



# **Zertifizierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Elektroenergie und Heizwärme aus KWK-Anlagen**

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Achim Dittmann, Dr.-Ing. Thomas Sander

**Anmerkung:**

Eine Veröffentlichung, besonders dann, wenn sie nur auszugsweise erfolgt, ist nur nach Einholung der schriftlichen Zustimmung der TU Dresden zulässig.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
1 Einleitende Bemerkungen .....	3
2 Bewertung der „Herkunft“ .....	3
2.1 Harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte nach EU-Richtlinie.....	3
2.2 Bewertung mit Hilfe des Primärenergiefaktors .....	6
2.3 Physikalisch begründete Aufteilungsfaktoren.....	7
2.3.1 Kalorische Aufteilung .....	8
2.3.2 Exergetische Aufteilung.....	8
2.3.3 Strombasierte Aufteilung .....	10
3 Primärenergiebedarf für Heizwärme einer Wärmepumpe.....	12
4 Zusammenfassung.....	15
Literatur .....	16
Anlage 1: Berechnungstabellen .....	17
Anlage 2: Grafiken zur Emissionsaufteilung.....	18

# 1 Einleitende Bemerkungen

Der getrennte Ausweis von CO<sub>2</sub>-Emissionen der Koppelprodukte Elektroenergie und Wärme ist notwendig und energiepolitisch von zunehmender Bedeutung, weil sich beide Produkte der ökologischen „Konkurrenz“ unterschiedlicher Märkte stellen müssen. Bei der Elektroenergie ist dies ein globaler Markt, der eine ökologische Bewertung insofern erschwert, als seine „Herkunft“ kaum nachvollziehbar und damit bewertbar wird. Etwas einfacher ist dies bei der Wärme, die einen regionalen und relativ begrenzten Markt bedient und die mögliche Konkurrenz aus Kesselanlagen besteht.

Mit einer Umlage der Primärenergie bzw. der CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich spezifische Emissionen der KWK-Produkte ermitteln, mit denen die ökologische Güte im Vergleich zu anderen Erzeugungsvarianten z.B. als Marketing-Instrument ausgewiesen und genutzt werden kann.

Diese Bewertung setzt voraus, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen alternativer Energieversorgungsvarianten seriös und nachvollziehbar ermittelt werden können. Im Falle des Produktes Wärme wird dies einfach darstellbar sein, da die Alternativvarianten im günstigsten Fall ein Brennwertkessel darstellt. Der Vergleich mit einer Wärmepumpe wird schon kritischer, da die Herkunft der Antriebsenergie – Elektroenergie – zumeist nur über Annahmen, die selbstverständlich von potenziellen Gegnern der kommunalen Wärmeversorgung mit KWK-Anlagen immer angezweifelt werden können, ermittelt werden kann.

Gleiches gilt demzufolge für die ökologische Bewertung des Koppelproduktes KWK-Strom. Aus diesem Grund wird empfohlen, zwar spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen zu ermitteln und offen zu legen. Zusätzlich dazu sollten jedoch Emissionseinsparungen, die nur bei Nutzung der KWK-Anlagen auftreten, dargestellt werden. Empfehlenswert ist die Verwendung solcher „Vergleichsanlagen“, deren Sinnfälligkeit durch gesetzliche Regelungen und Verordnungen zu akzeptieren sind.

Damit erfolgen die nachstehenden Diskussionen in zwei Stufen, nämlich hinsichtlich vergleichender Bewertung und Primärenergie bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionsumlage.

## 2 Bewertung der „Herkunft“

### 2.1 Harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte nach EU-Richtlinie

Auf der Grundlage dieser EU-Richtlinie 2004/8/EG [1] wurden am 21.12.2006 harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte [2] festgelegt, auf deren Basis künftig KWK-Anlagen mit der getrennten Erzeugung von Wärme und Elektroenergie zu vergleichen sind. Sie dienen der Kennzeichnung der Qualität der Energieumwandlung.

Für die hier untersuchten KWK-Anlagen, die dominierend Erdgas einsetzen, beträgt der harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwert Heizwerk

$$\eta_{H,HW} = 90 \text{ \%}.$$

Der Wert für die alternative Elektroenergieerzeugung im Kraftwerk wird bestimmt durch

- den eingesetzten Brennstoff (hier Erdgas)
- einen Wirkungsgrad-Grundwert abhängig vom Inbetriebnahmejahr
- Korrekturwerte abhängig von der Spannungsebene, auf die eingespeist wird, und der jahresmittleren gerundeten Außenlufttemperatur ( $t_{a,m} = 9 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Damit ergeben sich harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte der alternativen Kraftwerke von

- $\eta_{H,KW}=0,478$  im Minimum (HKW B) und
- $\eta_{H,KW}=0,500$  im Maximum (HKW C),

die damit Vergleichsanlagen mit hohen Anforderungen repräsentieren.

Mit den Basisdaten der KWK-Netto-Stromeinspeisung  $A_{Bne,KWK}$  und der KWK- Netzwärme  $Q_{Ab,KWK}$  ergibt sich dann der Brennstoffwärmebedarf der getrennten Erzeugung in Höhe von

$$Q_{B,g} = \frac{A_{Bne,KWK}}{\eta_{H,KW}} + \frac{Q_{Ab,KWK}}{\eta_{H,HW}} \quad (1)$$

Eine hocheffiziente KWK-Anlage im Sinne von [1] und [2] sollte Primärenergieeinsparungen

$$\Delta q_B = \left( 1 - \frac{W_{KWK}}{Q_{B,g}} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

von mehr als 10% besitzen.

Da in den Basisdaten auch Anteile der ungekoppelten Erzeugung enthalten sind, wird die auf den KWK-Anteil umgelegte Brennstoffwärme aus dem Jahresbrennstoffnutzungsgrad

$$\zeta = \frac{A_{Bne} + Q_{Ab}}{W_{ges}} \quad (3)$$

$$\text{zu } W_{KWK} = (A_{Bne,KWK} + Q_{Ab,KWK}) / \zeta \quad (4)$$

ermittelt.

Es zeigt sich, dass die KWK- Anlagen, ausgenommen HKW B, das Hocheffizienzkriterium erfüllen.

Sollte es sinnvoll sein, sich nur auf die Anwendung der EU-Richtlinie zu beschränken, dann sind zwei Betrachtungsweisen denkbar.

Zum einen kann eine Primärenergie- bzw. Emissionsumlage erfolgen, indem nach den Primärenergieaufwendungen der getrennten Erzeugung von Elektroenergie und Wärme aufgeteilt wird. Für den Aufteilungsfaktor für KWK-Strom folgt dann

$$\alpha_{EL} = \frac{A_{Bne,KWK} / \eta_{H,KW}}{Q_{Bg}} \quad (5)$$

und Wärme  $\alpha_W = 1 - \alpha_{EL}$ .

Mit den KWK-Emissionen der Basisdaten  $E_{CO_2/KWK}$  lassen sich daraus die Teilemissionen der Produkte

- KWK-Strom  $E_{CO_2,KWK,EL} = E_{CO_2,KWK} \cdot \alpha_{EL}$  (6)

- KWK-Wärme  $E_{CO_2,KWK,W} = E_{CO_2,KWK} \cdot \alpha_W$  (7)

und daraus, wenn notwendig, die spezifischen, d.h. produktbezogenen  $CO_2$ - Emissionen ermitteln.

Zum Vergleich dazu sind dann die Emissionen der getrennten Erzeugung auf der Basis der harmonisierten Wirkungsgradreferenzwerte, d.h.

$$E_{CO_2,H,KW} = \frac{A_{Bne,KWK}}{\eta_{H,KW}} \cdot e_{CO_2} \quad (8)$$

bzw.

$$E_{CO_2,H,KW} = \frac{Q_{Ab,KWK}}{\eta_{H,HW}} \cdot e_{CO_2} \quad (9)$$

mit  $e_{CO_2} = e_{CO_2,EG} = 198 \text{ kg/MWh}$  zu verwenden.

Denkbar für eine vergleichende Bewertung wäre auch ein „Gutschriftverfahren“, wie dies bei der Ermittlung der Primärenergiefaktoren nach DIN 4701-10 erfolgt, indem die primärenergetischen Vorteile nur einem Produkt „gutgeschrieben“ werden.

Folgt man dieser Vorgehensweise, dann werden dem KWK-Strom die KWK-Gesamtemissionen  $E_{CO_2,KWK}$  abzüglich der Emission der getrennten Bereitstellung der Wärme (harmonisierter Referenzwirkungsgrad)

$$E_{CO_2,H,W} = \frac{Q_{Ab,KWK}}{\eta_{H,HW}} \cdot e_{CO_2,EG} \quad (10)$$

zugewiesen, so dass spezifische Emissionen von

$$e_{CO_2,KWK,EL} = \frac{E_{CO_2,KWK} - E_{CO_2,H,HW}}{A_{Bne,KWK}} \quad (11)$$

ermittelt werden. Bei der Emissionsbewertung der Wärme würden exakt wie bei der Ermittlung der Primärenergieeinsparung der Emission eines „verdrängten“ Referenzkraftwerkes

$$E_{\text{CO}_2, \text{H, KW}} = \frac{A_{\text{Bne, KWK}}}{\eta_{\text{H, KW}}} \cdot e_{\text{CO}_2} \quad (11a)$$

„gutgeschrieben“, sodass sich spezifische Emissionen in Höhe von

$$e_{\text{CO}_2, \text{KWK, W}} = \frac{E_{\text{CO}_2, \text{KWK}} - E_{\text{CO}_2, \text{H, KW}}}{Q_{\text{Bne, KWK}}} \quad (12)$$

ergeben.

Obwohl mit der zuletzt dargestellten Bewertung sinngemäß nach einer gültigen Norm verfahren wird, ist sie dennoch kritisch zu betrachten, da die jeweiligen Vorteile nur einem Produkt zugeordnet werden.

## 2.2 Bewertung mit Hilfe des Primärenergiefaktors

Grundlage dafür ist die DIN 4701-10. Sie findet bislang nur Anwendung, wenn der Primärenergiefaktor der per Übergabestation übertragenen Wärme  $Q_N$  (in den übergebenen Basisdaten als Nutzwärme-KWK bezeichnet) zu ermitteln ist.

Beschränken wir uns auf die Bewertung der KWK-Produkte, dann lautet die Berechnungsgleichung für den Primärenergiefaktor der Nutzwärme mit den hier verwendeten Symbolen

$$f_{\text{PE, WW, KWK}} = \frac{W_{\text{KWK}} f_{\text{PE, Br}} + (A_{\text{el, Hi}} - A_{\text{Bne, KWK}}) f_{\text{PE, EL}}}{Q_{\text{N, KWK}}} \quad (13)$$

mit  $A_{\text{el, Hi}}$  – elektrischer Hilfsenergiebedarf für Pumpen u. a.

$f_{\text{PE, Br}}$  – Primärenergiefaktor Brennstoff (EG:1,1)

$f_{\text{PE, EL}} = 2,7$  – Primärenergiefaktor des Strommixes in Deutschland

(siehe [3]).

Der Primärenergiefaktor der KWK-Nutzwärme stellt den Primärenergieeinsatz für die Wärme unter Berücksichtigung der Umwandlungsketten der Primärenergie bezogen auf die Nutzwärme dar, bei der die Vorteile des „verdrängten“ Stroms des Kraftwerksparks Deutschland vollständig der Wärme gutgeschrieben werden. Für die Verwendung zur Emissionsumlage ist selbstverständlich nur der über dem „Bruchstrich“ stehende Primärenergiebedarf KWK-Wärme, nachfolgend als  $PE_{\text{KWK, WW}}$  bezeichnet. Soll ein solches Kriterium auch für den KWK-Strom angewendet werden, dann müsste die durch die KWK-Kopplung verdrängte und nicht gekoppelt erzeugte Nutzwärme dem Primärenergieeinsatz „gutgeschrieben“ werden.

Somit ergibt sich, der DIN 4701-10 sinngemäß folgend, der Primärenergiebedarf KWK-Strom

$$PE_{KWK,EL} = f_{PE,Br} (W_{KWK} - Q_{N,KWK} / \zeta_{HW}), \quad (14)$$

mit  $\zeta_{HW} = 0,9$  für den Brennstoffnutzungsgrad eines alternativen Gas-Heizwerkes. Hieraus wird bereits deutlich, dass die Stromgutschrift für den Primärenergiebedarf Wärme zu Lasten des Primärenergiebedarfs KWK-Strom geht und das umso mehr, je größer die Stromkennzahl ist.

Werden die ermittelten Werte für Aufteilung der Primärenergie auf die KWK-Produkte, d.h. für den KWK-Strom

$$\alpha_{EL} = \frac{PE_{KWK,EL}}{PE_{KWK,WV} + PE_{KWK,EL}} \quad (15)$$

bzw. die Wärme

$$\alpha_{WV} = 1 - \alpha_{EL}$$

benutzt, dann werden die Auswirkungen noch deutlicher.

Wie bereits im vorigen Kapitel dargestellt, können daraus die zugeteilten absoluten und spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen bestimmt werden.

Die Bewertung nach Primärenergiefaktoren zeigt im Vergleich zur Bewertung nach harmonisierten Wirkungsgraden gemäß EU-Richtlinie exorbitant hohe spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen für den KWK-Strom. Trotzdem sind gegenüber einer Bewertung des Strommixes Deutschland (Analyse des Jahres 2005 nach [4], siehe Tabelle 3) durchaus noch ökologische Vorteile erkennbar. Obwohl im Strommix sowohl die Kernenergie als auch die Stromerzeugung aus regenerativen Energiequellen mit Null bewertet werden, ergeben sich spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen von

$$e_{CO_2,MIX} = 199,6 \text{ kg/MWh}_{Br}$$

so dass spezifische strombezogene CO<sub>2</sub>-Emissionen unter Nutzung des Primärenergiefaktors Elektroenergie von  $f_{PE,EL} = 2,7$  in Höhe von

$$e_{CO_2,EL} = f_{PE,EL} \cdot e_{CO_2,MIX} = 539 \text{ kg/MWh}_{EL}$$

errechnet werden.

Trotz alledem kann aus den vorstehend genannten Gründen eine Bewertung auf der Basis modifizierter Primärenergiefaktoren nicht empfohlen werden.

### 2.3 Physikalisch begründete Aufteilungsfaktoren

Mit Bezug auf die vorstehenden Ausführungen kann nach derzeitigem Stand ein thermodynamisch begründetes Aufteilungskriterium zum Ausweis der spezifischen

Emission gekoppelt mit einem Vergleich auf Basis der EU-Richtlinie empfohlen werden. Dabei sind, wie bereits seit PAUER [5] diskutiert, mehrere Verfahren denkbar.

### 2.3.1 Kalorische Aufteilung

Das für Laien plausibelste Verfahren, die sog. kalorische Aufteilung, erfolgt auf der Basis des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik. Hierbei werden die ans elektrische und Fernwärmenetz abgegebenen Energieströme „gleich behandelt“ und es gilt

$$\alpha_{EL,K} = \frac{A_{Bne,KWK}}{A_{Bne,KWK} + Q_{Ab,KWK}} = \frac{\sigma_{KWK}}{1 + \sigma_{KWK}} \quad (16)$$

bzw.  $\alpha_{WV,K} = 1 - \alpha_{EL,K}$ .

Trotz der vorgenannten Plausibilität ist dieses Verfahren thermodynamisch kritikwürdig, da es nur die Quantität, nicht aber die Qualität von Energien bewertet. Die bereits mehrfach genannten Vorteile der KWK resultieren aber aus der Arbeitsleistung, gekoppelt mit der Abgabe von Wärme. Maßstab für die Umwandelbarkeit der thermischen Energien stellt der 2. Hauptsatz der Thermodynamik dar. Demzufolge basieren physikalisch begründete Verfahren auf der Bewertung der Arbeitsfähigkeit der Energien – exergetische Bewertung – bzw. auf der Ermittlung des durch die Wärmeabgabe verursachten Stromverlustes.

### 2.3.2 Exergetische Aufteilung

Für die exergetische Bewertung besonders einfach ist die Ermittlung der Exergie der Wärme mit Hilfe der thermodynamischen Mitteltemperatur des Heiznetzes

$$T_{m,HN} = \frac{t_{V,m} - t_{R,m}}{\ln \frac{T_{V,m}}{T_{R,m}}} \quad (17)$$

mit  $t_{V,m}$ ,  $t_{R,m}$  den jahresmittleren Vor- bzw. Rücklauftemperaturen, woraus sich

$$E_{KWK,HN} = \left( 1 - \frac{T_{U,m}}{T_{m,HN}} \right) \cdot Q_{Ab,KWK} \quad (18)$$

ergibt (mit  $T_{U,m}$  der jahresmittleren Temperatur während der Heizperiode).

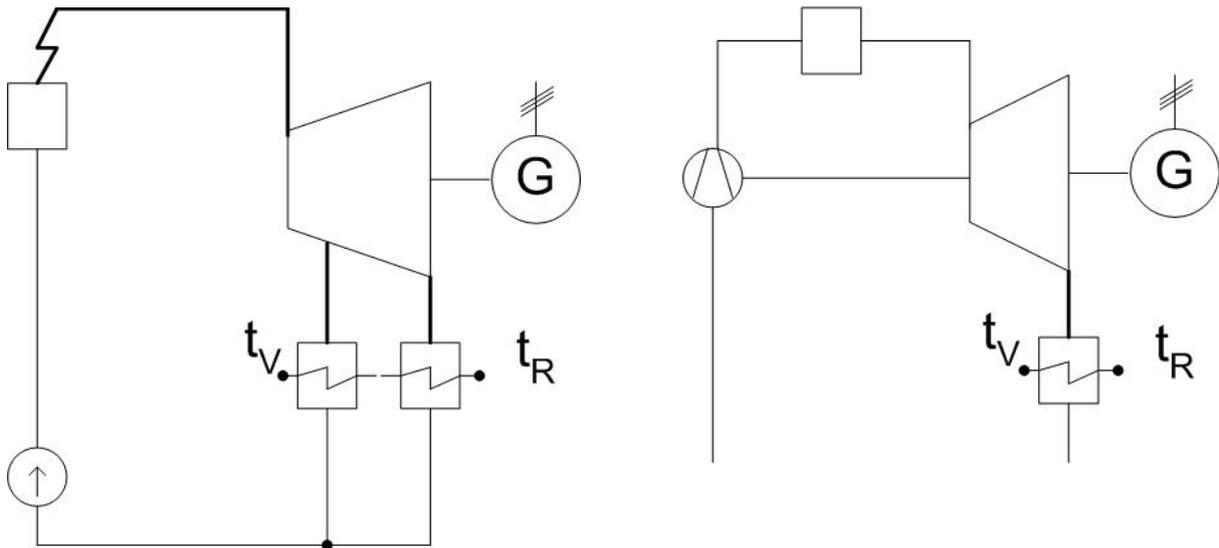
Nach [6] wurde  $t_{U,m} = 3,3 \text{ }^\circ\text{C}$  gesetzt.

Als Aufteilungsfaktoren ergeben sich damit

$$\alpha_{EL,ex,1} = \frac{A_{Bne,KWK}}{E_{KWK,HN} + A_{Bne,KWK}} \quad (19)$$

sowie  $\alpha_{WV,ex,1} = 1 - \alpha_{EL,ex,1}$ .

Dieses Verfahren ist relativ einfach auszuführen, da die benötigten Daten messtechnisch nachweisbar sind, jedoch thermodynamisch nicht ganz „sauber“, weil die Exergieverluste bei der Wärmeübertragung vom KWK-Prozess an das Heiznetz nicht der Wärme zugeordnet werden. Ein kleines Beispiel soll dies verdeutlichen. Für gleiche Heiznetzparameter (z.B.  $t_{V,m} = 110^\circ\text{C}$ ,  $t_{R,m} = 60^\circ\text{C}$ ) ist im linken Teil des Bildes die Wärmeübertragung z.B. aus einer Entnahme-Gegendruck-Turbine und im rechten Teil aus einer Gasturbine mit Abhitzekegel dargestellt.



**Bild 1 Entnahme-Gegendruck-Turbine und Gasturbine mit Abhitzekegel**

Unterstellt man minimale Grädigkeiten von 10 K, so erhält man bei einer Kraft-Wärme-Kopplung mit einer Dampfturbine der genannten Konstellation bei Annahme gleicher Heiznetztemperaturaufteilung für die prozessinterne thermodynamische Mitteltemperatur

$$T_{m,i} = 2/(1/T_E + 1/T_G) \quad (20)$$

bzw. mit den vorstehenden Annahmen  $T_{m,i} = 380 \text{ K}$ .

Für die thermodynamische Mitteltemperatur der GTA kann Gleichung (18)

$$T_{m,i} = (t'_{GT} - t''_{GT}) / \ln \frac{T'_{GT}}{T''_{GT}}$$

verwendet werden, woraus bei den getroffenen Annahmen  $T_{m,i} = 549$  K folgt. Gasmotorische HKW werden zwischen diesen Werten liegen, da sie die Wärme aus der Motorabwärme und der Abgasenthalpie „beziehen“. Für die thermodynamische Mitteltemperatur des Heiznetzes erhält man mit den hier unterstellten Annahmen  $T_{m,HN} = 357$  K.

Da es im praktischen Heizkraftbetrieb mit vertretbarem Aufwand ohnehin nicht möglich sein wird, prozessinterne Daten für eine jahresmittlere innere thermodynamische Mitteltemperatur bereitzustellen, sollte ein häufigkeitsbasierter konstanter Wert für alle Varianten für den „Umwandlungsgrad“ des Wärmeübertragers

$$\eta_U = T_{m,HN} / T_{m,i} \quad (21)$$

angenommen werden. Das ist absolut opportun, da weder die harmonisierten Referenz-Wirkungsgrade der EU-Richtlinie noch die Primärenergiefaktoren der DIN 4701-10 den jeweils konkreten Vergleichsfall einer speziellen KWK-Anlage repräsentieren.

Für das weitere Vorgehen wird der in [7] ermittelte Wert von  $\eta_U = 0,85$  empfohlen.

Eine größere Transparenz wäre jedoch möglich, wenn für alle genannten Anlagen sichere prozessinterne Daten verwendet werden könnten.

Mit Hilfe des o. g. Wertes für  $\eta_U$  erfolgte für alle Anlagen eine exergetische Aufteilung mit Hilfe der prozessinternen thermodynamischen Temperatur (Index 2).

### 2.3.3 Strombasierte Aufteilung

Das von Zschernig und Sander vorgeschlagene Verfahren [8] beruht auf der exergetischen Bewertung. Es berücksichtigt gegenüber dem exergetischen Modell den realen Wandlungsprozess.

Anlagen mit Stromverlust (Wasserdampf-Kondensation) können relativ einfach über den Stromverlust bei Heizwasserentnahme bewertet werden. Vor allem bei kleineren HKW, bei denen der Wärmeverluststrom nur schwer ermittelt werden kann, ist die mit einem realen Prozessgütegrad bewertete Arbeitsfähigkeit der Heizwärme als äquivalenter Stromverlust nutzbar.

Die betrachteten Anlagen sind außer HKW A jedoch durchgängig als Anlagen ohne Stromverlust einzuordnen, da die Elektroenergieerzeugung durch die Wärmeauskopplung nicht beeinträchtigt wird.

- Bei Gegendruck-Dampfprozessen steigt die Stromerzeugung mit der Wärmeauskopplung an.
- Bei Gasmotoren und Gasturbinen ist kein zusätzlicher Brennstoffbedarf bei Wärmeauskopplung erforderlich. Der Brennstoffeinsatz für die Stromerzeugung bleibt unverändert.

Im Extremfall kann daraus abgeleitet werden, dass die Heizwärme kostenlos abgegeben werden kann. Das erscheint nicht gerechtfertigt, da sich in ihr ebenfalls Brennstoffenergie widerspiegelt. Daher ist die Umrechnung der abgegebenen Heizwärme in einen äquivalenten Stromverlust zu empfehlen. Es ist also zu ermitteln, wie viel Strom aus der ausgekoppelten Heizwärme erzeugt werden könnte.

Dazu werden reale Annahmen zu Prozessgütegrad und Kondensationstemperatur getroffen. Es wird vorgeschlagen, Werte von  $v_{KP} = 0,85$  sowie  $\bar{\vartheta}_{ab} = \bar{\vartheta}_K = 30\text{ °C}$  zu verwenden. Damit ergibt sich der Stromverlust  $\Delta W_{SV}$  in Form einer elektrischen Arbeit zu

$$\Delta W_{SV} = Q_H \cdot \eta_C \cdot v_{KP} \quad \text{mit} \quad \eta_C = 1 - \frac{\bar{T}_K}{\bar{T}_H} \quad \text{und} \quad v_{KP} = \frac{\eta_{KP}}{\eta_C}. \quad (22)$$

Für alle Typen von KWK-Anlagen kann der Brennstoffaufwand demzufolge nach Ermittlung des Stromverlustes in der einfachen Form

$$Q_{Br,Strom} = \frac{W - \Delta W_{SV}}{W} \cdot Q_{Br} \quad (23)$$

und

$$Q_{Br,Wärme} = \frac{\Delta W_{SV}}{W} \cdot Q_{Br} \quad (24)$$

mit  $W = W_{el} + \Delta W_{SV}$

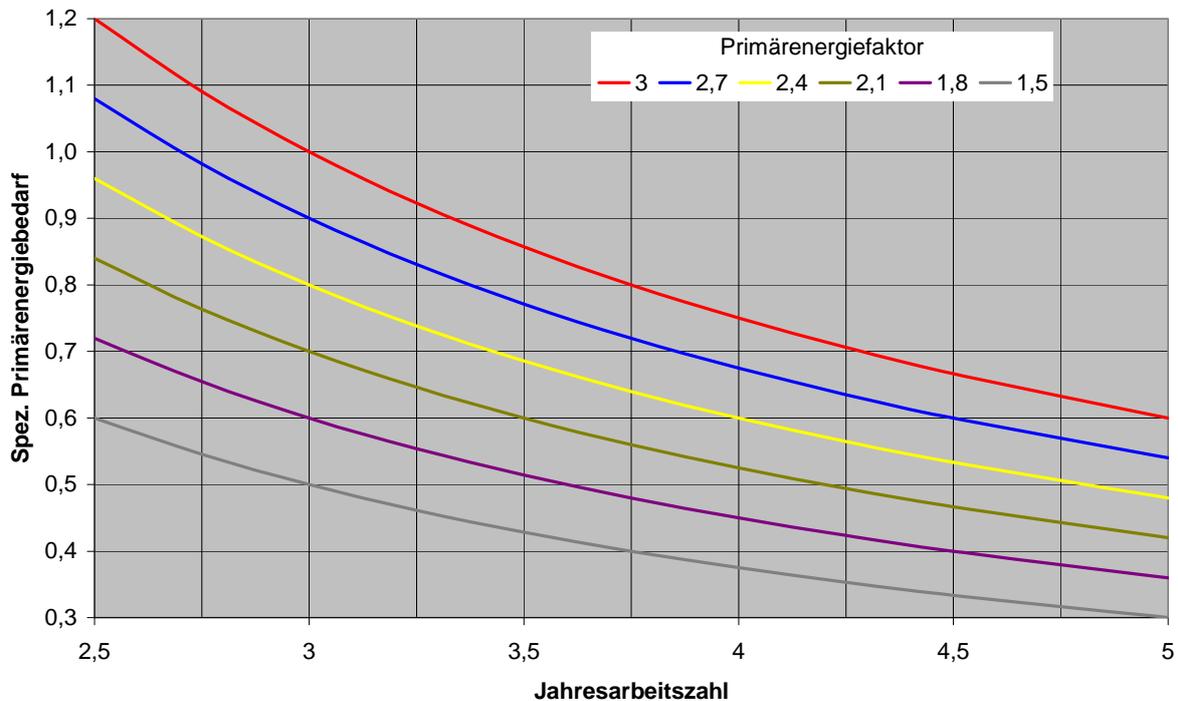
auf Strom und Heizwärme aufgeteilt und die Emissionen zugeordnet werden.

Durch die Verwendung realer Annahmen für das Potenzial der Elektroenergieerzeugung aus der Heizwärme wird der Wärme ein etwas geringerer Brennstoffanteil als beim exergetischen Verfahren zugewiesen.

Die Genauigkeit kann bei Kenntnis der Prozessdaten verbessert werden, wenn als Potenzial zur Elektroenergieerzeugung nicht die Heizwärme, sondern z. B. der verwendete Heizdampf genutzt wird (siehe auch 2.3.2). Die Ergebnisse sind dann vergleichbar mit dem exergetischen Verfahren mit Bewertung der Heizwärme, da dort ein Umwandlungswirkungsgrad für die Übertragung der Wärme aus dem KWK-Prozess an das Heiznetz in gleicher Höhe wie der Gütegrad im strombasierten Verfahren angesetzt wurde. Ein Unterschied besteht in der Wahl des unteren Temperaturniveaus (Umgebungs- bzw. Kondensationstemperatur).

### 3 Primärenergiebedarf für Heizwärme einer Wärmepumpe

Der Primärenergiebedarf einer Wärmepumpe ist von der konkreten Anlage abhängig und kann durch die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und den Primärenergiefaktor für die benötigte Elektroenergie ermittelt werden. In Bild 2 sind diese Abhängigkeiten an Hand des auf die Heizwärme bezogenen Primärenergieaufwands dargestellt.



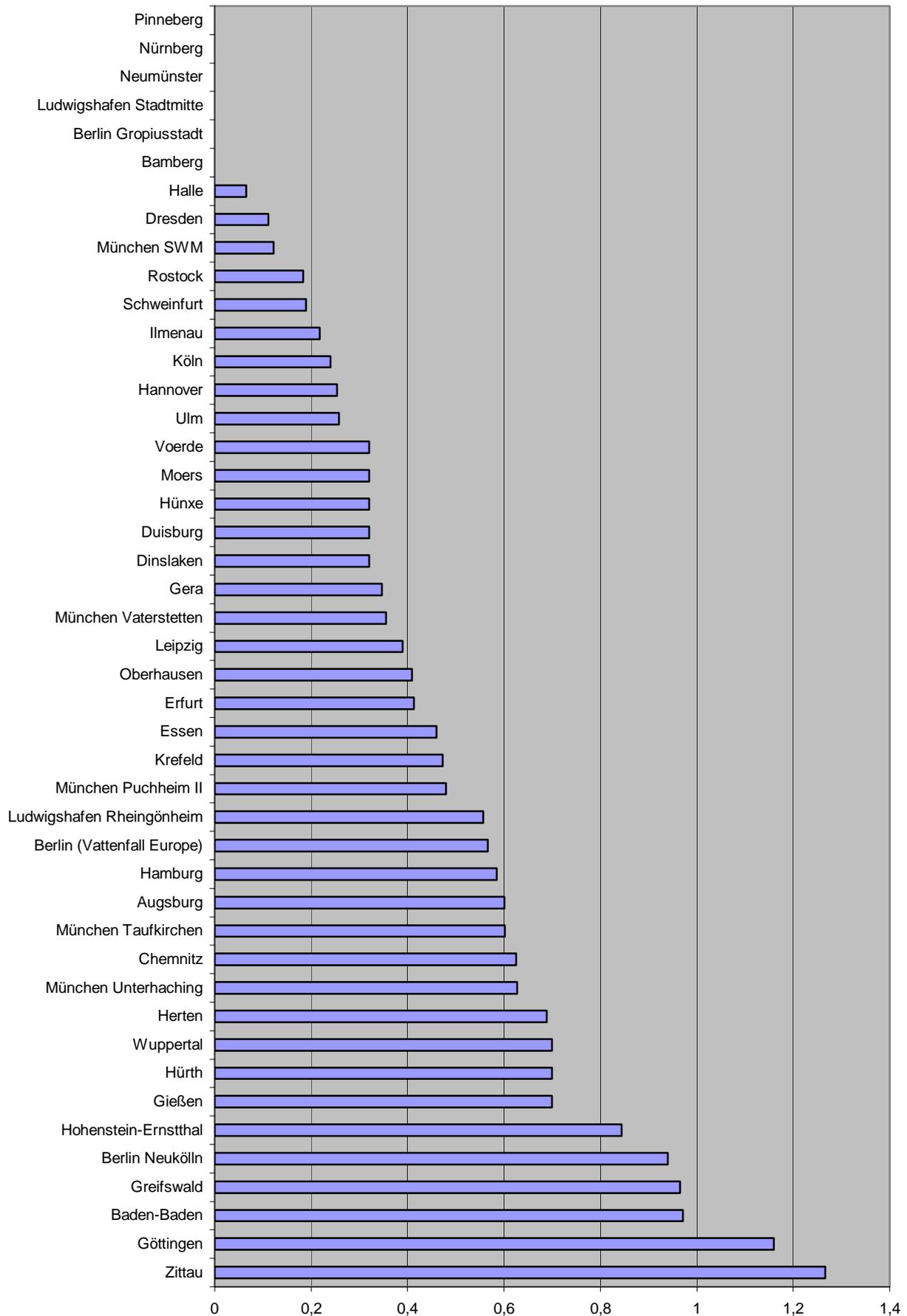
**Bild 2 Spezifischer Primärenergiebedarf der Heizwärme einer Wärmepumpe**

Ein Feldtest zur Wärmepumpenanwendung für Heizung und Warmwasserbereitung für das Rhein-Gebiet gibt einen Durchschnittswert der Jahresarbeitszahl von 3,38 für Anlagen mit Erdsonden und Fußbodenheizung an. Der höchste erreichte Wert beträgt 4,20 für eine Wärmepumpe mit Brunnenwassernutzung.

Die von deutschen Fernwärmesystemen erreichten Primärenergiefaktoren für die Heizwärme liegen im Mittel bei ca. 0,69. Bild 3 zeigt die durch die AGFW veröffentlichten Daten ausgewählter Netze (Stand 02.10.2008). Es ist ersichtlich, dass das Dresdner Fernheiznetz mit einem Primärenergiefaktor von 0,111 für die Heizwärme einen der besten Werte verzeichnet.

Der Primärenergieverbrauch für eine Kompressionswärmepumpe liegt auch bei vergleichsweise guten Jahresarbeitszahlen deutlich darüber. Als Anhaltspunkte für die Primärenergiefaktoren zur Elektroenergiebereitstellung können die in Tabelle 1 genannten Werte dienen.

Soll der Primärenergiefaktor der Wärme vom HKW A durch eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 4,0 erreicht werden, so muss die von ihr verbrauchte Elektroenergie mit einem Primärenergiefaktor von 0,444 bereitgestellt werden. Dem gegenüber wäre bei Stromversorgung entsprechend dem deutschen Kraftwerksmix eine Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe von 24,3 erforderlich.



**Bild 3 Primärenergiefaktoren der Heizwärme für ausgewählte Fernwärmesysteme**

**Tabelle 1 Primärenergiefaktoren für die Stromerzeugung**

Primärenergiefaktor Strom	Beschreibung
2,70	Deutschland-Mix Stromerzeugung
2,20	Harmonisierter Vergleichswirkungsgrad EU für HKW Nossener Brücke
1,77	HKW Nossener Brücke nach Brennstoffaufteilung gemäß EU-Vergleichswirkungsgraden für getrennte Erzeugung
1,50	Deutschland-Mix bei 50 % Strom aus regenerativen Energiequellen

Zum Vergleich soll beispielhaft von einer Versorgung der Wärmepumpe mit Strom aus dem Heizkraftwerk A ausgegangen werden. Der anzurechnende Primärenergieaufwand für Strom aus der Kraft-Wärme-Kopplung ist wieder abhängig vom angewendeten Verfahren zur Aufteilung auf die Produkte Strom und Wärme. Für das HKW A werden die in Tabelle 2 aufgeführten Werte erreicht. Dabei wurde für den Primärenergiefaktor der von der Wärmepumpe gelieferten Heizwärme ein außerordentlich hoher Wert von 4,0 für die Jahresarbeitszahl zu Grunde gelegt.

**Tabelle 2 Primärenergiefaktoren für Elektroenergie und Heizwärme**

Aufteilungsverfahren	Primärenergiefaktor Strom	Primärenergiefaktor Wärme
Kalorische Aufteilung	1,368	0,342
Exergetische Aufteilung (Heiznetz)	2,238	0,560
Exergetische Aufteilung (HKW)	2,043	0,511
Strombasierte Aufteilung	2,426	0,607
Aufteilung nach Vergleichswirkungsgraden für getrennte Erzeugung (EU)	1,771	0,443

Es wird deutlich, dass selbst bei Anwendung des physikalisch nicht gerechtfertigten Wertes aus dem kalorischen Verfahren, der noch geringer ist als in der Vision eines Strommixes mit einem Anteil regenerativer Energien von 50 %, der resultierende Primärenergieaufwand für die Heizwärme aus der Versorgung mit Wärmepumpe von einer ganzen Reihe von Fernwärmenetzen zum Teil deutlich unterschritten wird.

Hinzu kommt, dass die Senkung des Wärmebedarfs die Bedingungen für die Anwendung der Kraft-Wärme-Kopplung verschlechtern und damit den spezifischen Primärenergieaufwand im Fernheiznetz erhöhen.

## 4 Zusammenfassung

Für die Aufteilung des Brennstoffverbrauchs von KWK-Anlagen auf die Produkte Elektroenergie und Wärme existieren verschiedene Verfahren, die thermodynamisch mehr oder weniger begründet sind. Sie stellen den Ausgangspunkt für eine Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Produkte dar.

Aus thermodynamischer Sicht ist die exergetische Aufteilung mit prozessinternen Temperaturen bzw. das strombasierte Verfahren zu präferieren. Da alle Verfahren wie vorstehend dargestellt seriös sind, obliegt es dem Anwender, eine Entscheidung zu treffen.

Die Bereitstellung von Heizwärme aus Wärmepumpen erfordert oft einen deutlich höheren Primärenergieeinsatz als Heizwärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung. Werden sie im Fernwärmegebiet eingesetzt, verdrängen sie zudem Strom aus der Kraft-Wärme-Kopplung und führen damit zu einer Verschlechterung des Primärenergiefaktors.

## Literatur

- [1] Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11.02.2004 über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt.  
Amtsblatt der Europäischen Union 21.02.2004 (L 52/50)
- [2] Entscheidung der Kommission vom 21.12.2006 zur Festlegung harmonisierter Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme in Anwendung der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.  
Amtsblatt der Europäischen Union 06.02.2007 (L32/183)
- [3] DIN 4701-10
- [4] Dittmann, L.; Robbi, St.: Fernwärmeausbau versus Dämmung auf Passivhausstandard. Primärenergetischer Widerspruch?  
Euroheat & Power, Jg. 37 (2008), Nr. 7/8, S. 26-31
- [5] Pauer, W.; Munser, H.: Einführung in die Kraft- und Wärmewirtschaft.  
Steinkopff-Verlag 1971
- [6] [www.netzwerk-energieberater.de/wiki/Gradtagszahlfaktor](http://www.netzwerk-energieberater.de/wiki/Gradtagszahlfaktor)
- [7] Dittmann, A.: Braucht die KWK die Exergie?  
Vortrag zum 12. Dresdner Fernwärmekolloquium 2007
- [8] Zschernig, J.; Sander, T.: „KWK-Strom“ - Was ist das?  
Euroheat & Power, Jg. 36 (2007), Nr. 6, S. 26-36

## Anlage 1: Berechnungstabellen

**Tabelle 3** Berechnung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen

	Anteil	Brennstoff- nutzungsgrad	Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen	
	%		Brennstoff	Strom
		%	kg CO <sub>2</sub> /MWh <sub>BS</sub>	kg CO <sub>2</sub> /MWh <sub>EL</sub>
Erdgas	11,4	45	202	448,9
Steinkohle	21,6	41	335	817,1
Braunkohle	24,8	39	400	1025,6
Öl	1,9	42	266	633,3
Kernenergie	26,3	35	0	0,0
Wind, Wasser	8,7			
Sonstige	5,3			
	100,0			

**Brennstoffmix** 199,6 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sub>BS</sub>

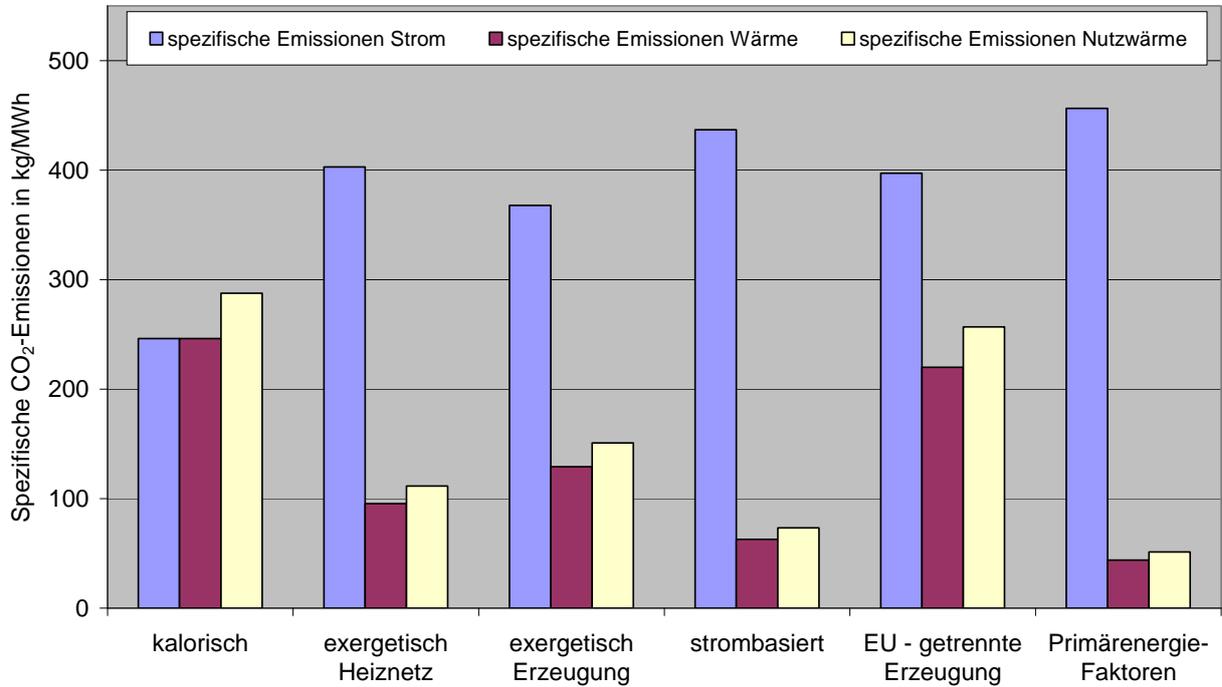
**Strommix** 539,0 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sub>EL</sub>

**Primärenergiefaktor Strom** 2,7

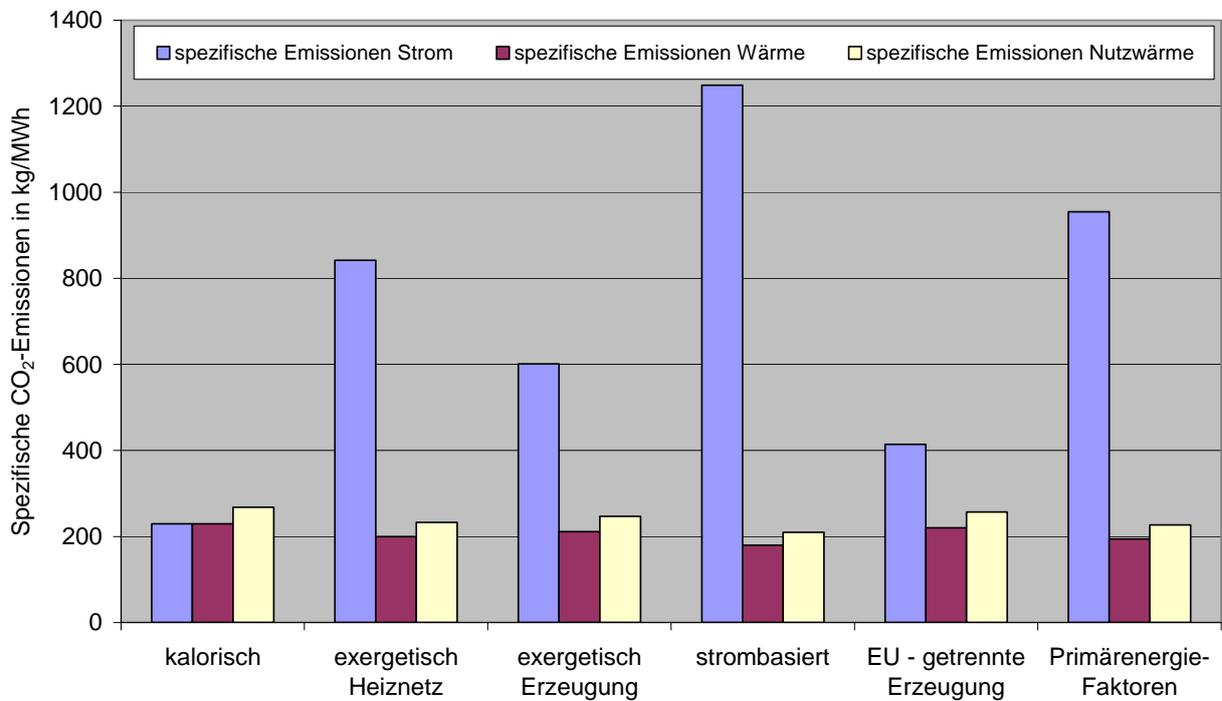
Quelle: Umweltbundesamt

## Anlage 2: Grafiken zur Emissionsaufteilung

Blatt 1



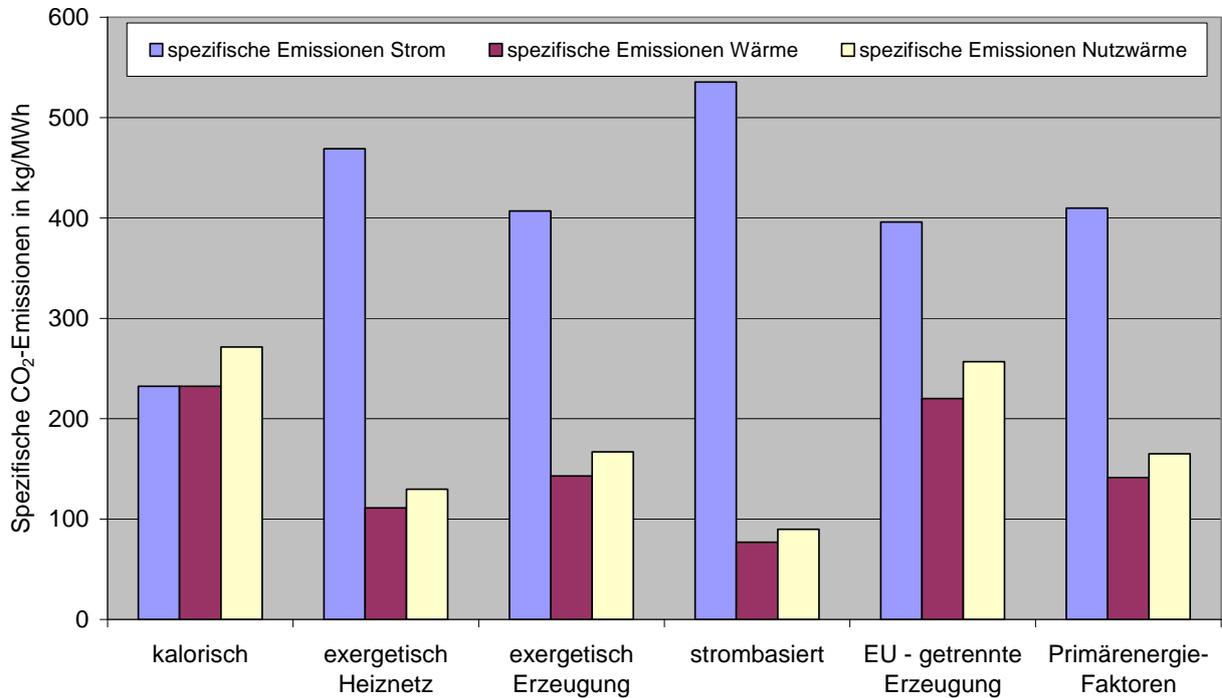
**Bild 4 Ergebnisse der Emissionsaufteilung: HKW A**



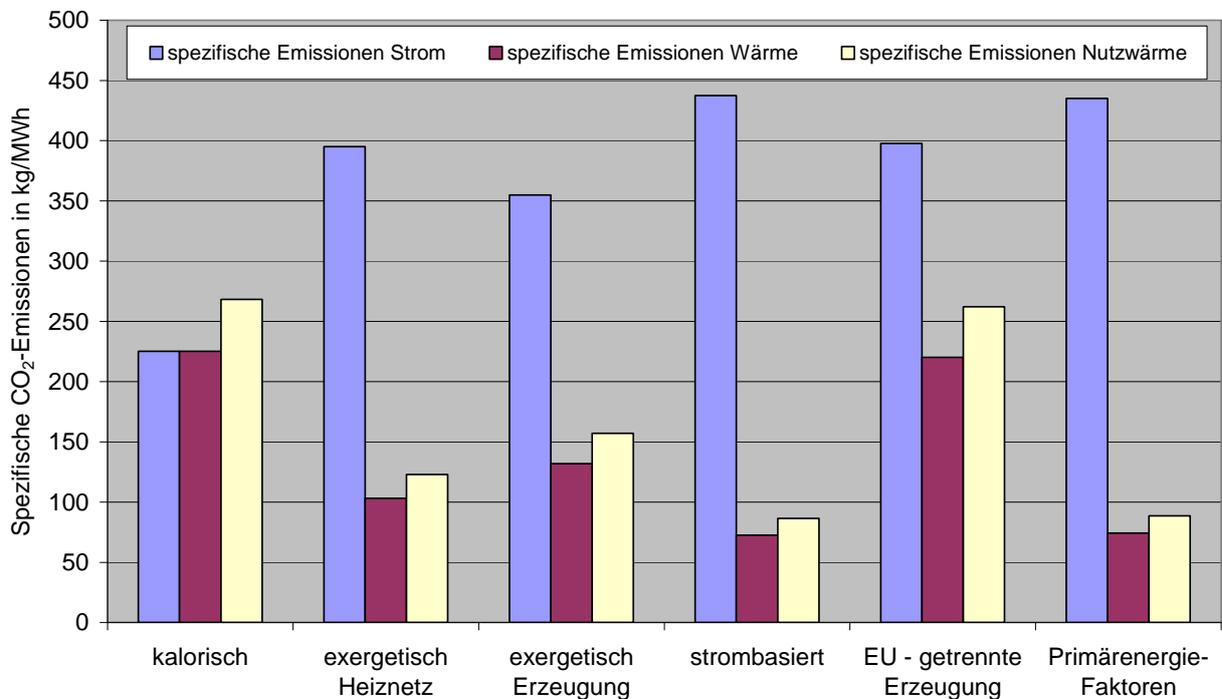
**Bild 5 Ergebnisse der Emissionsaufteilung: HKW B**

## Anlage 2: Grafiken zur Emissionsaufteilung

Blatt 2



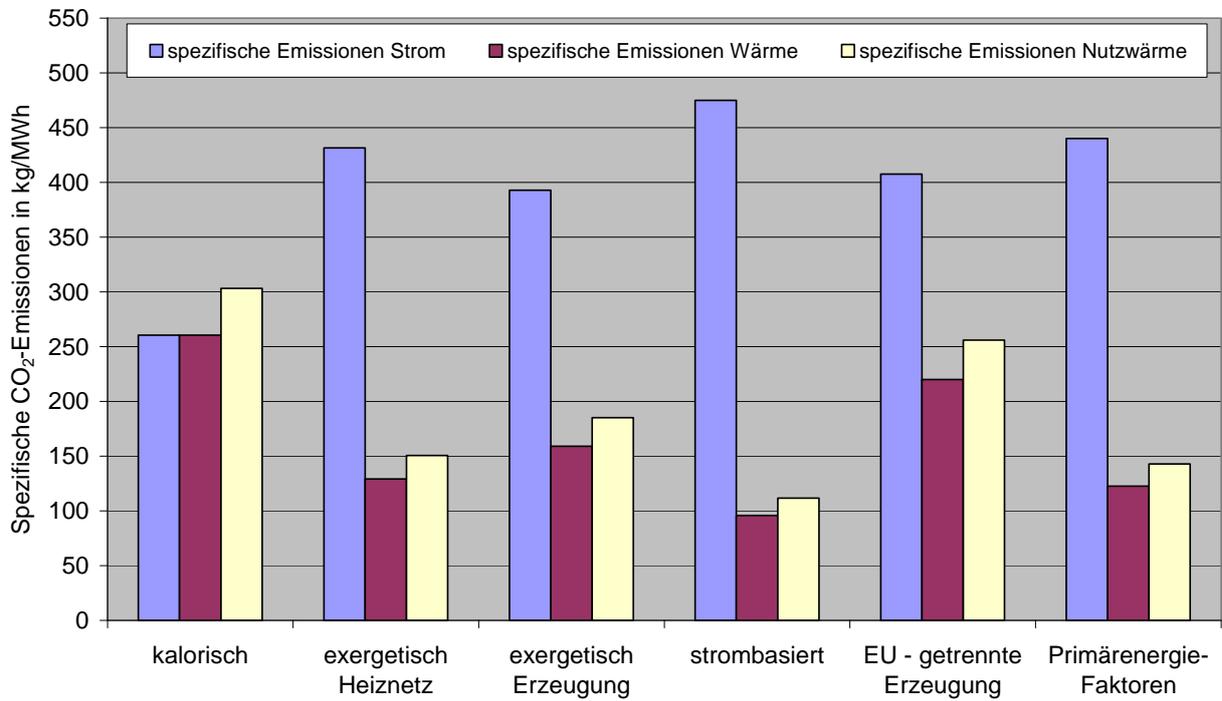
**Bild 6 Ergebnisse der Emissionsaufteilung: HKW C**



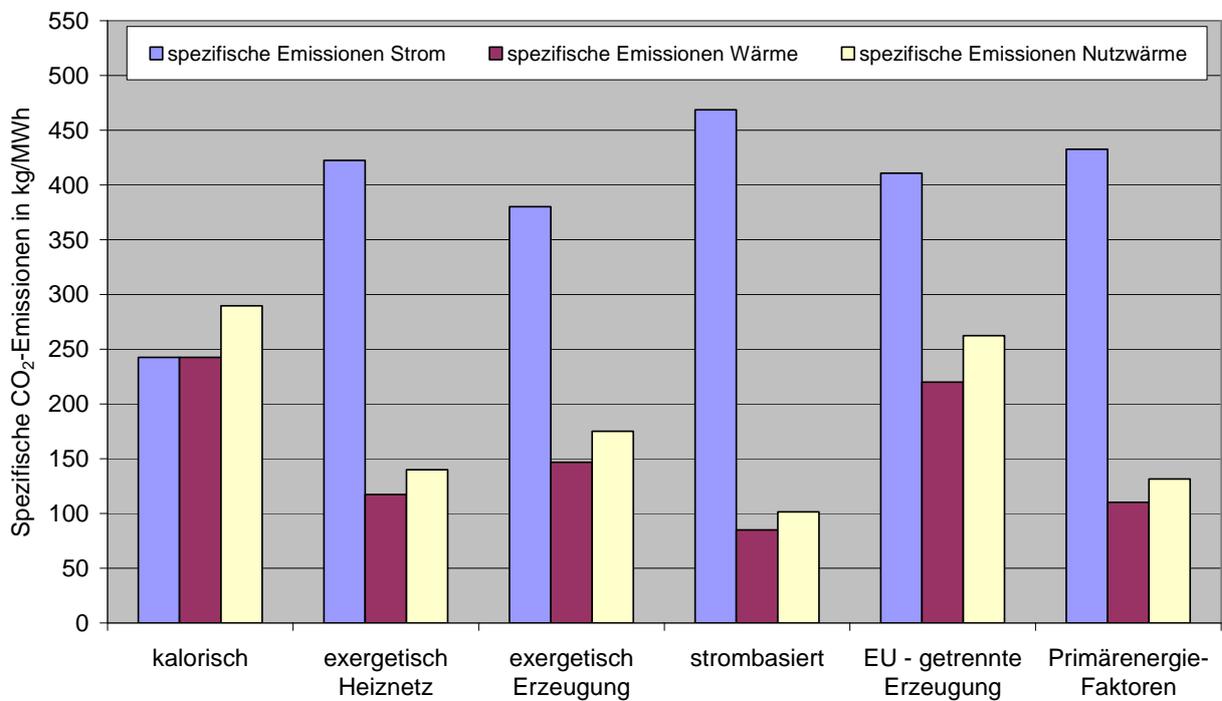
**Bild 7 Ergebnisse der Emissionsaufteilung: HKW D**

## Anlage 2: Grafiken zur Emissionsaufteilung

Blatt 3



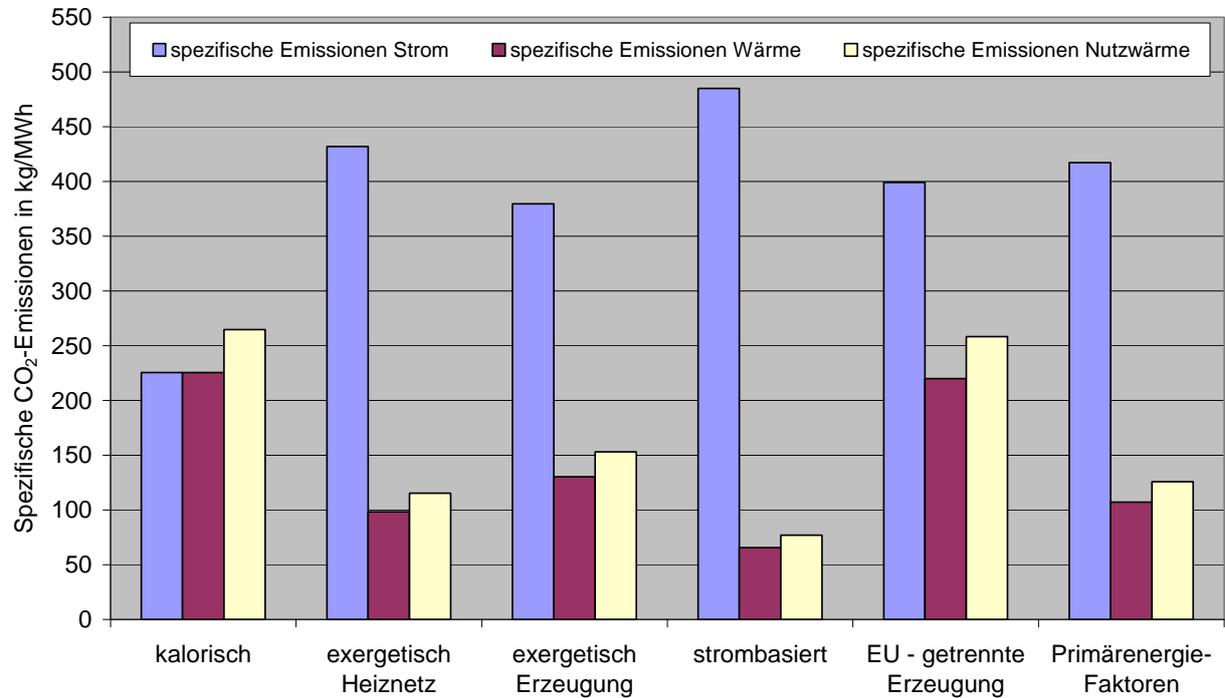
**Bild 8 Ergebnisse der Emissionsaufteilung: BHKW E**



**Bild 9 Ergebnisse der Emissionsaufteilung: BHKW F**

## Anlage 2: Grafiken zur Emissionsaufteilung

Blatt 4



**Bild 10 Ergebnisse der Emissionsaufteilung: BHKW G**