

# Untersuchung der Anwendbarkeit von Stromgutschrift- und Carnotmethode zur Fahrplanerstellung von KWK-Anlagen

**Simon Decher \***

M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Competence Center für  
Erneuerbare Energien und Energieeffizienz (CC4E)  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg  
Email: simon.decher@haw-hamburg.de

**Kirsten Esdohr**

M.Sc., wissenschaftliche Hilfskraft  
CC4E  
HAW Hamburg

**Hans Schaefers**

Prof. Dr.-Ing., stellv. Leiter  
CC4E  
HAW Hamburg

*Es wird gezeigt, dass eine Fahrplanerstellung mit Hilfe von Stromgutschriftmethode und Carnotmethode möglich ist. Dazu wird die Stromgutschriftmethode mit stündlich aufgelösten Zeitreihen der ENTSO-E erweitert. Die Carnotmethode wird angewendet, indem mit ihrer Hilfe eine charakteristische Kennzahl für die KWK Anlage berechnet wird. Beide Methoden liefern bei gegebenen Betriebszeitalternativen denjenigen Zeitraum mit dem höchsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungspotential. Es wird gezeigt, dass die Anwendung der Methoden mit keinen größeren Hürden verbunden ist, da sowohl die Methoden gut bekannt als auch die Datengrundlagen frei verfügbar sind.*

## Nomenklatur

BHKW Blockheizkraftwerk  
CM Carnotmethode  
GEG Gebäudeenergiegesetz  
KWK Kraft-Wärme Kopplung  
PE Primärenergie  
PEF Primärenergiefaktor  
SGM Stromgutschriftmethode

## 1 Einleitung

In einem zunehmend von volatilen Erzeugungskapazitäten geprägten Energiesystem spielt die Planung der Erzeugungsleistung eine zentrale Rolle. Während der Transformation zu einem CO<sub>2</sub>-neutralen Energie-

system müssen erdgasbefeuerte Bestandsanlagen einbezogen werden können. Dazu ist es notwendig beurteilen zu können, zu welchen Zeitpunkten der Einsatz dieser Bestandsanlagen aus System Sicht CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert. Die Stromgutschriftmethode (SGM) trifft diese Aussage im derzeitigen Verfahren pauschal für ein ganzes Jahr, sodass die Betriebsweise lediglich ex-post bewertet werden kann. Im Folgenden wird das Standardverfahren der SGM um zeitpunktabhängige Auswertungen ergänzt und sowohl auf den Verdrängungsmix als auch den Strommix bezogen. Als weitere Methode zur Bewertung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Anlagen wird die Carnotmethode (CM) angewendet. Die Ergebnisse werden anschließend gegenübergestellt. In einem ersten Schritt wird die retrospektive, pauschale Jahresbewertung der SGM einer zeitlich aufgelösten Jahreshistorie gegenübergestellt. Anhand von viertelstündlich aufgelösten historischen Erzeugungsdaten lassen sich die Emissionsfaktoren vom Verdrängungs- und Strommix in jeder Viertelstunde bestimmen. Parallel dazu wird die Jahresbewertung anhand der Carnotmethode ebenfalls in viertelstündlicher Auflösung durchgeführt. In einem weiteren Schritt werden Prognosedaten verwendet, um einen CO<sub>2</sub>-optimierten Fahrplan für KWK-Anlagen erstellen zu können. Die ENTSO-E stellt stündlich aufgelöste Day-Ahead Daten ab 18 Uhr am Vortag zur Verfügung. Auf Basis dieser Daten werden für einen Beispieltag zwei Betriebszeitpunkte bewertet und geprüft, ob die Ergebnisse einen CO<sub>2</sub>-optimierten Betrieb darstellen.

---

\*korrespondierender Autor

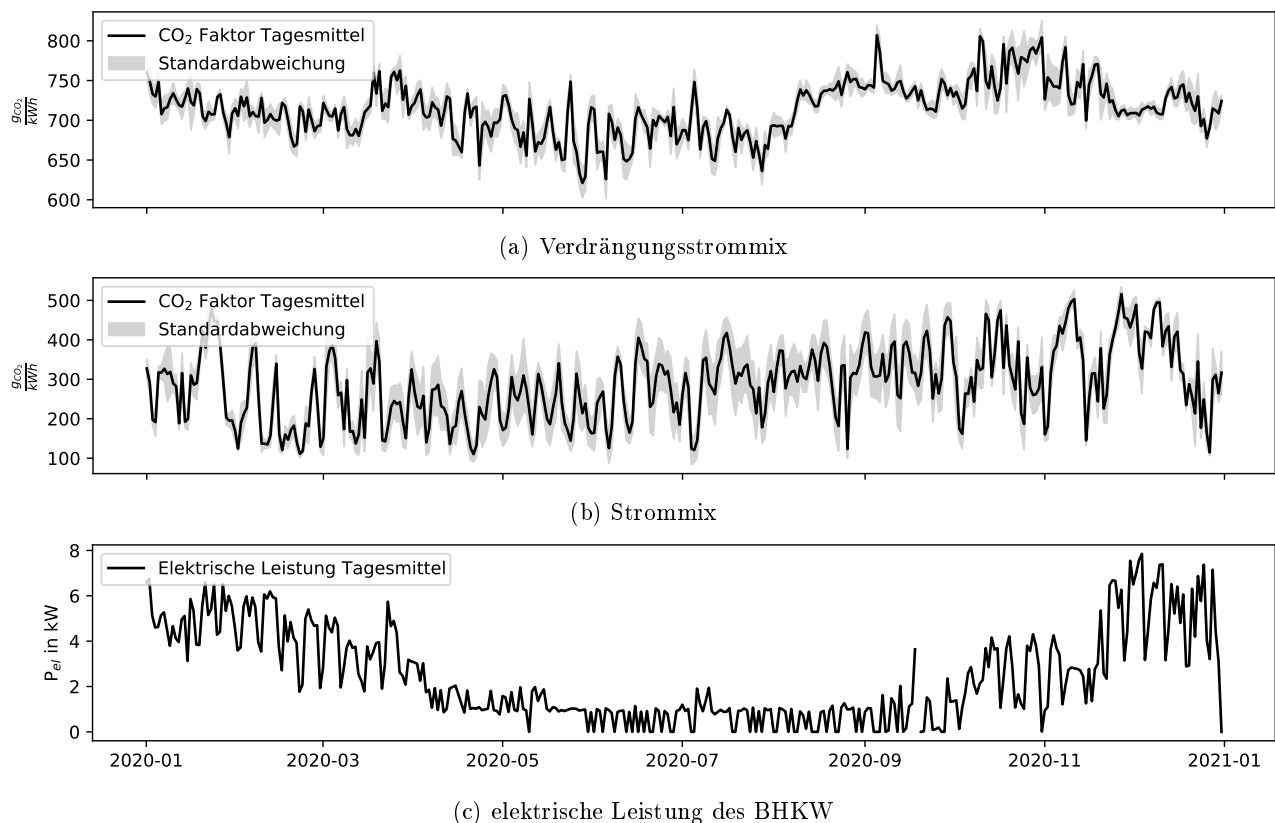


Abbildung 1: Tagesmittelwerte und Standardabweichung im jeweiligen Mix sowie BHKW Leistung

## 2 Grundlagen

### 2.1 Die Datengrundlage

Der Auswertung liegen die Betriebszeiten des Blockheizkraftwerks (BHKW) am Technologiezentrum Energiecampus Bergedorf in Hamburg zu Grunde. Die elektrische Nennleistung beträgt 16 kW. Im Betrachtungszeitraum erreichte das BHKW 1.344 Volllaststunden. Da das BHKW auf Spitzenlast ausgelegt ist, ist die niedrige Anzahl Volllaststunden gegenüber vergleichbaren Bestandsanlagen mit mehr als 5.000 Volllaststunden plausibel. Im Betrachtungszeitraum hat das BHKW 21.504 kWh Strom und 51.580 kWh Wärme produziert. Dafür hat es 73.361 kWh<sub>HI</sub> Endenergie (Erdgas, bezogen auf den Heizwert) aufgewendet, was 80.697 kWh Primärenergieaufwand und 14.819 kg<sub>CO<sub>2</sub></sub> verursacht hat.

Da die Emissionen und die aufgewendete Primärenergie (PE) sowohl durch die Wärme- also auch Stromproduktion verursacht wurden, können diese Werte nicht pauschal mit anderen Wärme- oder Stromerzeugern verglichen werden. Mithilfe von Bewertungsmethoden kann ermittelt werden, welchen Nutzen KWK-Anlagen gegenüber reinen Wärme- und Stromerzeugern erbracht haben (Stromgutschriftmethode) oder ermöglichen erst den Vergleich mit diesen (Carnot-Methode). Im Falle der Stromgutschriftmethode geschieht die Anwendung der Methoden regulär mit festgelegten Standardwerten. Neben diesen Standardwerten für den PE- und CO<sub>2</sub>-Faktor werden im Folgenden Faktoren ver-

wendet, die anhand historischer Daten ermittelt werden. Diese Daten stammen vom Verband der europäischen Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E) [1], [2]. Die Faktoren werden aus dem gesamten Strommix und dem Verdrängungsmix berechnet. Der Verdrängungsmix beinhaltet ausschließlich fossile Erzeuger. Die Energieträger, die dem Verdrängungsmix zugeordnet werden, sind: [3], [4]

- Braunkohle ( $381 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{kWh}}$ )
- Steinkohle ( $337 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{kWh}}$ )
- Erdgas ( $202 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{kWh}}$ )
- Öl ( $280 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{kWh}}$ )

Der Verdrängungsmix wird als Teilmenge des Strommixes behandelt. Aus den Faktoren des Verdrängungsmixes können keine Rückschlüsse auf den Anteil am Gesamtstrommix gezogen werden. Ob der Verdrängungsmix einen kleinen oder großen Anteil am Strommix hat, wird in der Berechnung der Faktoren nicht berücksichtigt.

In Abbildung 1 sind die Verläufe des Verdrängungsmixes (Abb. 1a) und des Strommixes (Abb. 1b) dargestellt, um den qualitativen Verlauf der Faktoren über den Betrachtungszeitraum zu veranschaulichen. Für eine bessere Übersicht sind nur Tagesmittelwerte und die zugehörige Standardabweichung dargestellt. Die Faktoren werden mit den ungemittelten Daten berechnet. Zusätzlich ermöglicht die Darstellung des Verlaufs der elek-

trischen Leistung des BHKW (Abb. 1c) die Veranschaulichung der zeitlichen Überlagerung der Verläufe. In der Abbildung wird der Wert der Nennleistung von 16 kW nicht erreicht, was bedeutet, dass das BHKW an keinem Tag ununterbrochen lief.

## 2.2 Die Stromgutschriftmethode

Die Stromgutschriftmethode ist das Standardbewertungsverfahren zur Bestimmung von CO<sub>2</sub>- und Primärenergiefaktoren bei KWK. Bei dieser Methode werden die durch das eine Koppelprodukt verdrängten CO<sub>2</sub>-Emissionen dem anderen Koppelprodukt gutgeschrieben. Die durch eine KWK produzierte Strommenge wird folglich anhand des dadurch verdrängten Netzstroms in eine CO<sub>2</sub>-Menge umgerechnet. Diese CO<sub>2</sub>-Menge wird anschließend mit den durch KWK verursachten Emissionen verrechnet. Bezogen auf die produzierte Wärmemenge entspricht die Differenz dann den CO<sub>2</sub>-Emissionen pro produzierte Wärmemenge. Die Faktoren zur Bestimmung der von der KWK-Anlage verursachten Emissionen werden anhand des (End-)Energieträgers berechnet. Die berechneten Faktoren beziehen sich dann nicht mehr auf die Endenergie, sondern auf die produzierte Wärmeenergie. [5]

In diesem Fall handelt es sich um ein gasbefeuertes BHKW. Entsprechend ist der Primärenergiefaktor (PEF) = 1,1 und der CO<sub>2</sub>-Faktor =  $202 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$ , beide bezogen auf die Endenergie. Die Faktoren für den verdrängten Strom sind PEF = 2,80  $\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}}$  und CO<sub>2</sub>-Faktor =  $624,00 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  [3], [6]. Aus diesen Werten sowie dem Endenergiebedarf, Strom- und Wärmeproduktion lassen sich der Primärenergie- und Emissionsfaktor pro Kilowattstunde Wärmeenergie berechnen.

Infolge der Gutschrift können bilanztechnisch negative oder sehr niedrige PEF für die Erzeugung von Wärmeenergie der KWK resultieren. Negative PEF können dabei die missverständliche Botschaft suggerieren, dass CO<sub>2</sub> aus dem Kreislauf entnommen wurde. Um dem entgegen zu wirken ist in dem seit November 2020 geltenden Gebäudeenergiegesetz eine Deckelung der errechneten PEF zur Produktion von KWK-Wärme gemäß der SGM bei 0,3 festgelegt [7].

## 2.3 Die Carnotmethode

Die Carnotmethode ist ein exergiebasiertes Allokationsverfahren, das sowohl die Quantität als auch die Qualität der Wärme- und Stromerzeugung physikalisch berücksichtigt. Im Gegensatz zur SGM erfolgt die Bewertung der energetischen Koppelprodukte Wärme und Strom nicht über die Abgrenzung eines Referenzsystems und somit ohne Erteilung einer Gutschrift. Stattdessen wird die Ermittlung von PEF und CO<sub>2</sub>-Faktoren auf Grundlage der exergetischen Wertigkeit beider Koppelprodukte vorgenommen. [8]

Anders als bei der SGM werden innerhalb der CM keine standardisierten Werte für die PEF und CO<sub>2</sub>-Faktoren vorgegeben. Anstelle dessen werden Allokationsfaktoren berechnet, die neben der exergetischen Wertigkeit von Strom und Wärme die entsprechenden Nutzungsgrade berücksichtigen. Die Allokationsfaktoren fungieren dabei als Aufteilungsschlüssel zur Bestimmung von PEF sowie CO<sub>2</sub>-Faktor des jeweiligen Koppelproduktes. Aus dem Produkt des entsprechenden Allokationsfaktors und dem gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoß der KWK-Anlage ergeben sich die Emissionen der Wärme- und Stromerzeugung. Die Summe der anteiligen CO<sub>2</sub>-Emissionen ist dabei gleich dem gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoß der KWK-Anlage. [8]

Im Gegensatz zur SGM führt die Anwendung der CM ausschließlich zu positiven Emissionsfaktoren der Wärme- und Stromproduktion [9]. Die aus der KWK-Erzeugung bewertete Wärme mittels der CM liefert im Vergleich zur SGM systematisch höhere PEF sowie CO<sub>2</sub>-Faktoren. Das in November 2020 in Kraft getretene Gebäudeenergiegesetz (GEG) sieht dabei eine Prüfung der möglichen Umstellung der derzeitigen KWK-Bewertung durch die SGM auf die CM ab 2030 vor, welche durch die höheren resultierenden PEF zu Anreizen hinsichtlich der effizienten Energienutzung im Gebäudesektor führt. [7, §22(5) GEG]

Im Gegensatz zur SGM führt die Anwendung der CM ausschließlich zu positiven Emissionsfaktoren der Wärme- und Stromproduktion [9]. Die aus der KWK-Erzeugung bewertete Wärme mittels der CM liefert im Vergleich zur SGM systematisch höhere PEF sowie CO<sub>2</sub>-Faktoren. Das in November 2020 in Kraft getretene Gebäudeenergiegesetz (GEG) sieht dabei eine Prüfung der möglichen Umstellung der derzeitigen KWK-Bewertung durch die SGM auf die CM ab 2030 vor, welche durch die höheren resultierenden PEF zu Anreizen hinsichtlich der effizienten Energienutzung im Gebäudesektor führt. [7, §22(5) GEG]

## 2.4 Vorgehen

Zunächst erfolgt die Auswertung für das Jahr 2020 nach SGM und CM. Die SGM wird dabei um weitere Bezugsgrößen ergänzt und anschließend werden die Ergebnisse verglichen. Dies ist notwendig, da die Standardvariante der SGM zur Fahrplanerstellung nicht geeignet ist. Ein Grund hierfür liegt darin, dass lediglich jährliche Betrachtungen durchgeführt werden, was zur Erstellung eines Fahrplans für die nächsten 24 Stunden ungeeignet ist. Entsprechend wird die CM zur Gegenüberstellung mit der SGM ebenfalls anhand von Jahresmitteln sowie mit höherer zeitlicher Auflösung berechnet. Im Anschluss daran erfolgt die hypothetische Fahrplanerstellung anhand von ENTSO-E Day-Ahead Daten sowie der Vergleich der jeweiligen Aussagen. Da die Day-Ahead Daten der ENTSO-E stündlich aufgelöst und nicht nach Erzeugern aufgeteilt sind, kann lediglich ein stündlich aufgelöster Fahrplan auf Basis des Strommixes erstellt werden. Als Datenbasis dienen dann historische Profile des Strom- und des Verdrängungsmixes in viertelstündlicher Auflösung sowie historische Day-Ahead Prognosen in stündlicher Auflösung. Diese Daten sind bei der ENTSO-E frei verfügbar. [1], [2]

Es werden zwei mögliche Fahrpläne erstellt, die im Folgenden als Szenario 1 und Szenario 2 bezeichnet werden. Dabei handelt es sich um fiktive Zeiträume mit identischer Dauer und Leistung des BHKW-Betriebs. Lediglich die Tageszeit variiert, sodass die Bewertung anhand der Methoden eines der beiden Szenarien als systemdienlicher als das andere einschätzen kann. Es wird dabei davon ausgegangen, dass die KWK-Anlage über Flexibilität bei der Wahl der Erzeugungszeiträume verfügt. Diese Flexibilität wird als bekannt angenom-

men. Die Folgenden Untersuchungen zeigen eine mögliche Nutzung der Flexibilität auf.

### 3 Ergebnisse

Tabelle 1: Varianten zur Faktorberechnung nach Stromgutschriftmethode für 2020

Mix	Variante	Referenz		SGM	
		PEF	$\frac{g_{CO_2}}{kWh_{el}}$	PEF	$\frac{g_{CO_2}}{kWh_{th}}$
Strom	Mittelw.	1,56	287,43	0,92	167,46
	dyn.			0,91	160,84
Verdräng.	Mittelw.	2,18	721,81	0,65	-13,63
	Standard	2,80	624,00	0,40	27,15
	dyn.			0,65	-14,09

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse verschiedener Varianten der SGM dargestellt. In den mit „Referenz“ überschriebenen Spalten sind die Faktoren aufgetragen, die dem verdrängten Strom zugeschrieben werden und damit das Referenzsystem für die SGM bilden. Die Spalten unter „SGM“ beinhalten die Ergebnisse des jeweiligen wärmebezogenen Faktors auf Basis des Referenzsystems. Die Varianten unterscheiden sich in den Faktoren, die zur Bestimmung der Eigenschaften des verdrängten Stroms verwendet werden. Die Faktoren wurden entweder für den gesamten Strommix oder den Verdrängungsmix bestimmt. Für jeden Mix ist der Mittelwert von PEF und Emissionsfaktor im Betrachtungszeitraum bestimmt. Zusätzlich sind die Faktoren dynamisch bestimmt worden, also für jeden Zeitschritt in den Zeiträumen, in denen das BHKW produzierte. Da in der dynamischen Betrachtung jeder Zeitschritt einzeln bewertet wird, existiert dort kein einzelner charakteristischer Werte für das Referenzsystem. Ein Zeitschritt umfasst einen Zeitraum von 15 Minuten. Zum Vergleich sind außerdem die Standardwerte, mit denen die SGM regulär angewendet wird, dargestellt.

Im Jahr 2020 beträgt der PEF  $0,40 \frac{kWh}{kWh_{th}}$  und CO<sub>2</sub>-Faktor  $27,15 \frac{g_{CO_2}}{kWh_{th}}$ . Die Aussage dieses Faktors ist, dass die verursachten Emissionen bezogen auf das Energiesystem nicht  $202 g_{CO_2}$  je Kilowattstunde Endenergie (i.e. Erdgas), sondern  $27,15 \frac{g_{CO_2}}{kWh_{th}}$  also je Kilowattstunde produzierte Wärme betragen.

Wie zu erwarten, sind die Ergebnisfaktoren auf Basis des Verdrängungsmixes deutlich kleiner als beim Strommix. Per Definition sind im Verdrängungsmix ausschließlich emissionsintensive Erzeugungstechnologien enthalten. Entsprechend hoch ist die Gutschrift,

wenn dieser Strom verdrängt wird. Negative Werte bedeuten, dass aus Sicht des Gesamtsystems mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen verdrängt wurden, als durch die Produktion durch die KWK-Anlage verursacht wurden.

Der Unterschied zwischen Jahresmittelwerten und dynamischer Auswertung beträgt im Strommix beim wärmebezogenen CO<sub>2</sub>-Faktor rund 4%. Im Verdrängungsmix ist der dynamisch berechnete CO<sub>2</sub>-Faktor noch um rund 3% kleiner.

Unter der Annahme, dass ein Heizkessel mit einem Wirkungsgrad von 100% bezogen auf den Heizwert statt der KWK-Anlage eingesetzt wird, würde dieser je produzierter Kilowattstunde Wärme  $202 g_{CO_2}$  emittieren und einen PEF von 1,1 aufweisen. Die Aussage der SGM ist dann in jeder Variante gleich: Die Wärmebereitstellung durch KWK verursacht (aus Sicht des Systems) weniger Emissionen als würde statt der KWK-Anlage eine Gasbrennwerttherme Wärme und ein Kraftwerk des Verdrängungsmixes den Strom erzeugen. Lediglich die Höhe der „Einsparung“ variiert je nach Referenzfaktoren.

Tabelle 2: Varianten zur Faktorberechnung gemäß der Carnot-Methode für 2020

Variante	Strom		Wärme	
	PEF	$\frac{g_{CO_2}}{kWh_{el}}$	PEF	$\frac{g_{CO_2}}{kWh_{th}}$
Mittelwert	1,60	293,39	0,90	165,05
dynamisch	1,46	268,97	0,95	174,35
charakteristisch	1,43	263,21	0,97	177,53

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der KWK-Anlagenbewertung gemäß der CM dargestellt. Die Ergebnisse beruhen wie zuvor bei der Untersuchung entsprechend der SGM auf zwei verschiedenen Herangehensweisen, der Anwendung der CM anhand von Mittelwerten zum einen und zum anderen mittels der dynamischen Bestimmung der Faktoren. Die dynamische Bestimmung erfolgte dabei unter Berücksichtigung von zeitlich aufgelösten Betriebszustandsdaten der KWK-Anlage, die den Berechnungen der CM zugrunde liegen.

Es wurden die jeweiligen Faktoren berechnet, die der Strom- sowie der Wärmeseite zugeschrieben werden. Im Gegensatz zur SGM spielen weder der Strommix, noch der Verdrängungsstrommix eine Rolle als Bezugssystem, woraus sich die in Tabelle 2 dargestellte Spaltenaufteilung ergibt.

Aufgrund der eindeutigen Zuteilung von PE-Einsatz und emittierten CO<sub>2</sub>-Mengen im Rahmen der CM, verfügt die Anwendung dieser über das Potential den direkten Vergleich mit reinen Wärme- und Stromerzeugern

vorzunehmen.

Die statische Betrachtung der KWK-Anlage, d.h. die Berechnung der Faktoren anhand von Mittelwerten, liefert für das Jahr 2020 einen PEF von  $1,60 \frac{\text{kWh}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$  und CO<sub>2</sub>-Faktor von  $293,39 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}}$  bezogen auf die Stromerzeugung der KWK-Anlage. Der Wärmeerzeugung wird ein PEF von  $0,90 \frac{\text{kWh}}{\text{kWh}_{\text{th}}}$  und ein CO<sub>2</sub>-Faktor in Höhe von  $165,05 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{th}}}$  zugeschrieben.

Die errechneten Faktoren der dynamischen Betrachtung liegen stromseitig knapp unter denen der statischen Betrachtung. Der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor liegt bei  $268,97 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}}$  und der PEF bei  $1,46 \frac{\text{kWh}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$ . Im Gegenzug wird der Wärmeerzeugung innerhalb der dynamischen Betrachtung ein CO<sub>2</sub>-Faktor von  $174,35 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{th}}}$  und PEF von  $0,95 \frac{\text{kWh}}{\text{kWh}_{\text{th}}}$  zugeschrieben.

Generell gilt für beide Berechnungsvarianten, dass die wärmebezogenen PEF sowie CO<sub>2</sub>-Faktoren im Vergleich zu den strombezogenen Faktoren niedriger ausfallen. Der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor bezogen auf die Wärmeerzeugung der KWK-Anlage liegt dabei in Abhängigkeit der Berechnungsvariante um ca. 44 % beziehungsweise 35 % niedriger im Gegensatz zum CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor, welcher der Stromproduktion zugeschrieben wird.

Allgemein führt die dynamische Auswertung der CM zu geringeren PEF und CO<sub>2</sub>-Faktoren hinsichtlich der Stromproduktion der KWK-Anlage. Gleichzeitig resultieren entsprechend höhere wärmebezogene Faktoren.

Auch hier resultiert die Gegenüberstellung der KWK-Anlage mit einem Heizkessel in der Erkenntnis, dass die KWK-Anlage wärmeseitig geringere Emissionen ausstößt und damit zu bevorzugen ist. Abhängig von der Berechnungsvariante fallen die eingesparten Emissionen entsprechend unterschiedlich aus.

Zusätzlich wurden als dritte Herangehensweise in Tabelle 2 charakteristische Faktoren für den PE-Bedarf sowie CO<sub>2</sub>-Emissionen ermittelt. Dies wird ermöglicht aufgrund der Tatsache, dass die CM auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruht. Vor- und Rücklauftemperaturen sind durch die Anlage vorgegeben und verhalten sich für jeden Lastgang charakteristisch. Gleichzeitig wird die KWK-Anlage stets auf Volllast betrieben, sodass das Verhältnis zwischen thermischer und elektrischer Leistung unverändert bleibt. Vor diesem Hintergrund ist es möglich die Komplexität der CM zu reduzieren, indem charakteristische Faktoren für PEF und CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet und angenommen werden.

Hierzu wurde ein spezifischer Lastgang der KWK-Anlage isoliert betrachtet, anhand dessen die charakteristischen Faktoren berechnet wurden. Hinsichtlich der Stromerzeugung der KWK-Anlage wurde ein PEF von  $1,43 \frac{\text{kWh}}{\text{kWh}_{\text{el}}}$  und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von  $263,21 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}}$  ermittelt. Wärmeseitig wurde ein PEF von  $0,97 \frac{\text{kWh}}{\text{kWh}_{\text{th}}}$  und CO<sub>2</sub>-Faktor von  $177,53 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{th}}}$  errechnet.

In Abbildung 2 ist die relative Häufigkeitsverteilung der Abweichungen des charakteristischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors von den zeitlich aufgelösten Emis-

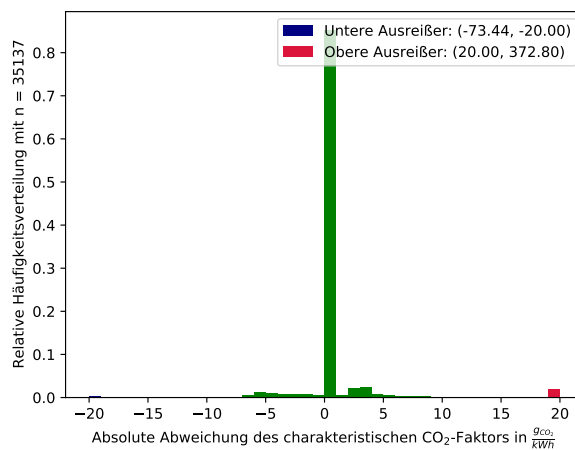


Abbildung 2: Absolute Abweichung des charakteristischen CO<sub>2</sub>-Faktors

sionsfaktoren aus dem Jahr 2020 in  $\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  visualisiert. Die Häufigkeit n bezieht sich dabei auf die Anzahl ermittelter Abweichungen für jede Viertelstunde der zeitlich aufgelösten Betrachtung des Jahres 2020.

Unter der Annahme, dass das BHKW während des Betriebs eine konstante CO<sub>2</sub>-Emissionsmenge von  $263,21 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}_{\text{el}}}$  freisetzt, sind lediglich geringe Abweichungen zu den dynamisch berechneten CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren feststellbar. Die Abweichungen liegen dabei überwiegend im Rahmen von  $1 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$ . Gleichzeitig können einzelne Ausreißer beobachtet werden, die außerhalb einer Abweichung von  $\pm 20 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  liegen. Diese können Extremwerte von bis zu  $-74,44 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  beziehungsweise  $372,80 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  betragen und lassen sich dadurch begründen, dass sich beim An- und Abfahren der Anlage das Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Leistung kurzfristig ändert, was sich in Emissionsspitzen der zeitlich aufgelösten Berechnung widerspiegelt.

Da sich die Abweichungen in einem vernachlässigbar kleinen Rahmen befinden, ist es sinnvoll die Vereinfachung der CM vorzunehmen und den charakteristischen Faktor bezüglich der durch die KWK freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen anzunehmen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei einem BHKW mit häufigen Lastwechseln die Abweichungen zunehmen.

### 3.1 Fahrplan nach SGM

Prognostizierte Erzeugungsdaten ermöglichen das Erstellen von Fahrplänen anhand von Emissionseinsparungen zu. Die ENTSO-E stellt stündlich aufgelöste Day-Ahead Daten ab 18 Uhr am Vortag zur Verfügung, die jedoch keine Aufteilung nach Erzeugern enthalten. Eine Berechnung des Verdrängungsmixes ist auf Basis dieser Daten damit nicht möglich. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der in Abbildung 3 visualisierten Szenarien und zugrunde gelegten Emissionsverläufen dargestellt. Die Zeitreihe „Day-Ahead Strommix“ ist anhand der Prognosedaten der ENTSO-E für den 28.09.2020 be-

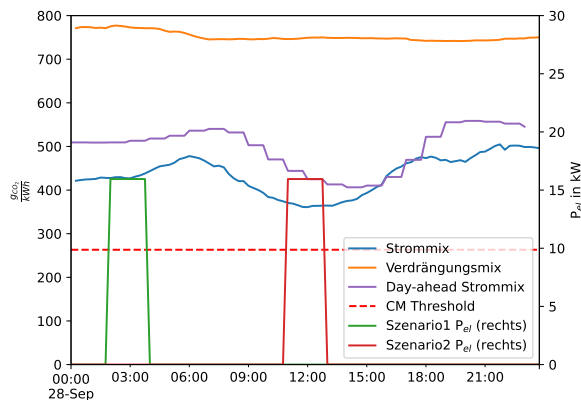


Abbildung 3: Vergleich von Fahrplänen anhand der Emissionsfaktoren

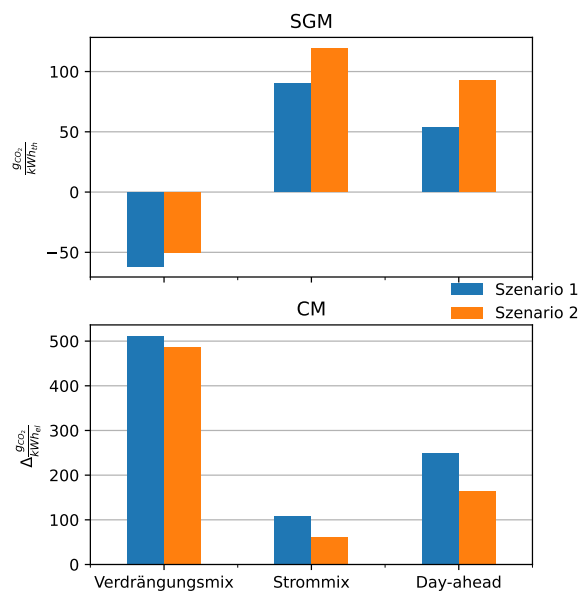


Abbildung 4: CO<sub>2</sub>-Faktoren nach Methoden und Szenarien

Tabelle 3: CO<sub>2</sub>-Faktoren in verschiedenen Fahrplanszenarien und Datengrundlagen

	Verdräng.	Strommix	Day ahead Mix
	$\frac{gCO_2}{kWh_{th}}$	$\frac{gCO_2}{kWh_{th}}$	$\frac{gCO_2}{kWh_{th}}$
Szenario 1	-61,44	89,83	53,54
Szenario 2	-50,37	119,29	92,45

rechnet worden. Die Zeitreihen „Strommix“ und „Verdrängungsmix“ stammen aus den historischen Erzeugungsdaten für den gleichen Tag. Im oberen Teil von Abbildung 4 sind die Ergebnisse als Balken dargestellt. Da die SGM die Gesamtemissionen pro Kilowattstunde Wärmeenergie berechnet, sind niedrigere Werte besser.

Die Ergebnisse der CM entsprechen der Einsparung an Emissionen je Kilowattstunde elektrischer Energie. Entsprechend sind höhere Werte besser. Auf die Ergebnisse der CM wird in Abschnitt 3.2 eingegangen.

Ziel der Auswertung ist es dasjenige Szenario zu identifizieren, das aus System Sicht die wenigsten Emissionen verursacht. Anhand der grafischen Analyse von Abb. 3 ist zu erwarten, dass dies für Szenario 1 zutrifft. Speist das BHKW wie in der Abbildung dargestellt in diesem Zeitraum Strom ein, verdrängt dies in jedem zugrunde gelegten Mix mehr Emissionen als in Szenario 2.

Die Ergebnisse in Tabelle 3 und Abbildung 4 zeigen, dass diese Erwartung eintritt. Die Day-Ahead Prognosedaten als Grundlage zur Bewertung nach SGM ergeben für Szenario 1  $53,54 \frac{gCO_2}{kWh}$  und für Szenario 2  $92,45 \frac{gCO_2}{kWh}$ . Entsprechend werden in Szenario 1 knapp  $39 \frac{gCO_2}{kWh}$  weniger verursacht. Die später gemessenen Verläufe kommen zwar auf deutlich abweichende Zahlenwerte. Das emissionsärmere Szenario ist dennoch in jedem Fall Szenario 1.

Die Einsparung in Szenario 1 gegenüber Szenario 2 bezogen auf den Verdrängungsmix betragen lediglich  $10 \frac{gCO_2}{kWh}$ . Bezogen auf den tatsächlichen Strommix ergeben sich Einsparungen von knapp  $30 \frac{gCO_2}{kWh}$ . Im Vergleich dazu ergibt die Bewertung mit regulären Faktoren für beide Szenarien  $4,61 \frac{gCO_2}{kWh}$ .

### 3.2 Fahrplan nach CM

Tabelle 4: CO<sub>2</sub>-Einsparung in verschiedenen Fahrplanszenarien und Datengrundlagen

	Verdräng.	Strommix	Day ahead Mix
	$\frac{gCO_2}{kWh_{el}}$	$\frac{gCO_2}{kWh_{el}}$	$\frac{gCO_2}{kWh_{el}}$
Szenario 1	510,72	107,49	250,32
Szenario 2	485,72	61,70	164,09

Der charakteristische CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor der stromseitigen Energieerzeugung wurde entsprechend der CM errechnet und liegt bei  $263,21 \frac{gCO_2}{kWh_{el}}$ . Unter der Annahme, dass im Volllastbetrieb der KWK-Anlage stets dieselbe CO<sub>2</sub>-Menge je kWh emittiert wird, liegen die Emissionswerte in dem hier betrachteten Zeitfenster vom 28.09.2020 zu jedem Zeitpunkt unter denen des Strommixes, des Verdrängungsmixes sowie des Day-Ahead Prognosemixes, wie anhand von Abbildung 3 ersichtlich ist. Daraus folgt, dass unabhängig vom Zeitpunkt des Betriebs der KWK-Anlage, diese stets weniger Emissionen freisetzt.

Vor diesem Hintergrund sind in Tabelle 4 die im Durchschnitt entstehenden Differenzen zwischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor der KWK-Anlage und der unterschied-

lichen Strommixe für die jeweiligen Szenarien dargestellt und im unteren Teil von Abbildung 4 visualisiert. In der Abbildung ist die Differenz zwischen dem KWK-Strom und dem entsprechenden Mix als Balken dargestellt. Die berechneten Differenzen liefern dabei eine Aussage darüber, welches Szenario über das höchste Potential verfügt eine möglichst große CO<sub>2</sub>-Menge einzusparen. Eine hohe Differenz stellt dabei das Optimum dar, da in diesem Fall durch die KWK-Anlage die maximale Emissionsmenge der Stromerzeugung substituiert werden kann.

Bezogen auf den Verdrängungsmix können in Szenario 1 510,72  $\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  und in Szenario 2 485,72  $\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  eingespart werden. Dementsprechend liegen die CO<sub>2</sub>-Einsparungen in Szenario 1 um 25  $\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  höher im Vergleich zu Szenario 2. Diese Aussage lässt sich auf den Strommix und die Day-Ahead Prognosedaten als Grundlage zur Bewertung der Systemdienlichkeit der CM übertragen. Bezogen auf den Strommix werden in Szenario 1 im Gegensatz zu Szenario 2 45,79  $\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  mehr eingespart, während die Einsparung hinsichtlich der Day-Ahead Prognosedaten bei 86,23  $\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  für Szenario 1 liegt.

Insgesamt ist festzustellen, dass das Szenario 1 dasjenige Szenario darstellt, welches für jede der gewählten Datengrundlage die höchsten Emissionseinsparungen verspricht.

#### 4 Schlussfolgerungen

Die derzeitige Anwendung der SGM schafft kaum Anreize die lokal verursachten Emissionen zu reduzieren. Die Umstellung auf emissionsärmere Energieträger wie Biomethan oder Wasserstoff würde das Ergebnis nach SGM zwar weiter verbessern. Aufgrund der ohnehin niedrigen berechneten PEF und CO<sub>2</sub>-Faktoren bei KWK existiert dazu jedoch kein Bedarf. Die Kombination aus zeitlich aufgelöster Berechnung und Fahrplanerstellung auf Basis von prognostizierten Strommixdaten schafft diesen Anreiz. Bei hohen Anteilen von erneuerbaren Energien im Strommix ist zum einen davon auszugehen, dass alle Kraftwerke des Verdrängungsmixes bereits maximal gedrosselt sind und die restliche Einspeiseleistung folglich nicht mehr verdrängt werden kann. Zum Anderen können in diesen Zeiträumen Fälle auftreten, in denen der verdrängte Strom nicht mehr Emissionen „einspart“ als von der KWK-Anlage verursacht wird. Das Reduzieren der lokal verursachten Emissionen ermöglicht dann einen Weiterbetrieb der KWK-Anlage bei systemisch niedrigeren Emissionen.

Im gegenwärtigen Verfahren werden die genannten Auswertungen und Berechnungen im Nachhinein durchgeführt. Ein Einfluss von KWK auf die verursachten Emissionen im Strommix können folglich nur zufällig sein. Das Optimieren der Residuallast auf einen Wert um Null wird dabei nicht berücksichtigt. Die dafür notwendige Fahrplanerstellung einige Stunden vor der geplanten Betriebsphase kann erreichen, dass KWK-

Anlagen systemdienlich betrieben werden können. Ist das Optimierungsziel der Fahrplanerstellung abhängig von der Differenz zwischen prognostizierten CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strommixes und der durch die KWK-Anlage verursachten Emissionen, kann erreicht werden, dass KWK-Anlagen nur dann betrieben werden, wenn sie möglichst hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen je erzeugter Strommenge substituieren können.

Dies ist sowohl mit der SGM als auch mit der CM möglich, wobei die berechnete eingesparte CO<sub>2</sub>-Menge unterschiedlich ist. Während bei der SGM die gesamten von der KWK-Anlage verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen verwendet werden müssen, kann bei der CM lediglich der Anteil der Stromproduktion als Vergleichswert herangezogen werden. Bei der SGM führt dies dazu, dass es keinen eindeutigen Grenzwert gibt, zu dem die KWK-Anlage nicht betrieben werden sollte, da durch sie mehr Emissionen verursacht würden, als durch das Beziehen von Netzstrom. Dafür bedarf es eines Referenzsystems, das festlegt bei welcher verursachten CO<sub>2</sub>-Menge pro produzierter Wärmemenge kein Vorteil mehr erreicht wird. Für ein Erdgasbetriebenes BHKW könnte dieses Referenzsystem ein Gaskessel sein, der bspw. pro produzierte Kilowattstunde Wärme 202  $\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$  verursacht. Übersteigt das Fahrplanergebnis nach SGM diesen Wert, ist der Betrieb der KWK nicht systemdienlich.

Bei der CM hingegen werden der Strom- sowie der Wärmeerzeugung eindeutige PEF und CO<sub>2</sub>-Faktoren zugeschrieben. Durch die Annahme charakteristischer Werte der Faktoren, kann außerdem die Auswertung weiter vereinfacht werden. Als Folge daraus ergeben sich spezifische Grenzwerte. Unter Berücksichtigung des Strommixes als Referenzsystem, kann anhand dessen ein optimierter Fahrplan der KWK-Anlage bestimmt werden. Unter diesen Gesichtspunkten entsteht die Annahme, dass der Betrieb der KWK-Anlage zu jeder Zeit zu empfehlen ist. Perspektivisch gesehen ist der Strommix jedoch multiplen Einflüssen ausgesetzt. Infolge der prognostizierten Zunahme des Anteils an Erneuerbaren Energien werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strommixes langfristig sinken [10]. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit der kontinuierlichen Gegenüberstellung von KWK-Anlage und Strommix. Gleichzeitig entstehen so Anreize die KWK-Anlage möglichst emissionsarm und systemdienlich zu betreiben. Demgegenüber bleibt die Wärmeseite bei der Fahrplanerstellung nach der CM unberücksichtigt. Um ein Fahrplanszenario für die wärmeseitige Energieerzeugung erstellen zu können, wird neben dem Strommix jedoch ein weiteres Referenzsystem notwendig.

#### 5 Fazit und Ausblick

Die Auswertung konnte zeigen, dass eine Fahrplanerstellung anhand der Stromgutschrift- und Carnotmethode mithilfe von ENTSO-E Day-Ahead Daten möglich ist. Die SGM muss dafür modifiziert werden, indem

zeitlich aufgelöste Emissionsprofile statt Jahresmittelwerte verwendet werden. Die Hürden zur Implementierung sind dabei gering, da die Daten frei Verfügbar und die Methoden gut bekannt sind. Durch die Ermittlung einer charakteristischen Kennzahl für die CM konnte die Komplexität bei der Anwendung der CM minimiert werden.

Grundsätzlich konnten mit beide Methoden diejenigen Zeiträume mit dem größten Potenzial zur Emissionsvermeidung ermittelt werden. Der Betrag der vermiedenen Emissionen ist jedoch stark unterschiedlich, was an den verschiedenen Ansätzen der beiden Methoden liegt. Im Grenzfall – also ob die KWK-Anlage noch Emissionen vermeidet oder nicht – gibt es weitere Unterschiede. Für die SGM muss ein Referenzsystem festgelegt werden, um diesen Grenzfall überhaupt benennen zu können. Mit der Carnotmethode werden die Emissionen, die für Wärme und Strom verursacht werden, jeweils berechnet. Im Grenzfall werden dann die Emissionen zur Stromerzeugung verwendet und die Emissionen zur Wärmeerzeugung bleiben unberücksichtigt.

Aufgrund der missverständlichen Aussage der SGM bei negativen Ergebnissen und dem Prinzip der Gutschrift wäre eine Aussage über die „systemisch eingesparten Emissionen“ pro produzierter Wärmemenge spezifischer. Der Wert entspräche dann der Differenz aus den verdrängten Emissionen und den lokal verursachten. In der jetzigen Berechnungsweise wird die Differenz andersherum gebildet, weshalb es zu negativen Werten kommen kann. Im Falle der Berechnung von „systemisch eingesparten Emissionen“ wären die Ergebnisse dann besser je größer der Wert ist, was ein Umdenken bei der Bewertung und dem Vergleich der Kennzahlen erfordern würde. Die zukünftig nach unten begrenzten Ergebnisse der SGM sind zudem für Intraday Vergleiche weniger geeignet.

Es zeigt sich außerdem, dass der Verdrängungsmix für die Fahrplanprognose weniger geeignet ist. Der Verdrängungsmix berücksichtigt per Definition nicht wie groß der Anteil regenerativer Erzeugungsanlagen an der Stromproduktion ist. Zudem besteht der Verdrängungsmix zu großen Teilen aus Erzeugungsanlagen die als „must run“ gelten, also in der Regel durchgängig Strom produzieren. Entsprechend gering sind die Schwankungen im Verdrängungsmix. Dies suggeriert, dass es keine große Rolle spielt, wann eine KWK-Anlage betrieben wird. Des Weiteren enthalten Day-Ahead Daten der ENTSO-E nicht die notwendigen Informationen, um den Verdrängungsmix zu bestimmen.

Zur Analyse der Anwendbarkeit in der Praxis sind weitere Untersuchungen notwendig. Dabei sollte der Einfluss der Flexibilitäten im Bestand, zum Beispiel aufgrund von Wärmespeichern, auf das Ausmaß der Vermeidung beleuchtet werden.

## Danksagung

Diese Publikation wurde im Rahmen des Horizon 2020 Projekt mySMARTLife (731297) erstellt.

## Literatur

- [1] ENTSO-E, *ENTSO-E Transparency Plattform: Generation in Germany*. Adresse: <https://transparency.entsoe.eu/> (besucht am 31.07.2021).
- [2] J. Pecinovsky, *entsoe-py*, original-date: 2017-07-12T13:17:39Z, Juli 2021. Adresse: <https://github.com/EnergieID/entsoe-py> (besucht am 31.07.2021).
- [3] B. Kleinertz, C. Pelling, S. von Roon, T. Hübner und G. Kaestle, „EU Displacement Mix - A Simplified Marginal Method to Determine Environmental Factors for Technologies Coupling Heat and Power in the European Union,“ Englisch, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Final Report, Mai 2018. Adresse: <https://www.ffe.de/attachments/article/797/EU%20Displacement%20Mix.pdf> (besucht am 15.09.2020).
- [4] BAFA, Hrsg., *Merkblatt zu den CO<sub>2</sub>-Faktoren: Energieeffizienz in der Wirtschaft –Zuschuss und Kredit*, Jan. 2019. Adresse: [https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew\\_merkblatt\\_co2.pdf;jsessionid=C2DA178353A14600BC2109B908E8CB78\\_2\\_cid362?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_merkblatt_co2.pdf;jsessionid=C2DA178353A14600BC2109B908E8CB78_2_cid362?__blob=publicationFile&v=2) (besucht am 27.07.2020).
- [5] P. Pfeifroth und M. Beer, „Primärenergetische Bewertung von Fernwärme aus KWK,“ AGFW, München, Techn. Ber., Juni 2009. Adresse: [https://www.ffe.de/download/article/294/FFe\\_PE-Bewertung\\_FW\\_aus\\_KWK.pdf](https://www.ffe.de/download/article/294/FFe_PE-Bewertung_FW_aus_KWK.pdf).
- [6] wissenschaftlicher Dienst des Bundestags, *Sachstand Primärenergiefaktoren*, Dez. 2016. Adresse: <https://www.bundestag.de/resource/blob/487664/1a1c2135f782ff50b84eb3e7e0c85ef3/wd-5-103-16-pdf-data.pdf> (besucht am 27.07.2020).
- [7] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz–GEG)*, Nov. 2020. Adresse: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/index.html#BJNR172810020BJNE002200000>.
- [8] M. Pehnt, *Energieeffizienz*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [9] H. Hertle, A. Jentsch, L. Eisenmann, J. Brasche, S. Brückner, C. Schmitt, C. Sager und M. Schurig, „Die Nutzung von Exergieströmen in kommunalen Strom-Wärme-Systemen zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Neutralität von Kommunen bis zum Jahr 2050,“ Techn. Ber., Nov. 2016, S. 208. Adresse: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/>



die - nutzung - von - exergiestromen - in -  
kommunalen-strom (besucht am 07.07.2021).

- [10] BMWi, *Erneuerbare Energien*, Deutsch, Sep.  
2021. Adresse: [https://www.bmw.de/  
Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-  
energien.html](https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html) (besucht am 01.11.2021).