

BEWERTUNG DER STEIGENDEN NACHFRAGE NACH DIESELKRAFTSTOFFEN HINSICHTLICH IHRER CO₂-EMISSIONEN

Philipp FRENZEL, Andreas PFENNIG

Institute of Chemical Engineering and Environmental Technology, TU Graz,
Inffeldgasse 25/C/II, 8010 Graz, Austria, Tel.: +43 316 873-7463,
E-Mail: andreas.pfennig@tugraz.at, Internet: <http://www.icvt.tugraz.at>

Kurzfassung: Es bestehen weltweit Bestrebungen, die Nutzung von fossilen Energiequellen aufgrund der Treibhauswirkung von Kohlenstoffdioxid zu reduzieren. Rund ein Drittel des weltweiten Gesamtenergiebedarfs entfällt dabei auf den Transportsektor, weshalb viele Maßnahmen dort ansetzen. Eine Maßnahme ist die gezielte Förderung von Dieselfahrzeugen durch steuerliche Anreize des Kraftstoffs. Dieselfahrzeuge sind in der Regel verbrauchsärmer als vergleichbare Fahrzeuge mit Ottomotoren. Bei den Bewertungen auf denen die politischen Maßnahmen beruhen, werden in der Regel nur die streckenbezogenen CO₂-Emissionen betrachtet, ohne die entsprechende Vorkette zu berücksichtigen. In diesem Beitrag werden die Auswirkungen der Vorkette auf die CO₂-Emissionen und Exergieverluste untersucht, um daraus Implikationen hinsichtlich der Ziele der Europäischen Union abzuleiten.

Keywords: Diesel-/Benzinnachfrage, CO₂-Emissionen, Exergie, Technologiebewertung

1 Einleitung

Der heutige globale Primärenergiebedarf wird zu großen Teilen aus fossilen Energiequellen gedeckt. Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt, das sich in der Atmosphäre anreichert und durch seine Treibhauswirkung als Auslöser für den Klimawandel angesehen wird (IPCC, 2007). Es existieren deshalb weltweit Bemühungen, die Nutzung von Kohlenstoffquellen mit langer Zykluszeit zu minimieren (UNFCCC, 2000).

Auf den Transportsektor entfallen weltweit rund 30% des Gesamtenergiebedarfs, weshalb viele Bemühungen zur Reduktion von CO₂-Emissionen dort ansetzen (IEA, 2011). So sollen im Jahre 2015 Neuwagen in der Europäischen Union nur noch CO₂-Emissionen in Höhe von 130 g/km und voraussichtlich im Jahr 2021 in Höhe von 95 g/km freisetzen. Dabei sind die streckenbezogenen CO₂-Emissionen von Dieselfahrzeugen aufgrund der effizienteren Motoren in der Regel geringer als von vergleichbaren Fahrzeugen mit Ottomotoren. Vor dem Hintergrund der geringeren direkten CO₂-Emissionen von Dieselfahrzeugen werden steuerliche Anreize geschaffen, um den Absatz von Dieselfahrzeugen zu erhöhen. In Abb. 1 ist die energiebezogene Besteuerung von Diesel und Benzin für verschiedene Länder dargestellt.

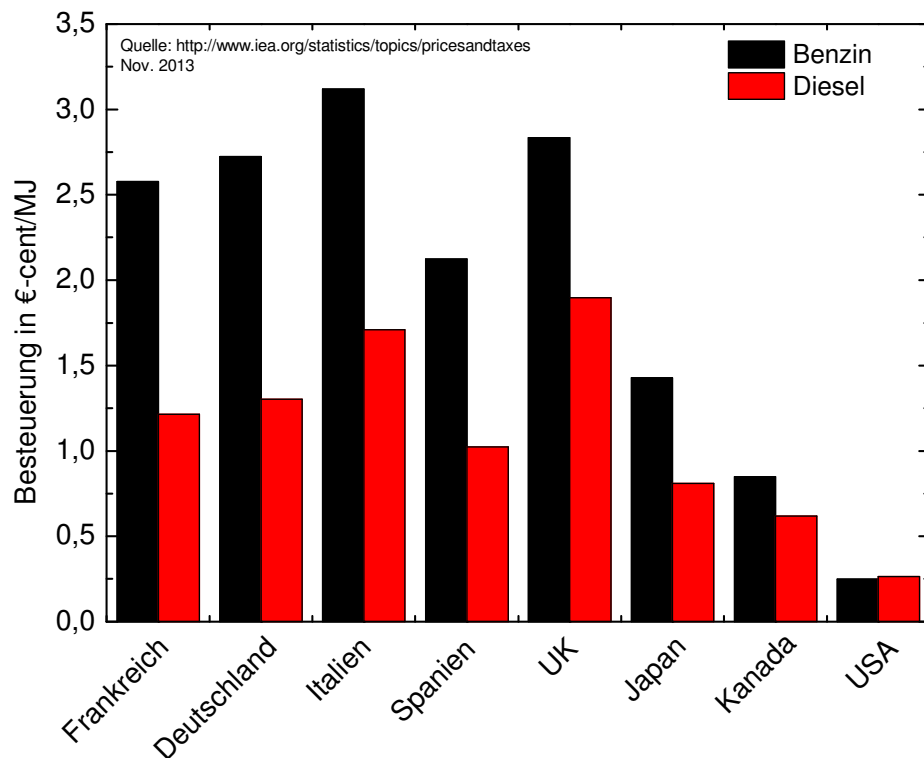


Abbildung 1: Vergleich der energiebezogenen Besteuerung von Benzin und Diesel.

Es zeigt sich, dass die Besteuerung von Diesel in vielen Ländern signifikant geringer ist als die Besteuerung von Benzin. Auch unter Berücksichtigung von anderen Kostenfaktoren, wie den höheren Anschaffungspreisen von Dieselfahrzeugen, wird der politisch gewünschte Effekt erreicht und die Gesamtdieselnachfrage in der Europäischen Union steigt. So stieg das Nachfrageverhältnis in der Europäischen Union von Diesel zu Benzin von rund 0,7 zu Beginn der 1990er auf rund 2,1 im Jahre 2010. Dies hat zur Folge, dass in der Europäischen Union mittlerweile verstärkt Benzin exportiert wird während Diesel importiert werden muss. Ein Großteil des exportierten Benzins wird nach Nordamerika verkauft. Prognosen zeigen allerdings, dass dort die Nachfrage nach Benzin zurückgehen wird. Neben effizienteren Motoren wird die Nachfrage von erdölbasierten Benzin durch die in vielen Ländern gesetzlich vorgeschriebene Beimischung von Biokraftstoffen weiter reduziert.

Eine Möglichkeit, dem Nachfragerückgang zu begegnen, ist die Anpassung des Produktspektrums in den Erdölraffinerien. Erdöl besteht hauptsächlich aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen unterschiedlicher Kettenlängen. Die Anteile der Erdölfraktionen, die sich durch die Fraktionierung von Erdöl in einer einfachen Erdölraffinerie ergeben, weichen allerdings von der jeweiligen Nachfrage der Fraktionen ab. Insbesondere kann die hohe Nachfrage nach Diesel durch eine einfache Fraktionierung nicht gedeckt werden, so dass die großen Moleküle aus den Rückständen der Vakuumdestillation, das sogenannte Vakuumgasöl, gespalten werden, um die Ausbeute an Dieseldieselkraftstoffen zu erhöhen. Für diese Spaltung muss Wasserstoff eingesetzt werden, der seinerseits einen CO₂-Rucksack mit in den Gesamtprozess einbringt. Soll also Diesel in Bezug auf Benzin korrekt bewertet werden, muss die entsprechende Vorkette mit berücksichtigt werden.

Für einen fairen Vergleich kommt es auf die CO₂-Emissionen der gesamten Prozesskette bezogen auf eine vergleichbare Produktmenge an. Das Produkt ist hier die gefahrene Strecke, die einerseits mit einem Diesel- andererseits mit einem Benzin-PKW zurückgelegt werden kann. Es soll also ausgewertet werden, wie sich die CO₂-Emissionen verändern, wenn einmal ein Benzin-PKW eine bestimmte Strecke zurücklegt im Vergleich zu einem Diesel-PKW für den der Diesel-Kraftstoff durch Spaltung von Vakuumgasöl gewonnen wird. Da der zusätzliche Diesel bei dem aktuellen typischen Produktspektrum einer Raffinerie aus diesem Prozess stammt, spiegelt dieser Vergleich genau die Auswirkung der entsprechenden Entscheidung eines PKW-Käufers wider.

Die Auswirkung einer solchen Anpassung des Produktspektrums einer Raffinerie wird im Folgenden untersucht. Um nicht nur die CO₂-Emission an sich zu bewerten, sondern die Prozessverluste mit zu berücksichtigen, erfolgt die Bewertung auch auf der Basis der Exergie, einem verallgemeinerten Energiemaß. Der Vergleich erfolgt zunächst bezogen auf die Kraftstoffmenge und wird in einem zweiten Schritt mit der Fahrleistung in Bezug gesetzt.

2 Methoden

Um die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen zu bewerten, müssen einerseits die direkten stofflichen CO₂-Ströme bekannt sein, die den Prozess verlassen. Andererseits müssen die indirekten CO₂-Emissionen quantifiziert werden, die mit der Bereitstellung von Energie zur Durchführung der zusätzlichen Prozessschritte zur Dieselherstellung aus Vakuumgasöl verbunden sind. Hierzu werden Exergiebilanzen genutzt. Im Gegensatz zu reinen Energiebilanzen werden bei einer exergetischen Analyse sowohl Enthalpie- als auch Entropieströme bilanziert, wodurch zwischen verschiedenen Energieformen und ihrer jeweiligen Qualität unterschieden werden kann. Aus diesem Grund werden exergetischen Gütemaßen im Sinne der Exergoökonomie bzw. Exergieökologie sowohl eine bessere ökonomische als auch ökologische Aussagekraft zugeschrieben als reinen Energiebilanzen (Dewulf et al., 2008; Tsatsaronis, 2008). Der Exergiebedarf charakterisiert die jeweils minimal benötigte Energiemenge für die Durchführung eines Prozesses, die im Folgenden durchgeführten Betrachtungen stellen also eine Abschätzung einer unteren Grenze dar.

Die eingesetzte Exergie kann anschließend wieder korrespondierenden CO₂-Emissionen zugeordnet werden, die abhängig sind von der Quelle der im Prozess typischerweise eingesetzten Energieform. So ist die Bereitstellung von elektrischer Energie aus fossilen Rohstoffquellen mit hohen CO₂-Emissionen behaftet, aus erneuerbaren Rohstoffquellen hingegen mit niedrigen. Für elektrische Energie, wie sie für Pumpen und Verdichter benötigt wird, wird deshalb als repräsentativer Wert der heutige CO₂-Fußabdruck für Strom aus dem europäischen Verbundnetz in Höhe von 0,383 (kg CO₂)/kWh zugrunde gelegt. Für Wärme wird angenommen, dass sie letztendlich durch den Einsatz einer Gasflamme mit Methan als Brennstoff bereitgestellt wird. In diesem Zusammenhang wird 0,054 kg CO₂/MJ emittiert. Beide Annahmen entsprechen also einem heute realistischen Szenario.

Exergie ist die Arbeit, die gewonnen werden kann, wenn ein Stoff durch einen reversiblen Prozess ins Gleichgewicht mit der Umgebung gebracht wird. Die Exergie beschreibt damit den energetisch frei nutzbaren Wert eines Energie- oder Stoffstroms. Dabei kann zwischen drei wesentlichen Exergieanteilen eines Stoffstroms unterschieden werden: der chemischen

Exergie E_{chem} , der physikalischen Exergie E_{phys} und der Mischungsexergie E_{mix} (Munsch et al., 1990):

$$E = E_{\text{chem}} + E_{\text{phys}} + E_{\text{mix}}. \quad (1)$$

Die chemische Exergie ist die Arbeit, die gewonnen werden kann, wenn ein Stoff bei Umgebungstemperatur und -druck ins chemische Gleichgewicht mit der Umgebung gebracht wird. Die molare chemische Exergie wird berechnet aus der Summe der freien Gibbs-Energie $\Delta_f G^O$ und Standardwerten $E_{\text{chem,el},i}$, die für jedes Element aus dem Umgebungsmodell abgeleitet werden (Szargut et al., 1989):

$$E_{\text{chem}}^O = \Delta_f G^O + \sum_{i=1}^{N_{\text{el}}} \nu_{\text{el},i} E_{\text{chem,el},i}, \quad (2)$$

wobei mit N_{el} die Anzahl der Elemente und mit $\nu_{\text{el},i}$ die stöchiometrischen Faktoren eines jeden Elements bezeichnet werden. Die physikalische Exergie ist die Arbeit, die gewonnen werden kann, wenn ein Stoff hinsichtlich Temperatur T und Druck p ins Gleichgewicht mit der Umgebung gebracht wird. Die Berechnung erfolgt über die Enthalpie- und Entropiedifferenz vom aktuellen Zustand zum Zustand der Umgebung, der mit 0 gekennzeichnet wird:

$$E_{\text{phys}} = H(T, p) - H_0(T_0, p_0) - T_0((S(T, p) - S_0(T_0, p_0))), \quad (3)$$

wobei mit H die Enthalpie und mit S die Entropie bezeichnet wird. Die Mischungsexergie ist in der Regel klein und kann für diese Betrachtungen vernachlässigt werden.

Für die Bewertung eines Prozesses mit Exergiebilanzen wird ein geeignetes Gütemaß benötigt. Das Gütemaß ist der Exergieverlust innerhalb der in Abb. 2 dargestellten Systemgrenze. Da Exergie im Gegensatz zu Energie keine Erhaltungsgröße ist, ist die Differenz aus ein- und ausgehenden Exergieströmen größer als null. Diese Differenz wird als Exergieverlust bezeichnet:

$$\dot{E}_{\text{loss}} = \sum_i \dot{E}_{\text{ein},i} - \sum_j \dot{E}_{\text{aus},j} + \sum_k \dot{E}_{\text{ein,utilities},k} - \sum_l \dot{E}_{\text{aus,utilities},l}. \quad (4)$$

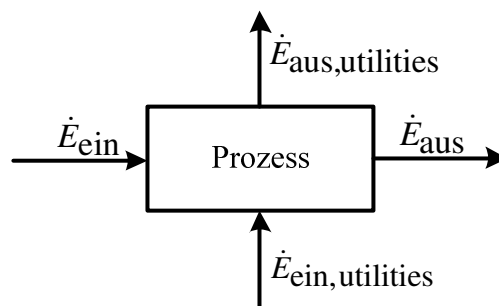


Abbildung 2: Ein- und ausgehende Exergieströme eines chemischen Prozesses.

3 Modellierung

Um die zusätzlichen CO₂-Emissionen und Exergieverluste zu quantifizieren, die bei der Herstellung von einem Kilogramm Diesel aus Vakuumgasöl entstehen, werden die zugrundeliegenden Prozesse modelliert. Dabei handelt es sich einerseits um den eigentlichen Spaltungsprozess und andererseits um einen Prozess zur Wasserstoffgewinnung, da Wasserstoff für die Spaltung des Vakuumgasöls benötigt wird. Die Prozesse wurden mit dem selbst entwickelten Programm ExergySim modelliert und simuliert (Frenzel, 2014). Die für die Berechnung benötigten Stoffdaten werden der DIPPR-Datenbank entnommen (AIChE, 2010).

In einer Erdölraffinerie stammt der Wasserstoff typischerweise aus einer Methanreformierung. Das vereinfachte Fließbild für diesen Prozess ist in Abb. 3 dargestellt.

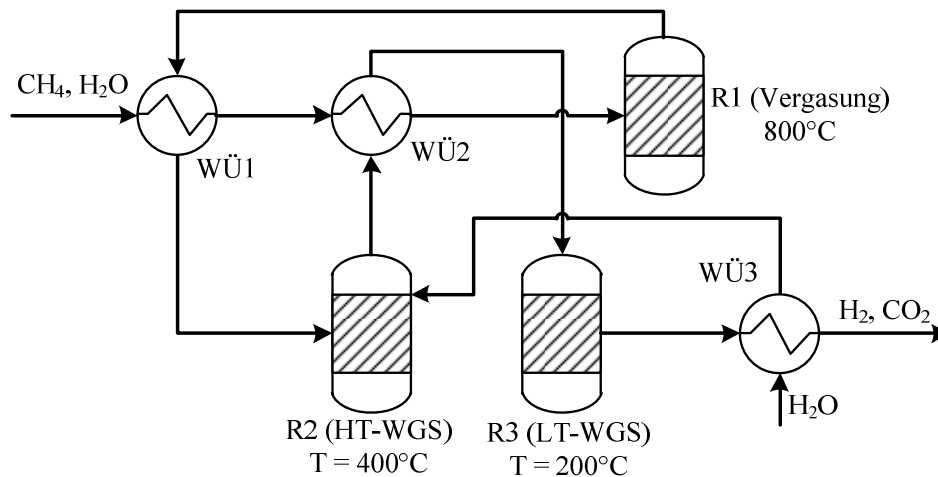


Abbildung 3: Vereinfachtes Fließbild zur Wasserstoffherstellung mittels Methanreformierung (R = Reaktor, WÜ = Wärmeübertrager).

Im Kern besteht dieser Prozess aus drei Reaktoren. Im ersten Reaktor wird Methan zu Synthesegas bei einer Temperatur von 800°C vergast:



Mit einer anschließenden Wassergas-Shift-Reaktion wird in zwei Stufen der Wasserstoffanteil des Synthesegases erhöht, wobei Kohlenstoffmonoxid zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgewandelt wird:



Die erste Wassergas-Shift-Reaktion wird bei 400°C, die zweite bei 200°C durchgeführt. Um die Reaktionstemperaturen zu erreichen bzw. bei der endothermen Vergasungsreaktion die Temperatur zu erhalten, muss Wärme übertragen werden. Durch eine Wärmeintegration mit den Strömen, die die jeweiligen Reaktoren verlassen, wird die von außen zuzuführende Energiemenge reduziert.

In Abb. 4 sind die Exergieverluste und CO₂-Emissionen für diesen Prozess dargestellt, wobei die jeweiligen Werte für die Wärmeübertrager zu einer Kategorie zusammengefasst wurden. In Summe betragen die Exergieverluste für diese Art der Wasserstoffherzeugung 16,9 MJ/(kg H₂) und die CO₂-Emissionen 7,12 kg/(kg H₂). Die Exergieverluste werden dominiert durch die Verluste, die im Vergasungsreaktor entstehen. Aufgrund der endothermen

Reaktion ist für eine isotherme Reaktionsführung eine stetige Energiezufuhr nötig, die mit Exergieverlusten verbunden ist. Im Gegensatz dazu haben die direkten stofflichen CO₂-Emissionen durch die Wassergas-Shift-Reaktion den größten Anteil an den Gesamtemissionen.

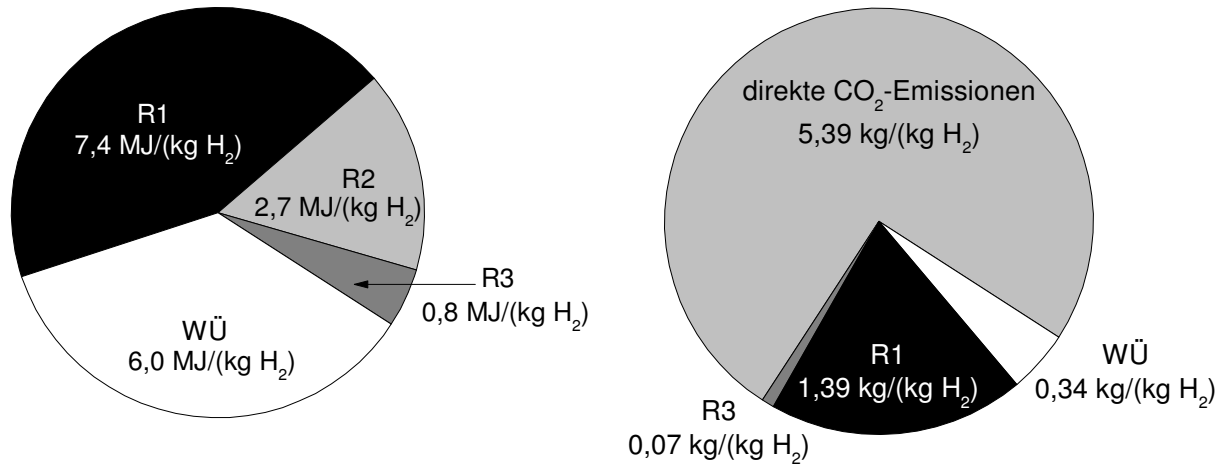


Abbildung 4: Exergieverluste (links) und CO₂-Emissionen (rechts) für die Wasserstoffherzeugung mittels Methanreformierung.

Der so erzeugte Wasserstoff ist ein zusätzliches Edukt, das für die Spaltung des Vakuumgasöls benötigt wird. In Abb. 5 ist das vereinfachte Fließbild für diesen Crack-Prozess dargestellt.

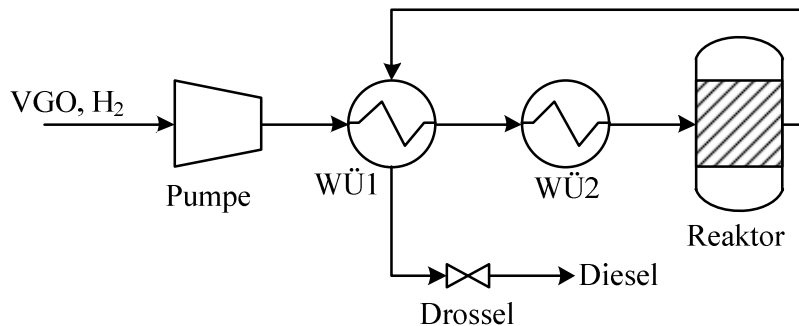


Abbildung 5: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild des Crack-Prozesses.

Die Spaltung des Vakuumgasöls wird im Reaktor bei 480°C und 200 bar durchgeführt. Für die Simulation mit ExergySim werden Diesel und das Vakuumgasöl mit jeweils einem Alkan als Ersatzstoff angenähert. Für Diesel wird *n*-Decen für das Vakuumgasöl *n*-Eicosan angenommen. Die Spaltung erfolgt unter dem Einsatz von Wasserstoff nach folgender Reaktionsgleichung:



Die Exergieverluste für diesen Prozess sind in Abb. 6 dargestellt. In Summe betragen die Exergieverluste 6,6 MJ/(kg Diesel). Unter Berücksichtigung der stöchiometrischen Verhältnisse entfallen 0,3 MJ/(kg Diesel) auf die Bereitstellung des Wasserstoffs. Die CO₂-Emissionen betragen 0,72 kg/(kg Diesel), wobei die Wasserstoffbereitstellung einen Anteil von weniger als 20% hat. Sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Exergieverluste werden

durch den Reaktor dominiert, da aufgrund der stark endothermen Spaltungsreaktion für eine isotherme Reaktionsführung Energie zugeführt werden muss.

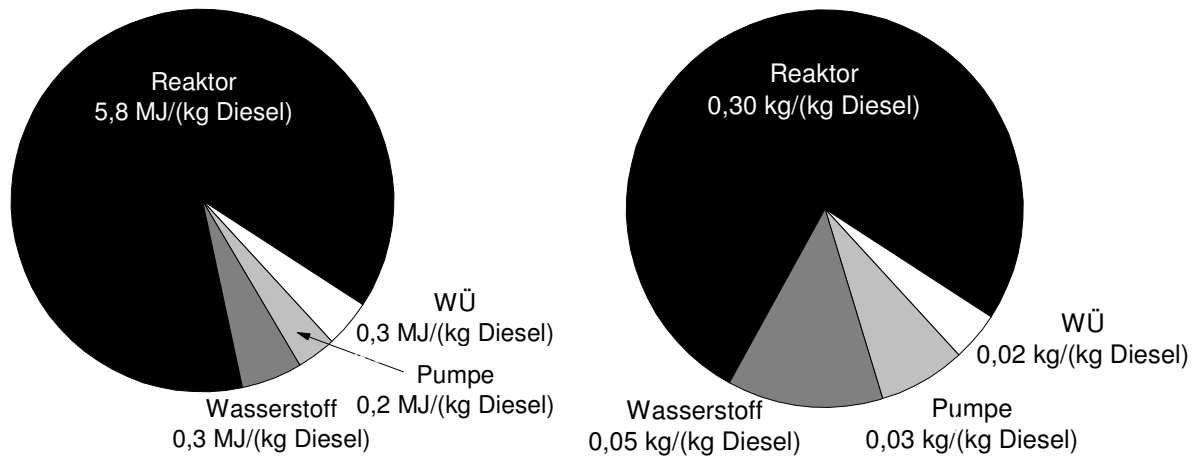


Abbildung 6: Exergieverluste (links) und CO₂-Emissionen (rechts) für die Dieselerzeugung aus Vakuumgasöl.

4 Ergebnisse und Diskussion

Um die anfangs gestellte Frage nach den Auswirkungen der gestiegenen Dieselnachfrage auf die Ziele der Europäischen Union hinsichtlich der CO₂-Emissionen zu beantworten, wurden in Abb. 7 die streckenbezogenen CO₂-Emissionen für den Verbrauch von Diesel und Benzin zusammengestellt, die sich durch ihre Verbrennung in einem jeweiligen PKW-Motor ergeben. Insbesondere sind auch die erhöhten CO₂-Emissionen in Abb. 7 dargestellt, die aus der Herstellung von Diesel aus Vakuumgasöl mindestens resultieren. Es sei daran erinnert, dass dies die untere Abschätzung des entsprechenden Beitrages unter optimalen Prozessbedingungen darstellt. Ein Vergleich mit den Kraftstoffverbräuchen realer Fahrzeuge erlaubt eine Einordnung dieser Werte. Dazu wurden die Herstellerangaben zu den Kraftstoffverbräuchen bzw. Fahrleistungen sowohl von Fahrzeugen der Kompaktklasse mit einer Motorleistung von ca. 80 kW als auch Fahrzeuge der Oberklasse mit ca. 230 kW jeweils für die Diesel- und Benzinausführung ausgewertet und als Punkte in Abb. 7 mit eingetragen.

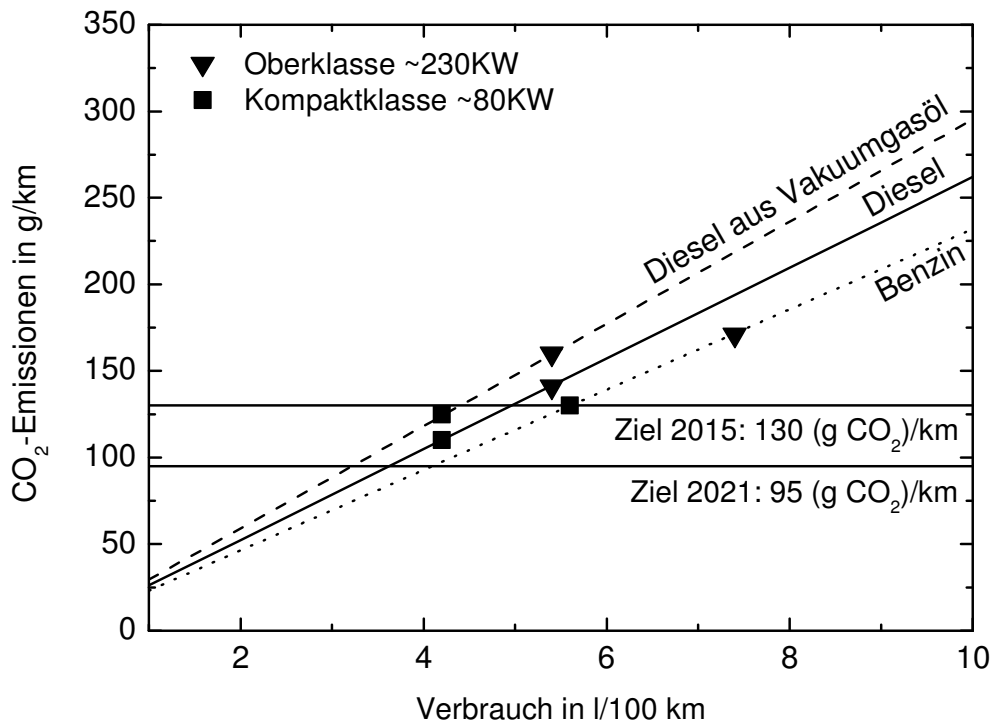


Abbildung 7: CO₂-Emissionen für verschiedene Fahrzeugklassen und Kraftstofftypen.

Es ist deutlich, dass Fahrzeuge der Kompaktklasse bereits heute das EU-Ziel für 2015 fast erreichen bzw. in der Dieselausführung heute bereits deutlich unterbieten. Wird der Diesel nun aus dem Vakuumgasöl gewonnen, ergibt sich ein Aufschlag von rund 13%. Dies hat zur Folge, dass die CO₂-Emissionen für Dieselfahrzeuge nun etwa gleichauf mit den vergleichbar motorisierten Fahrzeugen mit Ottomotoren liegen. Die Anforderungen für den durchschnittlichen Verbrauch von Dieselfahrzeugen zur Erzielung der EU-Ziele für 2015 müssen von 5 (l/100 km) unter Berücksichtigung der Nutzung von Vakuumgasöl auf rund 4,4 (l/100 km) gesenkt werden. Entsprechend muss für das mittelfristige Ziel, im Jahr 2021 die durchschnittlichen CO₂-Emissionen auf 95 g/km zu begrenzen, der Verbrauch für Dieselfahrzeuge von 3,6 l/(100 km) auf sogar 3,2 (l/100 km) gesenkt werden. Für Fahrzeuge der Oberklasse ergeben sich ganz analoge Werte, die in Abb. 7 mit dargestellt sind.

Eine korrekte Bewertung durch Ausweitung der Bilanzgrenze zeigt also, dass der Vorteil von Dieselfahrzeugen gegenüber Ottomotoren hinsichtlich der CO₂-Emissionen praktisch nicht vorhanden bzw. nur marginal ist. Vor diesem Hintergrund ist die massive steuerliche Begünstigung von Diesel gegenüber Benzin offensichtlich nicht zielführend. Da Dieselmotoren effizienter sind als entsprechende Ottomotoren sollten zur CO₂-Reduktion steuerliche Anreize gesetzt werden, die ein Verhältnis von Diesel- und Benzinfahrzeugen fokussieren, das dem natürlichen Produktionsspektrum von Erdöl entspricht. Dieses Diesel-Benzin-Verhältnis liegt in etwa bei 1:1,5.

Wenn die CO₂-Emissionen in vielen Bereichen, insbesondere bei der Stromerzeugung, weiter zurückgehen, wird die Bedeutung des CO₂-Fußabdrucks in den Hintergrund und dafür andere Kriterien in den Vordergrund rücken. Ein wesentliches Kriterium zur ökologischen

Bewertung ist die effiziente Nutzung von Ressourcen. Eine geeignete Bewertungsgröße basiert auf Exergiebilanzen mit denen thermodynamisch fundierte Aussagen zur Ressourceneffizienz hinsichtlich energetischer und stofflicher Nutzung getroffen werden können.

Unabhängig vom Bewertungsmaßstab haben die obigen Untersuchungen gezeigt, dass eine essentielle Randbedingung zur Technologiebewertung die Bilanzgrenze ist. Werden wesentliche Prozessschritte bei der Bewertung nicht berücksichtigt, können politische Maßnahmen zur Optimierung einer bestimmten Bewertungsgröße, beispielsweise zur Senkung der CO₂-Emissionen, sogar gegenteilige Effekte bewirken. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass sich durch diese Maßnahmen auch der relevante Bilanzraum ändern kann. So ist in dem hier betrachteten Beispiel die Erweiterung des Bilanzraums für die Bewertung von Diesel erst notwendig geworden, nachdem sich durch die gezielte Förderung von Diesel das Nachfrageverhältnis von Diesel und Benzin stark verändert hat.

Danksagung

Wir danken Herrn Dr. Alexander Buchsbaum (OMV R&M GmbH) ganz herzlich für die Anregung zum Thema, die Bereitstellung von Daten und für die anregenden fachlichen Diskussionen über die Ergebnisse.

Literatur

- AICHE, 2010. Design Institute for Physical Properties, DIPPR Project 801 - Full Version.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H., Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B. R., Grubb, G. F., Paulus, D. M., Sciubba, E., 2008. Exergy: Its Potential and Limitations in Environmental Science and Technology. *Environ. Sci. Technol.* 42 (7), 2221–2232.
- Frenzel, Ph., 2014: Bewertung von Syntheserouten auf Basis von Exergiebilanzen, Dissertation eingereicht, RWTH Aachen.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Cambridge University Press, Cambridge.
- International Energy Agency, 2011. Online via <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=WORLD&year=2011&product=Balances>, aufgerufen am 18.01.2014.
- Munsch, M.; Mohr, T.; Futterer, E. Exergetische Analyse und Bewertung verfahrenstechnischer Prozesse mit einem Flow-Sheeting-Programm *Chem. Ing. Tech.* **1990**, 62, 995-1002, DOI: 10.1002/cite.330621204
- Szargut J., Morris, D., Steward, F. *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*, Springer, New York, USA, 1989
- Tsatsaronis, G. Recent developments in exergy analysis and exergoeconomics *Int. J. Exergy* 2008, 5, 489-499.
- UNFCCC, 2000. National communications from Parties included in Annex I to the Convention - greenhouse gas inventory data from 1990 to 1998. United Nations Framework Convention on Climate Change.