

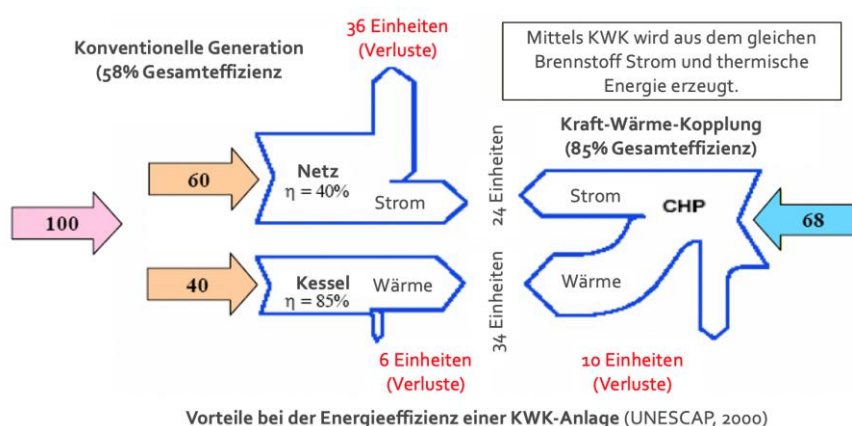
Berechnung der Treibhausgas (THG)-Emissionen in KWK-Systemen und Empfehlungen

1 Motivation

Die verschiedenen Methoden zur Allokation (Aufteilung) von THG-Emissionen ¹auf die Strom- und Wärmeseite wurden für die Umsetzung von Energierichtlinien mit unterschiedlichen Zielsetzungen und Hintergründen etabliert. Sie wurden entwickelt um die Planung von Energiesystemen, die Entscheidungsfindung sowie die Entwicklung von entsprechenden Richtlinien sowohl auf Regierungs-, als auch auf der regionalen sowie der industriellen Ebene zu unterstützen. Die Zuweisung von THG-Emissionen zu den energetischen Outputs von KWK-Systemen ist insbesondere bei einer Nutzung durch verschiedene Verbraucher sowie bei einem Vergleich mit anderen Möglichkeiten der Heizversorgung notwendig.

Blockheizkraftwerke produzieren Strom und Wärme. Hierbei kann Wärme und Strom aus fossilen Brennstoffen mit einer Effizienz von mehr als 95% produziert werden. Bei getrennter Erzeugung könnten Strom und Wärme aus fossilen Brennstoffen mit einer Effizienz von bis zu 45% (Stromproduktion) bzw. 85% (Wärmeproduktion) produziert werden. Dies wirft die folgende Frage auf:

Wie sollte die Aufteilung / Zuweisung der THG- Emissionen zu Strom und Wärme sein, wenn in KWK-Prozessen gleichzeitig Strom und Wärme produziert wird?



¹ Treibhausgasemissionen oder CO₂-Äquivalente beinhalten alle klimawirksamen Gase: Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) oder Distickoxide oder Lachgas (N₂O)

2 Beurteilung der Treibhausgasemissionen (THG)

Es gibt drei Standardgleichungen, welche die THG-Emissionen für jede Art von Brennstoffen beschreiben:

(1) Treibhausgasemissionen = Brennstoff * Emissionsfaktor (EF) 1

Treibhausgasemissionen = Menge des emittierten CO₂, CH₄ oder N₂O,

Brennstoff = Menge oder Volumen des verbrannten Brennstoffes,

EF1 = CO₂, CH₄ oder N₂O **Emissionsfaktor** je Masse- oder Volumeneinheit

(2) Treibhausgasemissionen = Brennstoff * Brennwert * Emissionsfaktor (EF) 2

Brennstoff = Menge oder Volumen des verbrannten Brennstoffes,

Brennwert = Wärmegehalt des Brennstoffes (Brennwert), in Einheiten von Energie je Brennstoffmasse oder -volumen;

EF2 = CO₂, CH₄, oder N₂O **Emissionsfaktor** je Energieeinheit

(3) Treibhausgasemissionen = Brennstoff * Kohlenstoffgehalt * 44/12

Brennstoff = Menge oder Volumen des verbrannten Brennstoffes,

Kohlenstoffgehalt = Der Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes in Einheiten von Masse an Kohlenstoff je Brennstoffmasse oder -volumen, 44/12 = Verhältnis der molekularen Masse von CO₂ und Kohlenstoff

2.1 Primärenergie (PE)

Unter Primärenergie versteht man die ursprünglich enthaltene Energie von erneuerbaren oder nicht-erneuerbaren Energiequellen, welche noch keinen Umwandlungen oder Transformationen durchlaufen haben. Werden die Primärenergieträger genutzt, wird die enthaltene Energie durch die Nutzung (z.B. Verbrennung) umgewandelt in ein gewünschtes Produkt. Dem Endnutzer steht sie dann als Endenergie (bspw. in Form von Strom oder Wärme) zur Verfügung. In der Differenz der enthaltenen Energie des Primärenergieträgers zur Endenergie zeigen sich die Energieverbräuche durch die vorgelagerten Aktivitäten und Prozesse in der Lieferkette (d.h. Entnahme, Transport und Aufbereitung des Brennstoffes, etc.). Diese vorgelagerten Prozesse werden auch als Vorkette bezeichnet.

2.2 Primärenergiefaktor (PEF)

Der Primärenergiefaktor verbindet die Primär- und die Endenergie und zeigt damit, wie viel Primärenergie zur Erzeugung einer Einheit Strom oder nutzbarer Wärmeenergie benötigt wird.

Primärenergie * Systemeffizienz = Endenergie

Primärenergiefaktor = Primärenergie/Endenergie

3 Methoden zur Zuweisung von CO₂-Emissionen

Die folgenden in der EU am weitesten verbreiteten Methoden wurden im Rahmen des LowTEMP-Projektes untersucht: **Energiemethode, Alternative Erzeugungsmethode, Bonusstrom-Methode, Exergiemethode, 200%-Methode, Pas 2050-Methode, Dresdener-Methode.**

In der Literatur werden weitere Methoden genannt: Arbeitsmethode, Finnische Methode, Zuweisung aller Ersparnisse zum Strom, Zuweisung aller Ersparnisse zur Wärme, 50/50-Aufteilung der Ersparnisse zwischen Strom und Wärme, Primärenergiegehalt von Wärme und Strom.

3.1 Energiemethode

Energiemethode – der Brennstoffverbrauch und die daraus resultierenden THG-Emissionen werden je nach Energiegehalt der Produkte: erzeugte Wärme und erzeugter Stroms zugewiesen. Dies bringt den Vorteil der Einfachheit und Transparenz. Jedoch wird hierbei hinsichtlich des Energiegehaltes (d.h. der energetischen Qualität) nicht zwischen den erzeugten Produkten unterschieden. Zur Verdeutlichung: Strom kann leichter zu Wärme umgewandelt werden als andersherum. **Der THG-Zuweisungsfaktor berechnet sich wie folgt:**

$$f_Q = Q / (Q + E) \cdot 1^2$$

3.2 Alternative Erzeugungsmethode

Die **Alternative Erzeugungsmethode**, auch bekannt als Effizienzmethode oder Benefit Sharing Method (Vorteils-Teilungs-Methode) wurde von der finnischen Fernwärmevereinigung entwickelt. Die Methode weist der Wärme- und Stromerzeugung proportional zum Kraftstoffverbrauch bei der Erzeugung in anderen Kraftwerken die THG-Emissionen und Ressourcen zu. Die alternative Erzeugung in zwei verschiedenen Kraftwerken hängt von deren jeweiligen Effizienzen $\eta_{\text{Wärme}}$ and η_{elek} ab.

$$f_Q = (Q/\eta_{\text{alt_Wärme}}) / (Q/\eta_{\text{alt_Wärme}} + E/\eta_{\text{alt_elek}})$$

² Die verwendeten Formelzeichen sind die englischen Formelbezeichnungen.

3.3 Gutschriften-Methode

Die **Gutschriften-Methode** wird häufig zur Zuweisung von THG-Emissionen zwischen der Wärme- und Stromerzeugung in der EU verwendet. „Bei den Gutschriftenmethoden geht man davon aus, dass zuerst einem der Produkte als „Hauptprodukt“ alle Umweltlasten zugerechnet wird und das gekoppelt erzeugte Produkt die gleiche Erzeugungsmenge in eine bestehenden oder alternativ zu bauenden Anlage ersetzt. Die dabei vermiedenen Emissionen durch „Nichterzeugung“ werden von den Gesamtemissionen des HKW abgezogen und die verbleibende Emissionsmenge wird dem Hauptprodukt zugeordnet.“³

$$f_Q = (E_{P,in} - W_{KWK} f_{P,elt}) / (Q_{del} + E_{del})$$

3.4 Exergiemethode

Die **Exergiemethode** (physikalisch korrekte Methode) – Brennstoffverbrauch bzw. die THG-Emissionen werden der produzierten Wärme bzw. dem produzierten Strom je nach Exergiegehalt des erzeugten Produktes zugewiesen. Der Exergiegehalt eines Produktes beschreibt die maximale Arbeit, die das Produkt verrichten kann. Das Verhältnis zwischen dem Energie- und dem Exergiegehalt wird als Qualitätsfaktor bezeichnet.

Aus einer thermodynamischen Perspektive wird der bei der KWK erzeugte Strom mit einem Exerriefaktor von 1 eingestuft, sodass die Exergie von Strom durch $Ex_E = E$ definiert wird. Das heißt, dass 100% des Stroms in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Wärme hingegen kann nur teilweise in andere Energieformen umgewandelt werden, sodass die Exergie von Wärme wie folgt berechnet wird:

$$Ex_Q = (1 - T_o/T) Q$$

wobei T_o die durchschnittliche Raumtemperatur während der Heizphase und T den thermodynamischen Mittelwert der Temperatur beschreibt: $T = (T_s - T_r) / \ln(T_s/T_r)$

$$f_Q = Ex_Q / (Ex_Q + Ex_E)$$

3.5 200%-Methode

Die **200%-Methode** basiert auf der Annahme, dass die Effizienz bei der Wärmeproduktion bei 200% liegt. Demnach werden für die Produktion einer Einheit Wärme 0,5 Einheiten Brennstoff benötigt. Die andere halbe Einheit Brennstoff wird vom Turbinenkondensator zurückgewonnen. Die Hälfte der bei

³ Umweltbundesamt, Bestimmung spezifischer Treibhausgas-Emissionsfaktoren für Fernwärme, S. 7 Online verfügbar unter: [Emissionsfaktoren für Fernwärme - Umweltbundesamt](https://www.umweltbundesamt.de/medien/long)
[https://www.umweltbundesamt.de > medien > long](https://www.umweltbundesamt.de/medien/long) [zuletzt geprüft am 17.11.21]

der Wärmeproduktion anfallenden Emissionen können also auf die Energiegewinnung bezogen werden. Diese von der dänischen Energieagentur entwickelte Methode kann genutzt werden, um die Brennstoffkosten der KWK der Wärmeproduktion in den Energie- und Emissionsstatistiken zuzuordnen.

$$f_Q = Q / 2 \text{ Brennstoff}_{in}$$

3.6 Pas 2050-Methode

Die **PAS 2050-Methode** ist der britische Standard für die Berechnung von Treibhausgasemissionen der Produktion von Gütern oder Dienstleistungen. Die Emissionen werden hierbei vom KWK-System auf die produzierte Wärme und den Elektrizität übertragen, wobei ein spezieller Intensitätskoeffizient „n“ verwendet wird. „n“ beschreibt die bei der Brennstoffverbrennung anfallenden Emissionen.

$$f_Q = Q / (Q + n E)$$

Die Zuweisung der Emissionen zu Wärme und Elektrizität beruht auf dem prozessspezifischen Verhältnis von Wärme und Strom im jeweiligen KWK-System. Der Koeffizient n von kesselbasierten KWK-Systemen (Kohle, Holz, feste Brennstoffe) liegt bei 2,5, bei turbinengetriebenen KWK-Systemen (Erdgas, Deponiegas) gilt $n = 2,0$.

3.7 Dresdener-Methode

Die **Dresdener-Methode** basiert auf der Beurteilung der Exergie. In Kraftwerken ist die gesamte Primärenergie auf die Stromproduktion bezogen. Gleichzeitig wird in KWK-Kraftwerken ein Teil der Primärenergie für die Produktion thermischer Energie verbraucht. Die Dresdener-Methode beschreibt, wie der durch die Entnahme von Wärme (Kondensation von Wasserdampf) im KWK-Kraftwerk verursachte Stromverlust bewertet wird. Es gilt $\Delta E = Q \eta_c v_p$, wobei η_c den Carnot-Wirkungsgrad und v_p den Grad der Prozessqualität beschreibt.

$$f_Q = \Delta E / E$$

Zusammenfassend ergeben sich folgende Zuweisungsfaktore für KWK-Systeme mit einer jährlichen Heizlast von 27 GWh und einem maximalen Wärmebedarf von 14 MW. Es ergeben sich erheblich andere Werte.

Methode	Zuweisungsfaktor der Wärmeproduktion, f_{Ω}	Beispielhafter f_{Ω} -Wert
Energiemethode	$Q / (Q + E)$	0,2162
Alternative Erzeugungsmethode	$(Q/\eta_{alt_heat}) / (Q/\eta_{alt_heat} + E/\eta_{alt_elec})$	0,3830
Bonusstrommethode	$(E_{P,in} - W_{CHP} f_{P,elt}) / (Q_{del} + E_{del})$	0,2226
Exergiemethode	$EX_Q / (EX_Q + EX_E)$	0,1507
200%-Methode	$Q / 2 Fuel_{in}$	0,0608
PAS 2050-Methode	$Q / (Q + n E)$	0,1212
Dresden-Methode	$\Delta E / E$	0,0834

4 Zusammenfassung

Die LowTEMP-Projektpartner haben die Zuweisungsmethoden durch Durchführung einer Multi-Kriterien-Analyse bewertet.

Tabelle 4.2: Punktestand nach der Multikriterienanalyse

Methode	AGFW	ZERBAU	BTU	RTU	IMP PAN	Thermopolis	HEM	SUM	Rang	Varianz
Energiemethode	52.000	52.000	49.857	52.286	53.143	59.143	53.143	371.57	5	5.0%
Alternative Erzeugungsmethode	43.286	53.286	46.429	52.714	45.857	36.429	40.571	318.57	7	12.5%
Bonusstrommethode	48.286	48.286	41.286	52.143	55.429	44.571	39.857	329.86	6	11.1%
Exergiemethode	71.000	71.000	70.714	60.714	60.571	59.429	57.000	450.43	1	9.0%
200%-Methode	60.286	56.857	59.143	56.143	53.143	44.571	66.000	396.14	3	10.9%
PAS 2050-Methode	57.571	57.000	59.429	63.857	57.286	44.571	58.571	398.29	2	9.6%
Dresden-Methode	63.857	63.857	45.714	60.143	46.286	44.571	50.429	374.86	4	15.1%
	15.5%	12.4%	17.9%	7.7%	9.5%	16.5%	16.9%			

- Mit einem Punktestand von mehr als 450 Punkten wurde unter den berücksichtigten Methoden die **Exergiemethode (Carnotmethode)** von den Projektbeteiligten als die beste verfügbare Methode betrachtet. Zwei weitere Methoden (**PAS 2050** und **200%**) sollten als mögliche Alternativen angesehen werden – sie erreichten mit rund 400 Punkten einen ähnlichen Punktestand.
- Die angemessenste Methode – **die Exergiemethode** – beinhaltet tiefgehend die Energiequalität und zeigt ein physikalisches Höchstmaß für die Zuweisung von THG zu Wärme als ein Nebenprodukt. Die **Dresdener-Methode** ist eine Variation der Exergiemethode, benötigt jedoch mehr Daten und umfangreichere Kalkulationen.
- Die **Alternative Erzeugungsmethode** und **Gutschriften-Methode** wurden im Rahmen der Projektpartnerschaft als die am wenigsten geeigneten Methoden erachtet.