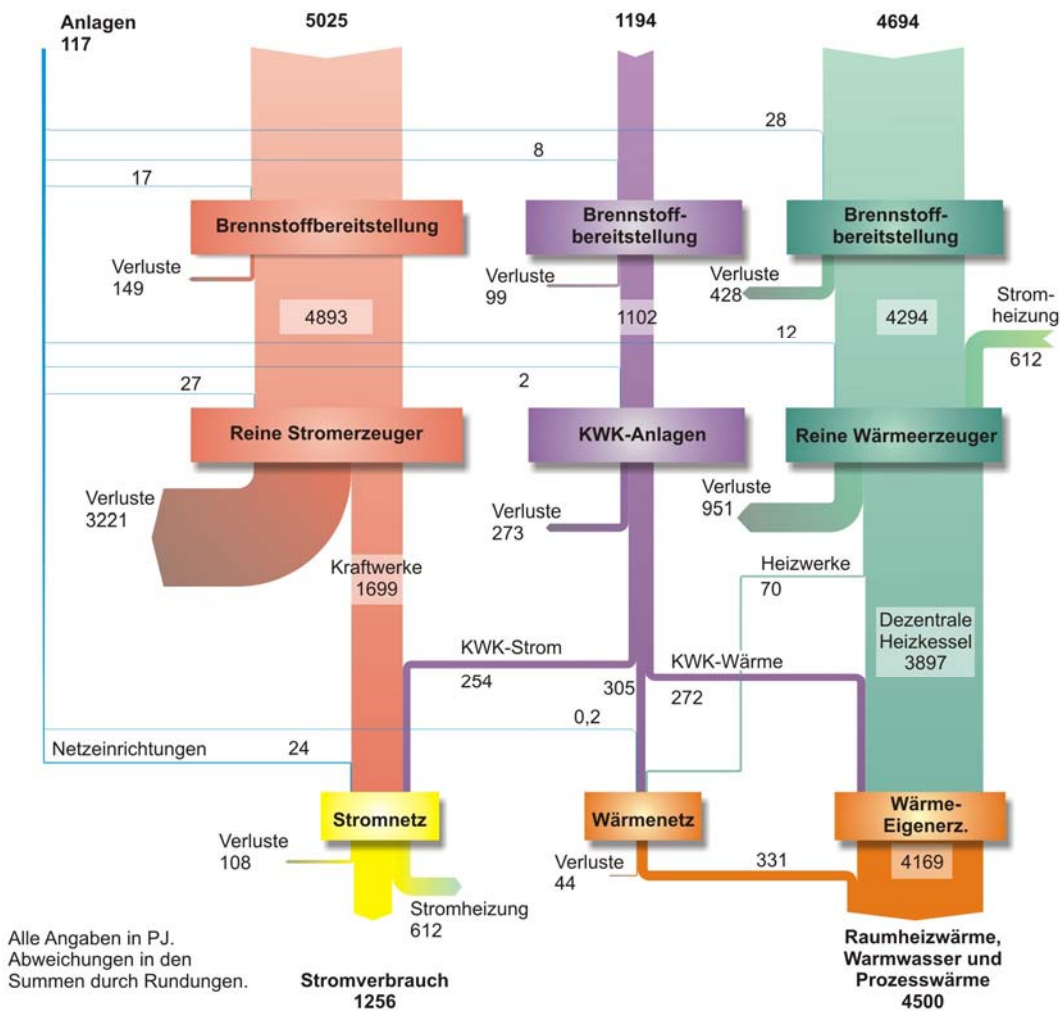


Abbildung 8: Ganzheitliche dynamische Bewertung der KWK im Energiesystem Deutschlands im Jahr 2003

Links ist der Energiefluss für die reine Stromerzeugung in Kraftwerken dargestellt. Ein Teil des Stroms wird in KWK-Anlagen bereitgestellt, die auch Wärme für die Fernwärmeversorgung und die Eigen-

versorgung von z.B. Industriebetrieben erzeugen. Der große Pfeil rechts beschreibt die reinen Wärmeerzeuger, die neben dem kleinen Teil der Spitzenlastdeckung bei der Fernwärme hauptsächlich Wärme in Haushalten und Gewerbe-Handel-Dienstleistung bereitstellen. Dabei ist zu beachten, dass ein Teil dieser Wärme auch durch Strom erzeugt wird. Die Brennstoffbereitstellung für die Stromheizung entspricht der gesamten Kette der Strombereitstellung.

Der gesamte KEA der Strom- und Wärmebereitstellung beträgt 2003 in Deutschland etwa 11 EJ bei einer Gesamtenergieeffizienz von rund 52 %. Die Stromkennzahl der KWK – das Verhältnis von Stromerzeugung zu Wärmeerzeugung – beträgt 0,44, während das Verhältnis des Strombedarfs zum Wärmebedarf mit 0,28 deutlich darunter liegt.

Etwa 1 % des gesamten KEA entfällt derzeit auf die Herstellung der Anlagen zur Bereitstellung von Wärme und Strom. Bei den KWK-Anlagen ist dieser Faktor günstiger, da die zusätzliche Auskopplung von Wärme lediglich einen sehr geringen apparativen Aufwand bedingt.

Für eine ganzheitliche Wirkungsabschätzung müssen zur primärenergetischen Bewertung auch andere Faktoren, wie Emissionen, Nachhaltigkeit und Versorgungssicherheit berücksichtigt werden. Und auch zur Ableitung von Szenarien sind, wie für die detaillierte KEA-Betrachtung, noch weitere Hintergrundinformationen (z.B. Potenziale, Technikstruktur, etc.) notwendig. Auf dieser Basis - wenn die KWK in das Energiesystem der Strom- und Wärmeerzeugung eingebettet ist - kann eine ganzheitliche Aus- und Bewertung unterschiedlicher Versorgungsszenarien erfolgen.

## 4 Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus diesen Überlegungen lauten:

- Zur richtigen Bewertung des Gesamtenergiesystems eines Landes müssen die amtlichen Energiestatistiken ggf. bereinigt, zumindest aber richtig interpretiert werden.
- Um die Transparenz zu erhöhen und einfacher Szenarien ableiten zu können, wird vorgeschlagen, KWK-Anlagen vollständig im Sektor „Umwandlung“ zu bilanzieren.
- Die gekoppelt erzeugte Wärme muss als eigene Endenergieform behandelt werden.
- Zur Bewertung des Energiesystems muss neben der Stromerzeugung auch die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen sowie die ungekoppelte Wärmeerzeugung berücksichtigt werden.
- Zur Ermittlung der Gesamtenergieeffizienz eines Energiesystems können KEA-Daten dienen.
- Der Herstellungsaufwand der Anlagen kann als separate Information zu den Energiebilanzen ausgewiesen werden.

## 5 Literaturverzeichnis

- /AGEB 07/      Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, [www.ag-energiebilanzen.de](http://www.ag-energiebilanzen.de), Januar 2007
- /HOFF 96/      Hoffmayer, M.; Köhler, D.; Schwaiger, K.: Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GABIE) – Teil V Energetische Untersuchung eines GuD-Kraftwerkes, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 1996
- /KOE 99/      Köhler, D. et. al.: *Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GABIE)*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 1999
- /LCI 04/      Briem et. al.: *Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechnologien*, IER, DLR, LEE, FfE, für das BMWA, 2004
- /VIE 04/      Viebahn, P.; Krewitt, W.: *Brennstoffzellen, in Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechnologien*, 2004