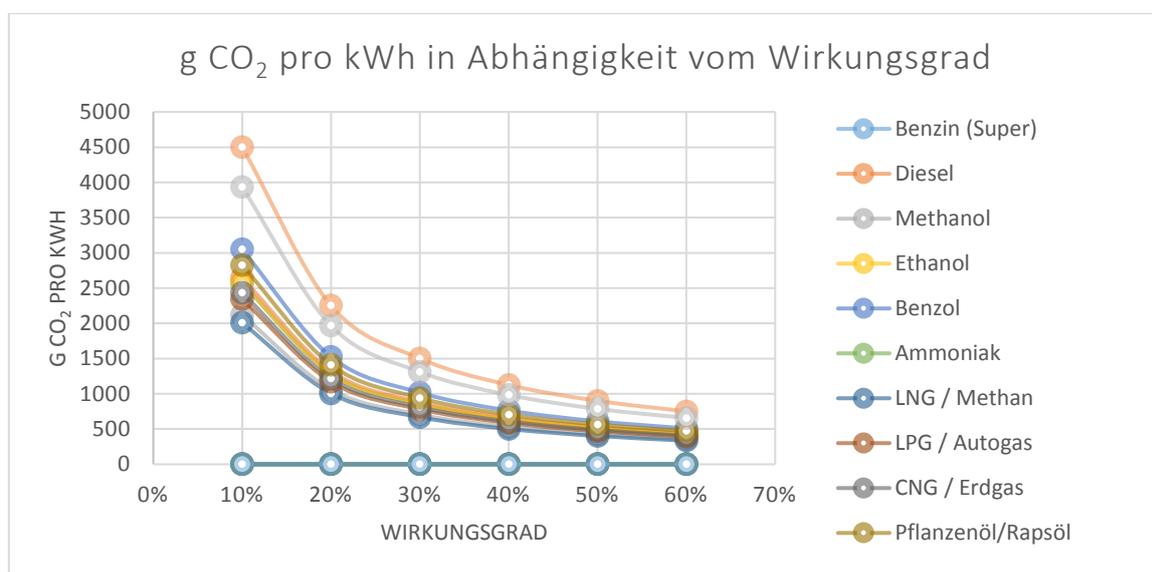


## Einfluss von Netzstruktur und Teillastverhalten auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Grundlagen und Einflussparameter auf die Bilanzierungsregeln

Bearbeitungsstand: 11.01.2022 18:35:10

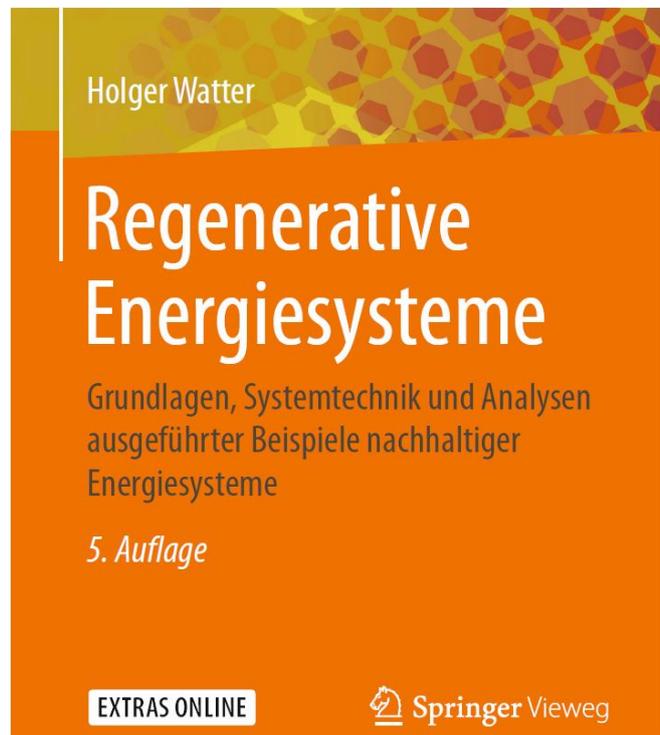


### Inhaltsverzeichnis

1. Motivation und Zielstellung .....	2
2. Kohlenstoffdioxid-Emissionen.....	3
2.1 Kohlenstoffbilanz.....	3
2.2 Massenspezifische Emissionen .....	5
2.3 Energieinhalt.....	6
2.4 Volumen- und gravimetrische Energieinhalte .....	8
2.5 Energiespezifische Emissionen .....	9
2.6 Emissionen unter Berücksichtigung des Systemwirkungsgrades .....	9
3. Zusammenfassung / Bewertung .....	13
4. Verweise .....	14

# 1. Motivation und Zielstellung

Die nationalen Planungen zur Energiewende sehen einen starken Ausbau von Onshore und Offshore-Windkraftanlagen sowie der Photovoltaikanlagen vor [1,2]. Die aktuellen Erfahrungen im laufenden Ausbau und den Betrieb bestehender Anlagen zeigen nach 20-Jahre Energiewende starke Volatilität und relativ geringe Verfügbarkeiten (in Bezug auf die Nennleistung) sowie räumlich und zeitlich stark fluktuierende Ereignisse [3-6]. Es ist daher geplant, die Kohlekraftwerke durch schnell regelbare Gaskraftwerke („Wasserstoff-Ready“) zu ersetzen. Auf die gesonderten Beiträge zum Thema „Wasserstoff aus Windenergie“ [7,8] und „Basiswissen synthetische Kraftstoffe“ [9] wird an dieser Stelle nur verwiesen.



Aufgrund der komplexen Netzstrukturen (Knotenregel und Maschenregel nach KIRCHHOFF) ist zu erwarten, dass die Gaskraftwerke nicht immer im Nennbetriebspunkt arbeiten werden. Das Teillastverhalten wird also prägenden Einfluss auf den „nationalen CO<sub>2</sub>-Fussabdruck“ haben.

Eigene Untersuchungen konnten zeigen, dass die relativ komplexen Zusammenhänge in breiten Kreisen zu Missverständnissen und Fehlinterpretationen (z.B. hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Einsparpotentiale) führen, die dann im gesellschaftlichen Kontext zu politischen, wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen „Geschäftsmodellen“ genutzt werden können, langfristig aber zu Enttäuschungen und Frustrationen führen werden [10-13]. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es,

- die ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen darzustellen,
- projekt- und vorlesungsbegleitende Informationen bereitzustellen,
- den Einfluss und die Potentiale der verschiedenen Energieträger auch bei Teillastverhaltens aufzuzeichnen
- die gesellschaftliche Beurteilungskompetenz und Kritikfähigkeit zu begleiten und
- Verallgemeinerungen auch für mobile Anwendungen abzuleiten.

## 2. Kohlenstoffdioxid-Emissionen

### 2.1 Kohlenstoffbilanz

(Alternative) Kraftstoffe sind zumeist Gemische aus Kohlenwasserstoffen  $C_xH_y$  (ggf. mit Begleitstoffen). Exemplarisch seien genannt ...

OTTO-Kraftstoff besteht primär aus  $C_5$  ...  $C_{12}$ -Molekülen:

Pentan	$C_5H_{12}$
Hexan	$C_6H_{14}$
Heptan	$C_7H_{16}$
Oktan	$C_8H_{18}$
Nonan	$C_9H_{20}$
Dekan	$C_{10}H_{22}$
Undekan	$C_{11}H_{24}$

DIESEL-Kraftstoff aus  $C_{12}$  bis  $C_{17}$  mit höheren Siedepunkten:

Dodekan	$C_{12}H_{26}$
Tridekan	$C_{13}H_{28}$
Tetradekan	$C_{14}H_{30}$
Pentadekan	$C_{15}H_{32}$
Hexadekan	$C_{16}H_{34}$
Heptadekan	$C_{17}H_{36}$

Bezüglich der synthetischen, strombasierten und/oder kohlenstofffreien Kraft- und Brennstoffen wird auf [7 bis 9] verwiesen.

Der Kohlenstoffanteil kann mit Hilfe des *Periodensystems der Elemente (PSE)* und den Molmassen von Kohlenstoff (12 kg/kmol), Wasserstoff (1 kg/kmol) und Sauerstoff (16 kg/kmol) bestimmt werden:

- Erdgas (Natural Gas, CNG = Compressed Natural Gas) besteht, je nach Provenienz (Herkunft), zu 75 bis 99 Vol.-% aus Methan  $CH_4$  mit Spuren von 1 bis 15 Vol.-% Ethan  $C_2H_6$ , Propan  $C_3H_8$ , Butan  $C_4H_{10}$  u.a., wobei der Volumenanteil gleich dem Molanteil und dem Partialdruckanteil entspricht. Der Massenanteil von reinem Methan  $CH_4$  ist

$$C = \frac{12}{12+1+1+1+1} = 0,75 = 75\% \text{ C - also 25\% Wasserstoffanteil} \quad (1.1)$$

Ethan  $C_2H_6$

$$C = \frac{12+12}{12+12+6} = 0,80 = 80\% \text{ C - also 20\% Wasserstoffanteil} \quad (1.2)$$

Propan  $C_3H_8$

$$C = \frac{3 \cdot 12}{3 \cdot 12 + (3 \cdot 2 + 2)} = 0,82 = 82\% \text{ C - also 18\% Wasserstoffanteil} \quad (1.3)$$

D.h. der Kohlenstoffanteil steigt mit zunehmender Kettenlänge der Kohlenwasserstoffe, der Wasserstoffanteil und damit der Hauptenergieträger nimmt mit zunehmender Kettenlänge ab.

- Biogas ist ein Gemisch aus ca. 60 Vol.-% Methan  $CH_4$  und ca. 40 Vol.-% Kohlendioxid  $CO_2$ . Wegen der unterschiedlichen Molmassen entspricht dies ca. 35 Masse-% Methan  $CH_4$  und 65 Masse-% Kohlendioxid  $CO_2$ .

- **Flüssiggas - „Autogas“ - Liquefied Petroleum Gas - LPG** - ist eine Mischung aus längerkettigen Kohlenwasserstoffen wie Propan  $C_3H_8$ , Butan  $C_4H_{10}$ , Propyläen (Propen)  $C_3H_6$  u.a. - oftmals besteht es nur aus Propan und Butan:

$$C = \frac{3 \cdot 12}{3 \cdot 12 + (3 \cdot 2 + 2)} = 0,82 = 82\% \text{ C - also 18\% Wasserstoffanteil} \quad (1.4)$$

- Für ein „mittleres“ Benzin - Oktan  $C_8H_{18}$

$$C = \frac{8 \cdot 12}{8 \cdot 12 + 18 \cdot 1} = 0,84 = 84\% \text{ C - also 16\% Wasserstoffanteil} \quad (1.5)$$

- Für einen „mittleren“ Diesel - Pentadekan  $C_{15}H_{32}$

$$C = \frac{15 \cdot 12}{15 \cdot 12 + 32 \cdot 1} = 0,85 = 85\% \text{ C - also 15\% Wasserstoffanteil} \quad (1.6)$$

- **Biodiesel ist Pflanzenöl** bestehend aus Fettsäuren (auch als Zumischungen B5, B10, B20 [9]); im Wesentlichen sind dies Ölsäure  $C_{17}H_{33}COOH$ , Linolsäure  $C_{17}H_{31}COOH$  und Linolensäure  $C_{17}H_{29}COOH$ . So dass der Kohlenstoffanteil im Mittel ca.:

$$C = \frac{18 \cdot 12}{18 \cdot 12 + 2 \cdot 16 + 32 \cdot 1} = 0,77 = 77\% \text{ C und ca. 11\% Wasserstoffanteil} \quad (1.7)$$

- **Bioethanol oder Ethanol**  $C_2H_5OH$  (auch als Zumischungen E5, E10, ... E85, E100 [9]) enthält einen Kohlenstoffanteil von

$$C = \frac{2 \cdot 12}{2 \cdot 12 + 1 \cdot 16 + 6 \cdot 1} = 0,52 = 52\% \text{ C und ca. 13\% Wasserstoffanteil} \quad (1.8)$$

Abb. 1 vergleicht die Kohlenstoff- und Wasserstoffanteile der verschiedenen Kraft- und Brennstoffe. Es kann festgestellt werden, dass

- Benzin, Diesel, LNG, LPG, CNG, Pflanzenöl sowie Kohle (im Mittel) näherungsweise einen ähnlichen Kohlenstoffanteil von 80% haben (+/- 10%).

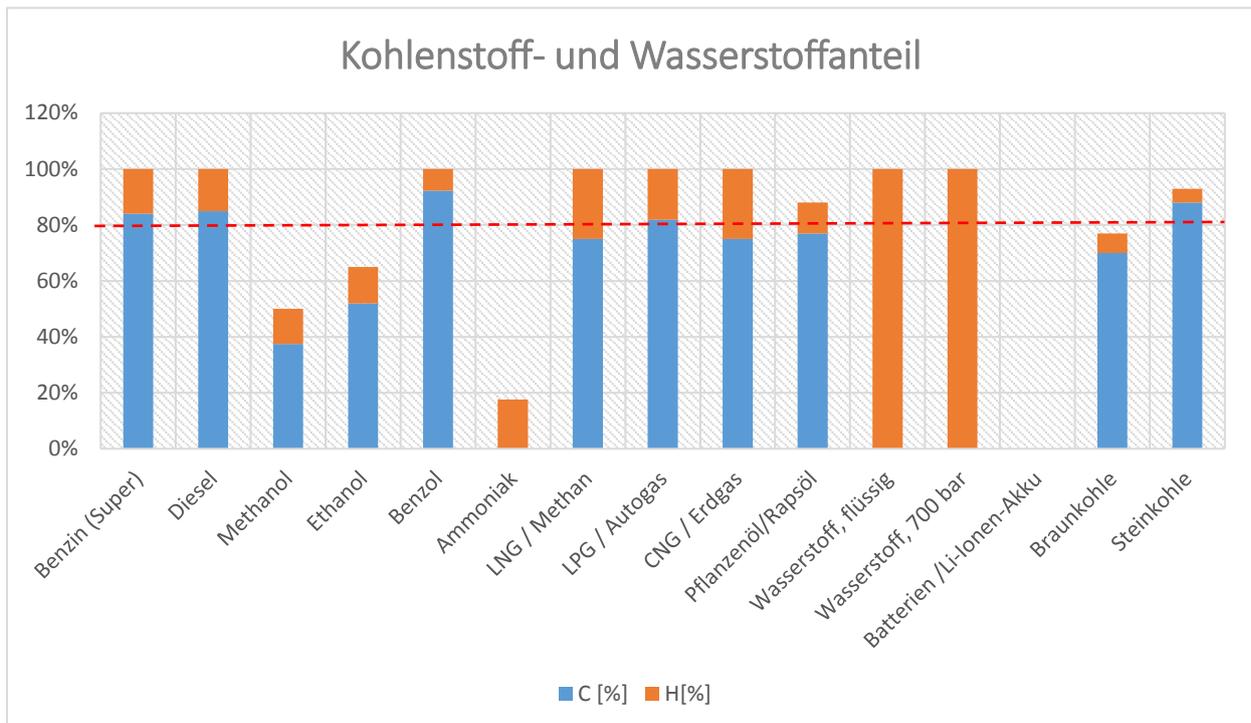


Abb. 1: Kohlenstoff- und Wasserstoffanteil verschiedener Kraft- und Brennstoffe im Vergleich

## 2.2 Massenspezifische Emissionen

Dabei ist Wasserstoff der Hauptenergieträger, der Kohlenstoff liefert das (unerwünschte Nebenprodukt) Kohlendioxid:



$$\text{also} \quad 12 \text{ kg C} + 2 \cdot 16 \text{ kg } O_2 = 44 \text{ kg } CO_2 \quad (2.2)$$

$$\text{bzw.} \quad 1 \text{ kg C} + \frac{2 \cdot 16}{12} \text{ kg } O_2 = \frac{44}{12} \text{ kg } CO_2 = 3,67 \text{ kg } CO_2 \quad (2.3)$$

Mit dem o.g. Kohlenstoffanteil von näherungsweise 80% emittieren Benzin, Diesel, LNG, LPG, CNG, Pflanzenöl sowie Kohle (im Mittel)  $3,67 \cdot 0,8 = \text{ca. } 3 \text{ kg Kohlendioxid } CO_2 \text{ pro kg Brennstoff}$  - fast unabhängig von der Brennstoffart.

**Ammoniak und Wasserstoff** sind auf den ersten Blick kohlenstofffrei. Dies gilt aber nur, wenn der Herstellungsaufwand vernachlässigt wird („*Tank-to-wheel*“). Tatsächlich wird der Wasserstoff z.Zt. global fast ausschließlich mittels Dampfreformierung aus Kohlenwasserstoffen (Erdgas, Kohle u.a.) generiert. Dabei entsteht genau so viel Kohlendioxid wie bei der Verbrennung. Die Emissionen sind also nur verlagert, nicht aber vermieden worden - vgl. dazu „*Well2Wheel*“ im weiteren Verlauf dieses Textes. Zu den Potentialen „Wasserstoff aus Windenergie“ mittels Elektrolyse sei auf [6 bis 9] verwiesen.

**Methan/Erdgas** scheint auf den ersten Blick leichte Vorteile zu haben. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass das **Treibhausgaspotential von Methan** (je nach Quelle und Definition des Zeithorizonts) 28- bis 34-mal stärker als Kohlendioxid angegeben wird. D.h. kleinste Leckagen („Methanschlupf“, „Methan-Slip“) machen diesen Vorteil sehr schnell wieder zunichte, so dass dieser vermeintliche Vorteil genauer erörtert und untersucht werden muss.

Für **Batterien** ist ggf. eine ähnliche Diskussion zu führen, da Energieaufwand für die Batterieproduktion erheblichen Einfluss auf Lebensdauerbilanzen hat („*CO2-Rucksack*“).

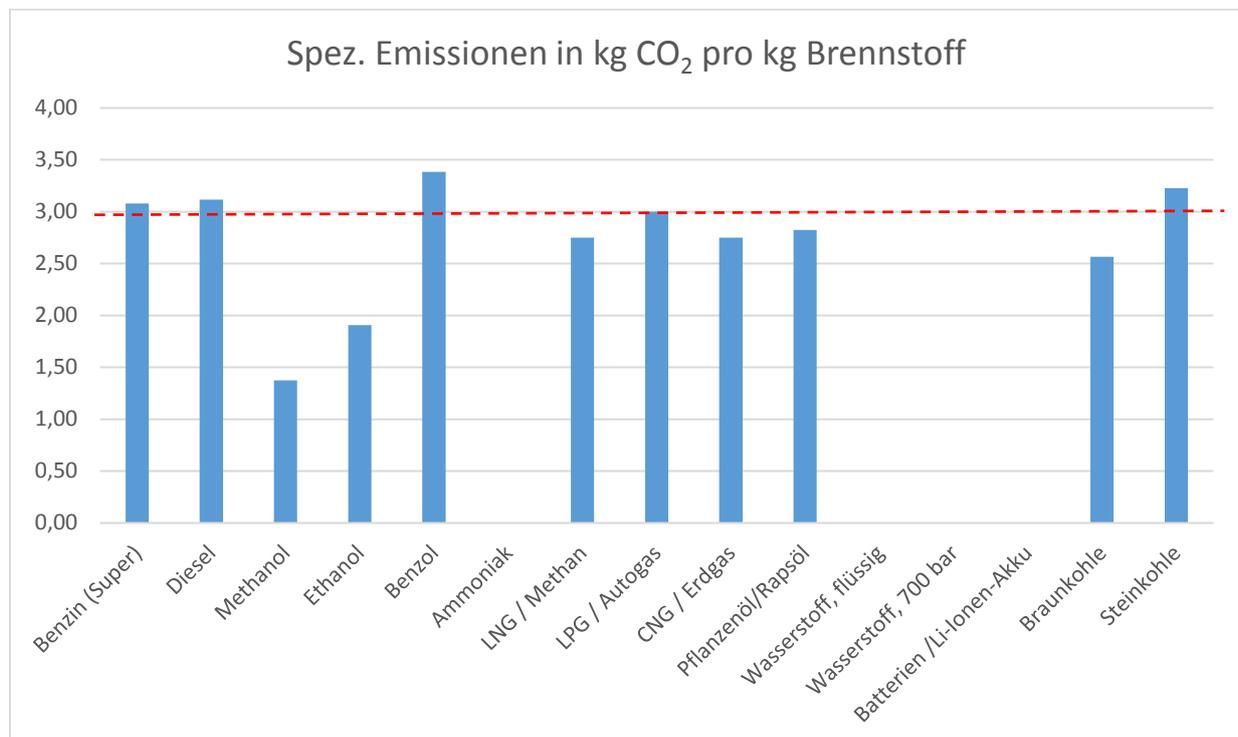


Abb. 2: Spez. Emissionen in kg CO<sub>2</sub> pro kg Brennstoff

## 2.3 Energieinhalt

Die freigesetzten Energiemengen können mit dem „Wärmesatz von HESS“ aus den Standardbildungsenthalpien bestimmt werden. So liefert Gl. (2.1)

$$\Delta H_C = 33,8 \frac{MJ}{kg} = 9,4 \frac{kWh}{kg C} \quad (3.1)$$

und  $\Delta H_H = 120 \frac{MJ}{kg} = 33,3 \frac{kWh}{kg H_2}$  (3.2)

Der Hauptenergieanteil ergibt sich also aus dem o.g. Wasserstoffanteilen der Brennstoffe (=chemische Speicher). Mit den o.g. Massenanteilen lässt sich daraus der (untere) Heizwert bestimmen, der den Energieinhalt des Brennstoffes beschreibt. Am Beispiel von Methan  $CH_4$ :

$$\sum H_{CH_4} = 0,75 \cdot 9,4 \frac{kWh}{kg C} + 0,25 \cdot 0,75 \cdot 33,3 \frac{kWh}{kg H_2} = 15,4 \frac{kWh}{kg CH_4} \quad (3.3)$$

Dies ist ein theoretischer Wert, weil bei der Verbrennung Wasserdampf entsteht. Für die Verdampfung des Wassers wird Verdampfungswärme verbraucht:

$$\Delta H_{verd} = r = h'' - h' = ca. 2.500 \frac{kJ}{kg H_2O} = ca. 0,7 \frac{kWh}{kg H_2O} \quad (3.4)$$

Bei der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff entstehen 9 kg Wasser:



also  $2 \text{ kg } H_2 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 16 \text{ kg } \cdot O_2 = 18 \text{ kg } H_2O$  (3.6)

bzw.  $1 \text{ kg } H_2 + 8 \text{ kg } \cdot O_2 = 9 \text{ kg } H_2O$  (3.7)

Bei 25 Masse-% Wasserstoff für Methan also  $0,25 \cdot 9 \text{ kg} = 2,25 \text{ kg}$  Wasser. Für die Verdampfung werden also benötigt:  $2,25 \text{ kg} \cdot 0,7 \text{ kWh/kg} = 1,6 \text{ kWh}$ , so dass sich der nutzbare Energieinhalt reduziert auf  $15,4 \text{ kWh/kg Methan} - 1,6 \text{ kWh} = 13,8 \text{ kWh/kg Methan}$ .

Die statistische Verbrennungsrechnung liefert für komplexe Gas- oder Flüssigkeitsgemische (wie Benzin, Diesel, Holz oder Kohle) Erfahrungswerte für diesen Energieinhalt. Verallgemeinert wird definiert [6]:

*„Der Heizwert  $H_i$  (inferior; früher unterer Heizwert  $H_u$ ) ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare thermische Energie, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs. Beim Brennwert  $H_s$  (superior; früher oberer Heizwert  $H_o$ ) wird auch die durch Kondensation der Abgase gewonnene Energie berücksichtigt.“*

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Energieinhalte im Vergleich.

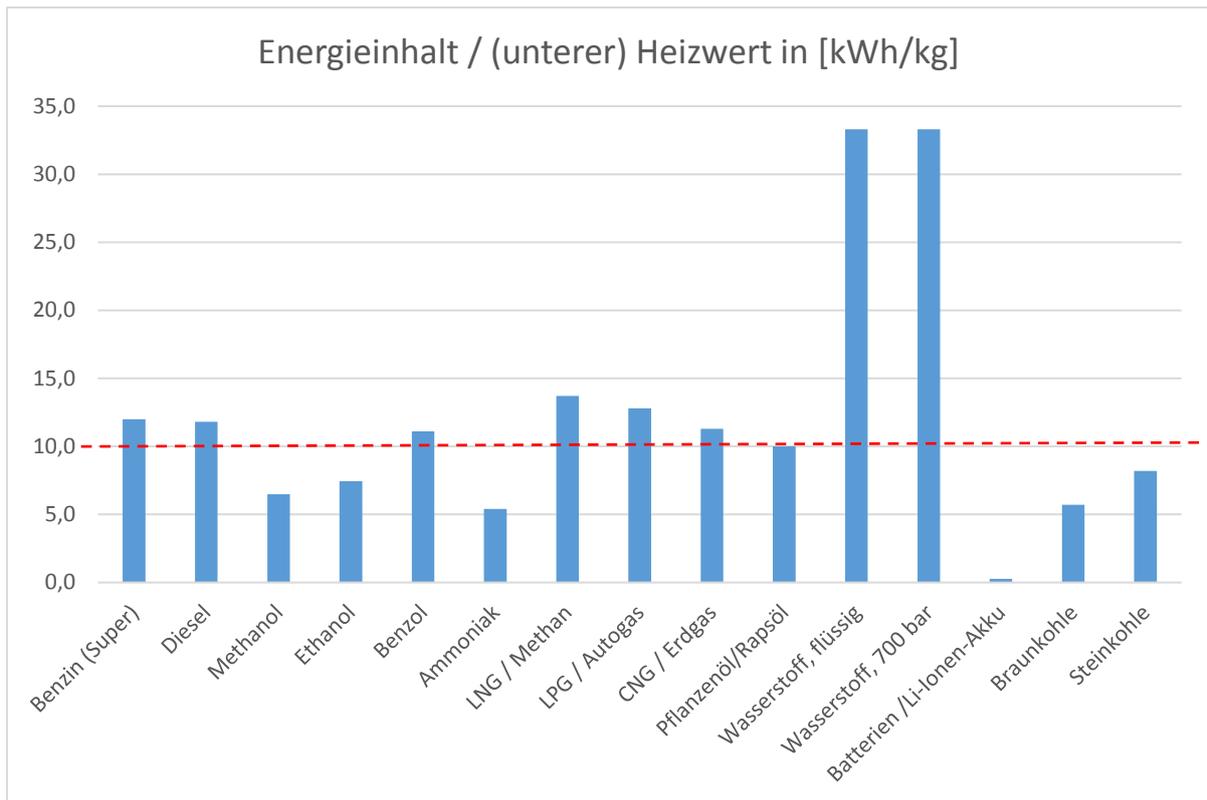


Abb. 3: Energieinhalt bzw. (unterer) Heizwert verschiedener Kraft- und Brennstoffe.

## 2.4 Volumen- und gravimetrische Energieinhalte

Gerade für mobile Anwendungen sind die volumen- und die massenspezifischen Energieinhalte von besonderer Bedeutung, weil die Gewichts- und Platzverhältnisse in der Regel problematisch sind. Gesucht werden also Betriebsstoffe, die möglichst viel Energie bei geringer Masse und geringem Volumen besitzen. Die spezifischen Größen sollten also möglichst beide maximal sein (rechts oben in der Ecke des nachfolgenden Diagramms liegen). Es wird deutlich, dass Kompromisse zu finden sind.

Die Abb. 4 zeigt die Verhältnisse für unterschiedliche Energieträger. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Energieträger für mobile Anwendungen werden daraus ersichtlich.

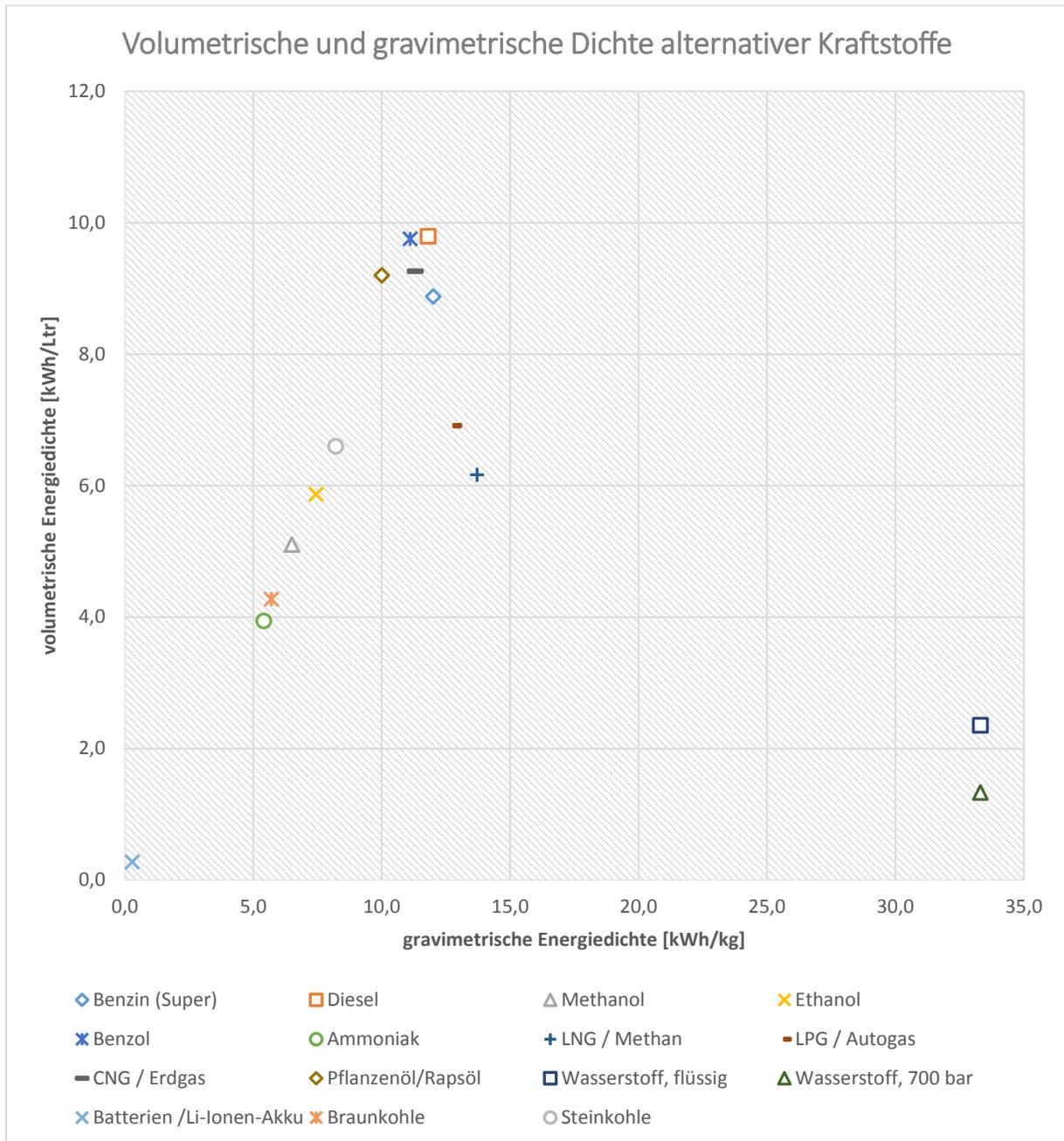


Abb. 4: Volumetrische und gravimetrische Energiedichte alternativer Kraftstoffe.

## 2.5 Energiespezifische Emissionen

Maßgeblich für die Beurteilung der spezifischen Emissionen sind nicht die Emissionen pro kg, sondern pro Energieinhalt [kWh]. Die spezifischen Emissionswerte nach Gl. (2) werden daher durch die Energieinhalte nach Gl. (3) geteilt. Es ergeben sich dann die Kohlendioxidemissionen pro kWh-Energieinhalt des Brennstoffes.

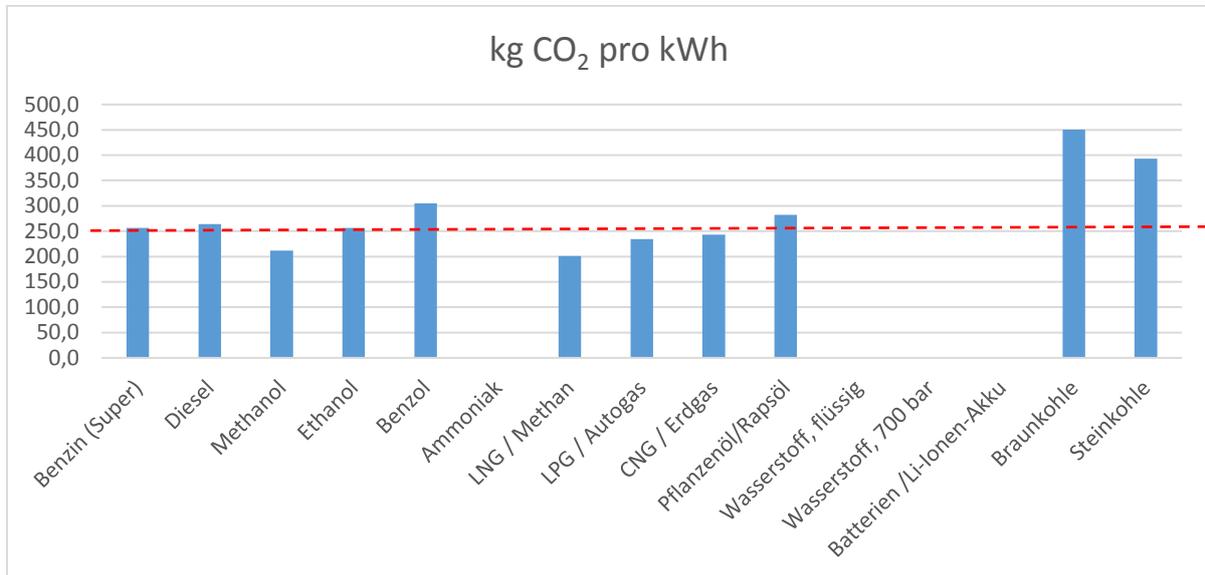


Abb. 5: Spezifische Emissionen pro kWh.

## 2.6 Emissionen unter Berücksichtigung des Systemwirkungsgrades

Für die Emissionsberechnungen ist auch der Systemwirkungsgrad zu berücksichtigen. Abb. 6 zeigt Anhaltswerte für verschiedene Konvertersysteme. Dabei fällt auf, dass der Wirkungsgrad mit der Anlagengröße steigt, weil „kannibalisierende“ Verluste mit zunehmender Anlagengröße immer kleiner oder minimiert werden können (Reibungsverluste, Wärmeverluste u.a.).

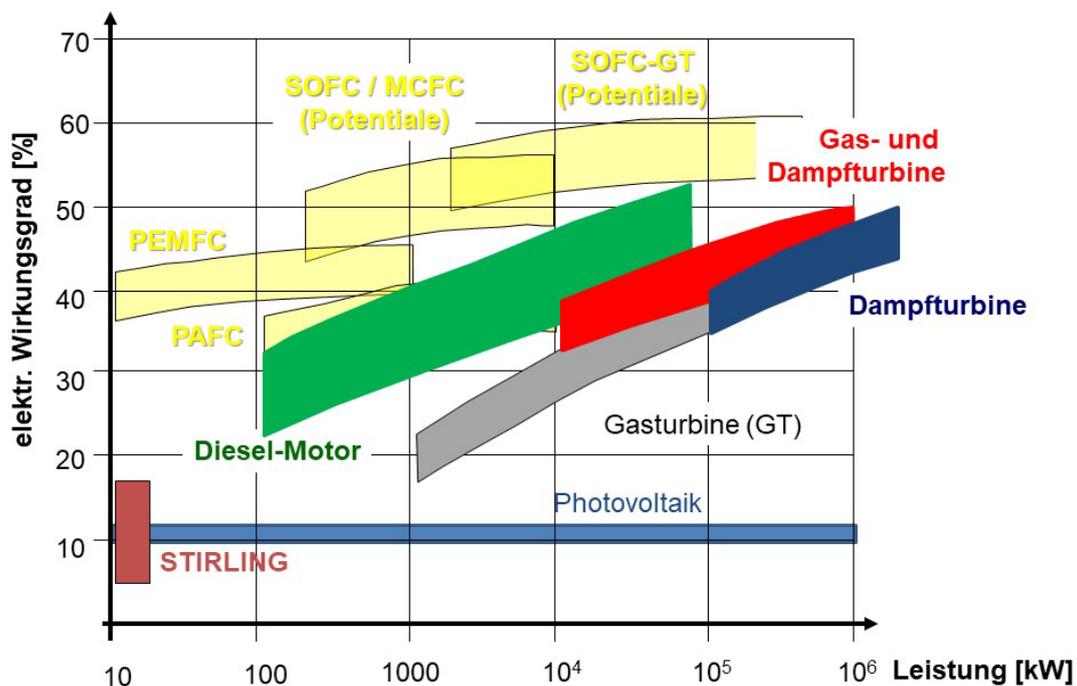


Abb. 6: Effektive Wirkungsgrade unterschiedlicher Energiewandler [6].

Bei Abbildung 6 ist zu berücksichtigen, dass

- hier der Wirkungsgrad „vom Tank zum Antrieb“ („Tank-to-wheel“ - TTW) definiert ist. Der Erzeugungsaufwand von Wasserstoff (vgl. z.B. [7]) oder synthetischen Kraftstoffen (vgl. [9]) ist dabei nicht berücksichtigt.
- Ein globaler Ansatz wäre mit „Well-to-Wheel“ („Well2Wheel“ oder WTW „vom Bohrloch bis zum Rad“) erforderlich. Emissionsverschiebungen (z.B. über Landesgrenzen) sind mit zu berücksichtigen.
- Kombinierte Gas-Dampfturbinenprozesse zeigen dabei die höchsten Wirkungsgrade. Abb. 7 zeigt exemplarische Anlagenkonfigurationen.
- Im Falle der Brennstoffzellen wird auf [6] verwiesen und bleibt hier unberücksichtigt.

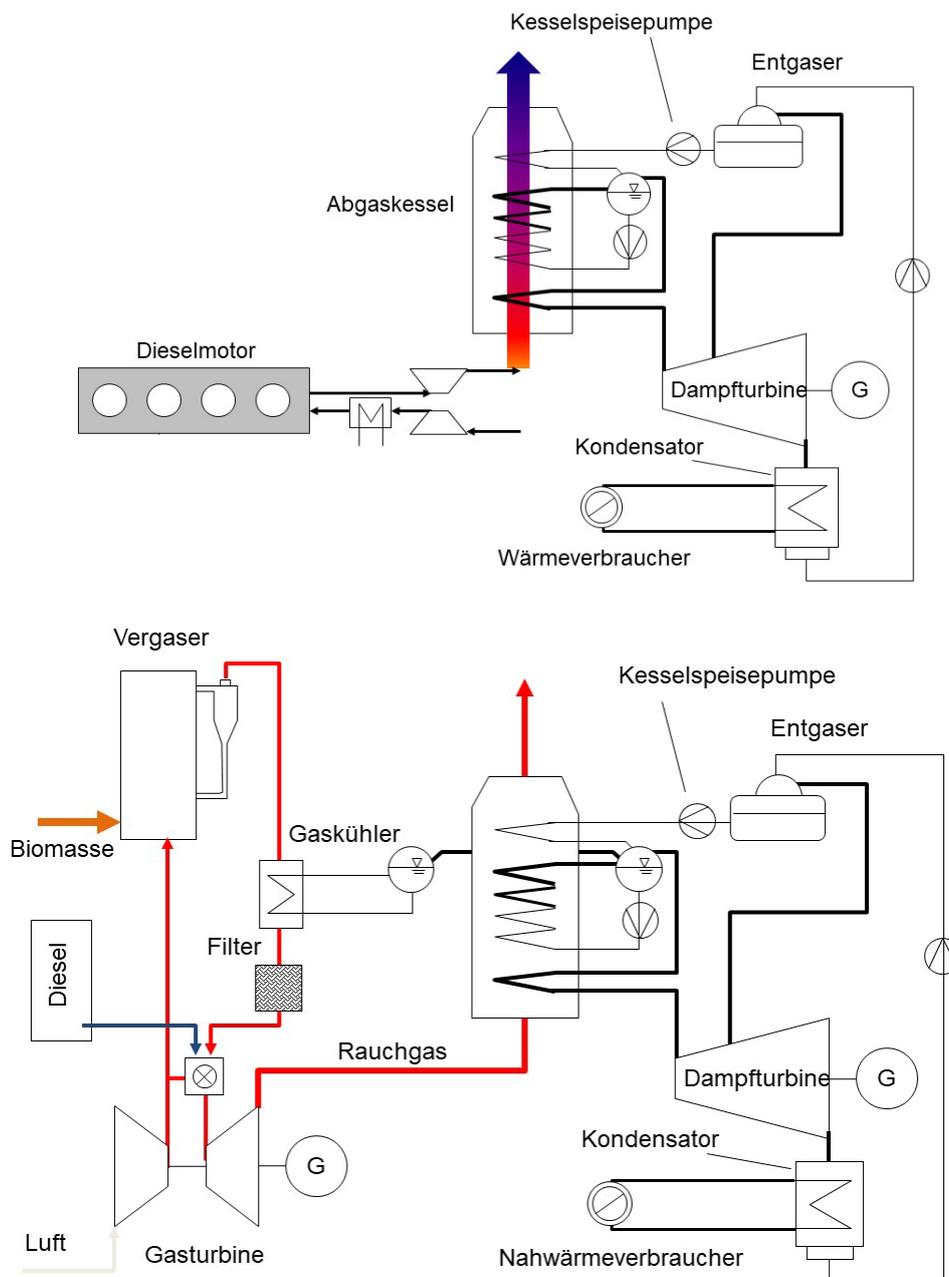


Abb. 7: Beispiele für kombinierte Gas-Dampfturbinenkraftwerke [6].

Abb. 6 zeigt aber auch:

- Kleine dezentrale Anlagen haben eher schlechte Wirkungsgrade,
- die im Rahmen der Energiewende geplanten Gasturbinenkraftwerke zeigen mäßige Wirkungsgrade,
- beste Wirkungsgrade ergeben sich nur für den sogenannten Nennbetriebspunkt, weil das System für diesen Punkt optimiert und abgestimmt wird. Bei Teillast sind die Komponenten „überdimensioniert“, der Wirkungsgrad und die Emissionswerte werden ebenfalls schlechter.

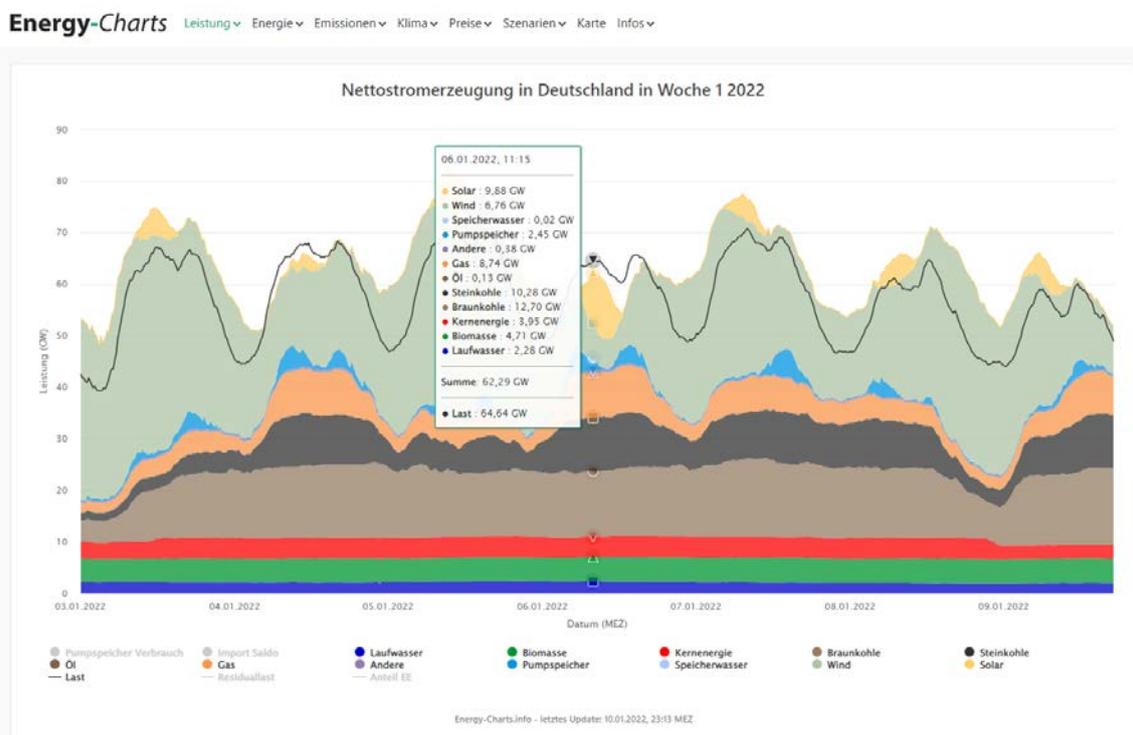
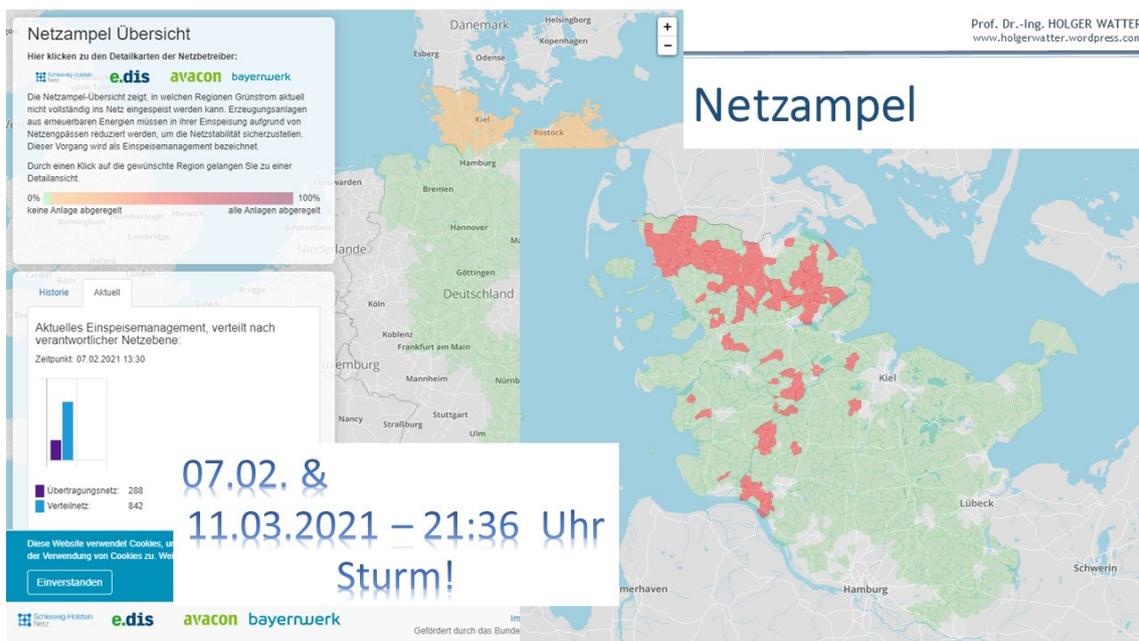


Abb. 8: Räumliche und zeitliche Wirkungen im Netzbetrieb [3,4,5].

Für die Emissionsbetrachtungen sind daher die Betriebsbedingungen zu berücksichtigen:

- Wegen der räumlichen und zeitlichen volatilen Netzbelastungen und Einspeisungen ist der Nennbetriebspunkt jedoch wohl eher nicht immer zu erwarten,
- es sei dann man wählt kleine dezentrale, kaskadierte Anlagen mit den entsprechend o.g. Nachteilen;
- eher ist daher von einem regelmäßigen Teillastbetrieb auszugehen, der die Emissionswerte negativ beeinflussen wird.

Mit dem Systemwirkungsgrad wird das Verhältnis aus Nutzen zu Aufwand (Energie  $E$  oder Leistung  $P$ ) definiert:

$$\eta = \frac{E_{\text{Nutzen}}}{E_{\text{Aufwand}}} = \frac{P_{\text{Nutzen}}}{P_{\text{Aufwand}}} \quad (4)$$

Für die Kohlendioxidemissionen sind daher die Emissionswerte nach Abb. 5 durch den Wirkungsgrad im Betriebspunkt zu teilen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse. Es zeigt sich, dass der Teillast- oder Gesamtwirkungsgrad einen dominierenden Einfluss hat.

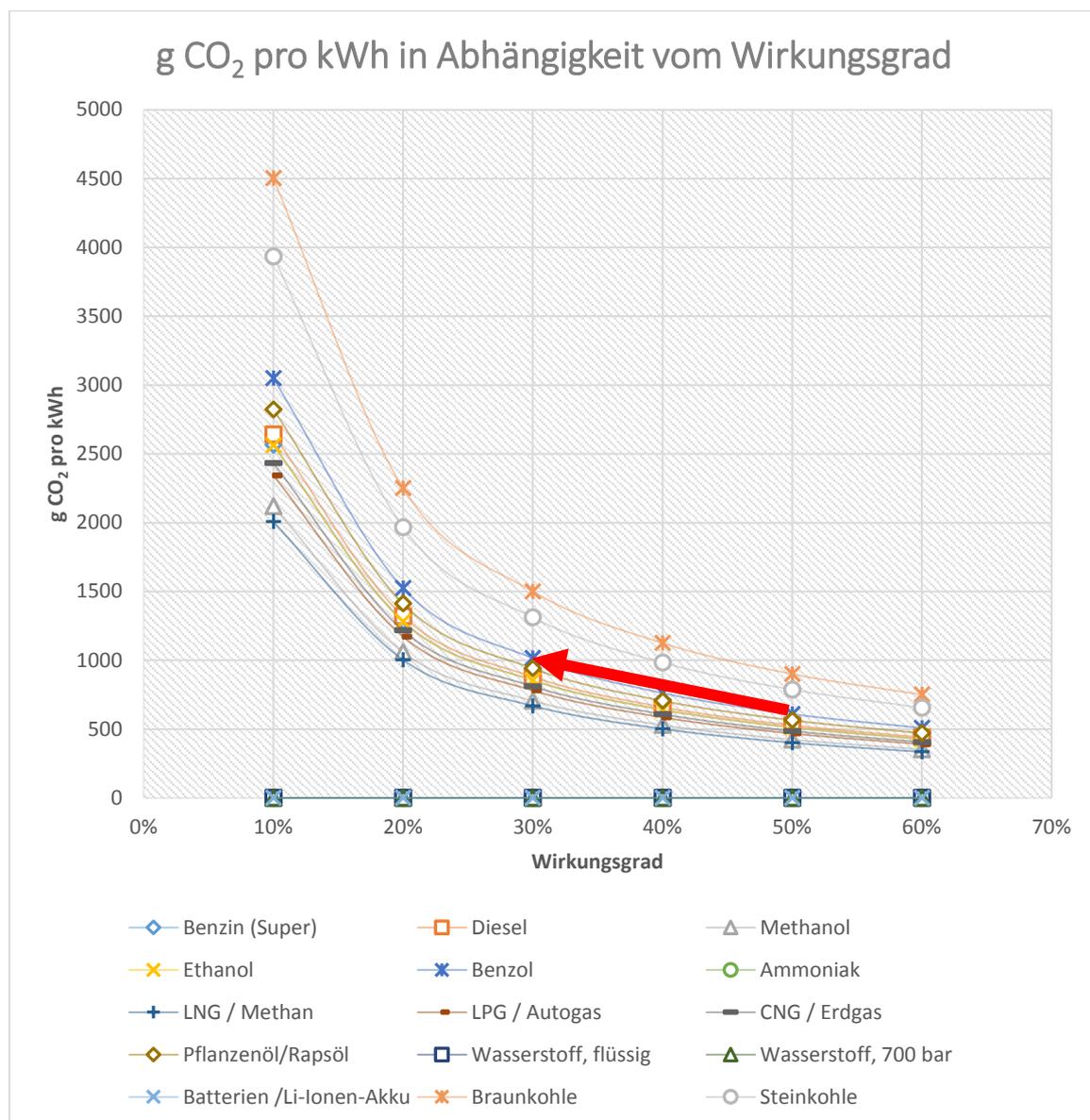


Abb. 9: Spezifische Emissionen in Abhängigkeit vom Teillast- und Gesamtwirkungsgrad

### 3. Zusammenfassung / Bewertung

Im gesellschaftlichen Diskussionsprozess zur Energiewende können zahlreiche Missverständnisse und Fehlinterpretationen beobachtet werden [10 ... 13]. Beispielsweise wird oft mit dem falschen Parameter „Energie“ [kWh] argumentiert statt mit dem physikalisch maßgeblichen Parameter „Leistung“ [kW]. Die Argumentation mit gemittelten und „geglätteten Energiedaten“ ist nicht zulässig und geht am Thema vorbei.

So konnte u.a. gezeigt werden [10...13], dass der sog. „Überschussstrom“ national und physikalisch kaum existiert, weil es sich um ein räumliches und zeitliches Ereignis handelt. Gleichwohl kann betriebswirtschaftlich der einzelne Betrieb durchaus stark betroffen sein. Es muss unterstellt werden, dass die bundesweit aufsummierten, großen Zahlenwerte den Blick auf die physikalischen Realitäten verstellen.

Prof. Dr. Dr. Ulrich Schmidt vom INSTITUT FÜR WELTWIRTSCHAFT (IFW Kiel) [15] weist zurecht darauf hin, dass bei den derzeitigen Emissionsdiskussionen zur Elektromobilität **nicht mit dem Strommix** (vgl. Abb. 8 und 10) gerechnet werden darf, da ja die erneuerbaren Energie wegen der Vorrang einspeisung aktuell und sofort eingespeist und genutzt werden. Jeder zusätzliche elektrische Verbraucher (Wärmepumpe, Elektromobilität etc.) muss aus regelbarer Leistung nachgeführt und dann konsequent auch mit dieser Regelleistung (z.B. aus Kohle oder Gas) gerechnet und bilanziert werden.

Aufgrund unzulässig gewählter (nationaler oder europäischer) Systemgrenzen droht im Falle von konventionellem Wasserstoff eine **Emissionsverschiebung**. Die eigenen Potentiale für grünen Wasserstoff aus Wind- und/oder Sonnenenergie reichen nicht aus [7].

Die politischen Planungen sehen vor, dass effiziente Atom- und Kohlekraftwerke (in der Regel mit aufwendiger Abgasnachbehandlung) durch Gaskraftwerke ersetzt werden sollen. Hier kommen **Gasturbinen oder Gasmotoren** in Betracht. Die Wirkungsgrade liegen hier im Optimalpunkt bei ca. 40%. Bei den Gasturbinen handelt es sich um modifizierte Flugzeugtriebwerke. Wie alle Strömungsmaschinen zeigen Gasturbinen einen besonders starken Wirkungsgradabfall bei Teillast, weil die Anströmung der Beschaufelung außerhalb des Betriebspunktes sehr schnell zu „**Stoßverlusten**“ führt. Die Wirkungsgrade liegen dann deutlich darunter, die spezifischen Emissionswerte steigen stark an. Die Emissionswerte eines Gasturbinenkraftwerkes bei Teillast können die spezifischen Emissionswerte eines Kohlekraftwerks im Optimalpunkt schnell überschreiten. Für die dislozierten und verteilten Kraftwerke im elektrischen Netz ist daher neben dem elektrischen Lastmanagement nach den Knoten- und Maschenregeln aus der Elektrotechnik auch ein Betriebsmanagement in Bezug auf die Auslastung und der Emissionen notwendig. Die Kraftwerke sollten stets im Optimal- bzw. Auslegungspunkt arbeiten. Es wird vermutet, dass diese Aspekte bei aktuellen Prognosen nicht angemessen genug beachtet werden [12].

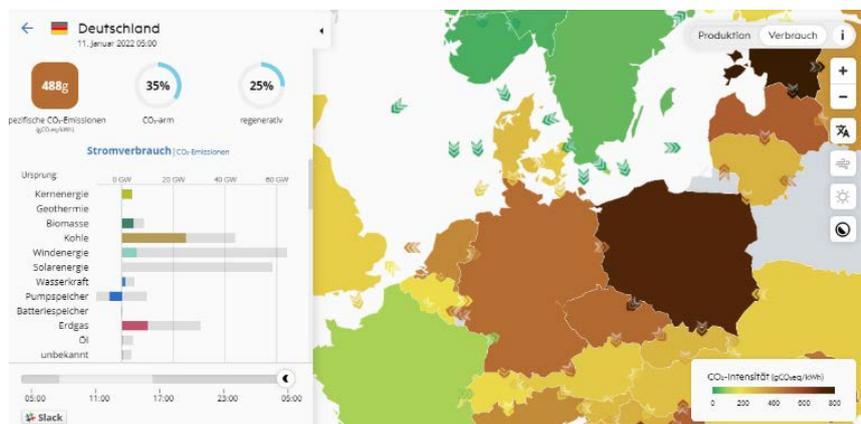


Abb. 10: ElectricityMap am 11. Jan. 2022 morgens [4].

## 4. Verweise

- [1] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende, <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>
- [2] DENA: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität liefert energie- und klimapolitisches Fundament für zukünftige Bundesregierung, <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>
- [3] FRAUNHOFER ISE, [https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&stacking=stacked\\_absolute\\_area](https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=de&c=DE&stacking=stacked_absolute_area)
- [4] ElectricityMap, <https://app.electricitymap.org/map>
- [5] SH-Netz, AVACON, BAYERNWERK: Netzaampel, <https://www.netzampel.energy/home>
- [6] Watter, Holger: Regenerative Energiesysteme - Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme (5. Auflage), Springer-Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2019, vgl. auch <https://holgerwatter.wordpress.com/2019/01/09/5-auflage-regenerative-energiesysteme/>
- [7] Watter, Holger: Wasserstoff aus Windenergie, <https://holgerwatter.wordpress.com/2019/09/12/wasserstoff-aus-wind/>
- [8] Watter, Holger: Anforderungen an die Wasserqualität zur Wasserstoffherzeugung, <https://holgerwatter.wordpress.com/2020/12/06/wasserqualitaet-zur-wasserstoffherzeugung/> und [https://www.researchgate.net/publication/352836259\\_Anforderungen\\_an\\_die\\_Wasserqualitaet\\_zur\\_Wasserstoffherzeugung\\_-\\_Basiswissen\\_zur\\_qualitativen\\_und\\_quantitativen\\_Aufbereitungstechnologie](https://www.researchgate.net/publication/352836259_Anforderungen_an_die_Wasserqualitaet_zur_Wasserstoffherzeugung_-_Basiswissen_zur_qualitativen_und_quantitativen_Aufbereitungstechnologie)
- [9] Watter, Holger: Basiswissen synthetische Kraftstoffe, <https://holgerwatter.wordpress.com/2020/03/04/basiswissen-synthetische-kraftstoffe/> und [https://www.researchgate.net/publication/352836186\\_BASISWISSEN\\_synthetische\\_Kraftstoffe\\_-\\_Einordnungshilfen\\_zur\\_gesellschaftlichen\\_Diskussionsqualitaet](https://www.researchgate.net/publication/352836186_BASISWISSEN_synthetische_Kraftstoffe_-_Einordnungshilfen_zur_gesellschaftlichen_Diskussionsqualitaet)
- [10] Watter, Holger: Diskussionsqualität in der Energiewende, Blog-Beitrag, <https://holgerwatter.wordpress.com/2019/10/15/diskussionsqualitaet-in-der-energiewende/>
- [11] Watter, Holger: Vorträge und Webinare zur Energiewende, <https://holgerwatter.wordpress.com/2021/02/08/webinar-zur-energiewende/>
- [12] Peters, Björn; Preusser, Peter; Watter, Holger; Willner, Thomas: Offener Brief und Fragen zur Qualitätssicherung in öffentlichen Publikation - Studie zur Klimaneutralität 2045, vgl. <https://holgerwatter.wordpress.com/2021/08/30/agora-was-tust-du-wir-mussen-reden/> und [https://www.researchgate.net/publication/354270944\\_Studie\\_zur\\_Klimaneutralitaet\\_2045\\_-\\_Offener\\_Brief\\_und\\_Fragen\\_zur\\_Qualitaetssicherung\\_in\\_offentlichen\\_Publikationen](https://www.researchgate.net/publication/354270944_Studie_zur_Klimaneutralitaet_2045_-_Offener_Brief_und_Fragen_zur_Qualitaetssicherung_in_offentlichen_Publikationen)
- [13] Watter, Holger: TAGESSPIEGEL Future Energie Science Match 2021, 20 Jahre Energiewende - Anpassung, Verhinderung, Akzeptanz - Ignoranz? Vgl. <https://holgerwatter.wordpress.com/2021/12/01/future-energies-science-match-2021/>
- [14] Mayr, Fritz: Kesselbetriebstechnik (8. Auflage), Resch-Verlag, Gräfening, 1999.
- [15] Institut für Weltwirtschaft (IFW Kiel): Zusätzlicher Strombedarf hebt Klimavorteile von E-Autos aus, <https://www.ifw-kiel.de/de/publikationen/medieninformationen/2020/zusaetzlicher-strombedarf-hebelt-klimavorteile-von-e-autos-aus/>