

Ökobilanzen und Markteintritt von Brennstoffzellen im mobilen Einsatz

Life Cycle Assessment and Market Entry of Mobile Fuel Cell Systems

Martin Pehnt, Joachim Nitsch, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Stuttgart

Zusammenfassung. Brennstoffzellen als innovative Antriebssysteme bieten die Voraussetzung für eine effiziente und lokal schadstofflose/-arme Energieerzeugung in Elektrofahrzeugen. Die Beurteilung dieses neuen Antriebssystems sollte allerdings auf Basis einer Lebenszyklusanalyse (Ökobilanz) vollzogen werden, um die Umweltverträglichkeit aller Systemkomponenten zu gewährleisten, vor allem, da verschiedene Szenarien einen Anteil am PKW-Bestand von ca. 10 % in 2020 und somit eine recht hohe Marktdurchdringung vorhersagen. Eine solche Bilanz offenbart, dass Brennstoffzellen auf fossiler und regenerativer Wasserstoffbasis Vorteile bezüglich der Treibhausgase und des Ressourcenverbrauchs, besonders aber bezüglich schadstoffgetragener Umweltwirkungen bieten. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen mit fossilem Methanol als Kraftstoff ist dieser Vorteil geringer ausgeprägt. Die sich aus der ökologisch sehr verträglichen Nutzung ergebenden Vorteile werden allerdings durch die Herstellung der Brennstoffzellen-Antriebe – die aufwendiger als die der Verbrennungsmotoren ist – und die Bereitstellung der Kraftstoffe gemindert.

Abstract. Fuel cells as innovative power trains allow the efficient and locally emission free energy conversion for electric vehicles. The assessment of fuel cell vehicles must, however, be based on a life-cycle perspective, even more because several scenarios forecast a share of approximately 10 % of all passenger vehicles in 2020. LCAs of fuel cells show that based on fossil or renewable hydrogen, fuel cell vehicles are more efficient with respect to energetic resource consumption and greenhouse gases, but particularly with respect to impacts due to limited emissions such as NO_x and hydrocarbons. For fuel cell vehicles with methanol as a fuel, this advantage is less pronounced. The ecological advantages of fuel cell vehicle operation are reduced, however, by the environmentally more relevant production of the vehicles and fuels.

1 Verkehr – vom ungebremsten Wachstum zur wachsenden Zukunftsfähigkeit?

Im stetigen Wachstum der Anzahl der Fahrzeuge und der Fahrleistungen im Verkehr finden das ausgeprägte Bedürfnis der Menschen nach Mobilität, ihr wachsender Wohlstand und

der anschwellende Warenstrom einer expandierenden, globalisierten Wirtschaft ihren unübersehbaren Ausdruck. In den alten Bundesländern hat sich beispielsweise die Verkehrsleistung im Individualverkehr zwischen 1950 und 1990 verzwanzigfacht, die Zahl der PKW stieg auf das Fünzigfache [1]. Dieser starke Zuwachs entstand nur in geringem Ausmaß durch Verlagerung vom öffentlichen Verkehr, sondern überwiegend durch Neuverkehr aufgrund der Wirtschaftsentwicklung, der Erschließung des ländlichen Umlandes für Produktionsstätten und Wohnungen sowie durch ein stark mobilitätsorientiertes Einkaufs- und Freizeitverhalten. Heute (1998) beträgt die Verkehrsleistung aller PKW/Kombi in Deutschland 765 Mrd. Pkm/a (> 80 % der gesamten Verkehrsleistung im Personenverkehr) bei 41,7 Mio. PKW. Auch zukünftig werden weiterhin wachsende Fahrzeugzahlen und Verkehrsleistungen erwartet [2, 3].

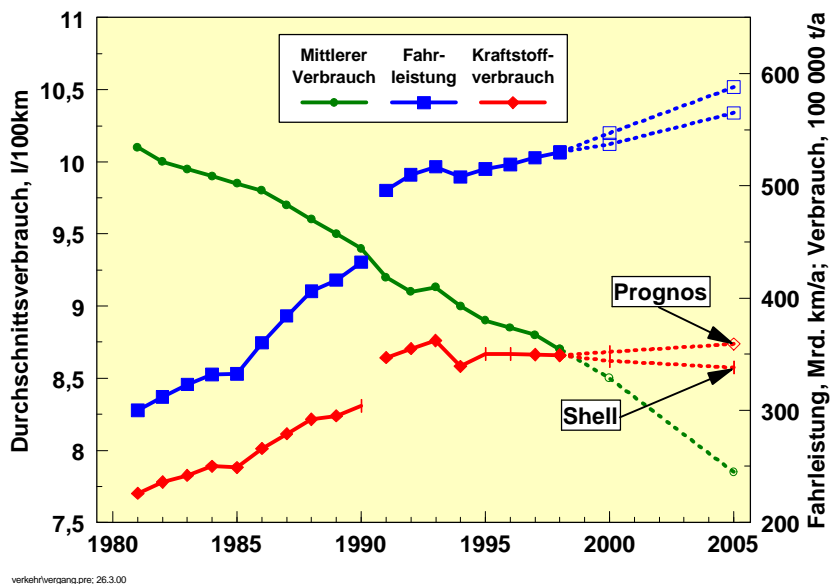


Abbildung 1 Verlauf von Fahrleistung, Durchschnitts- und Gesamtkraftstoffverbrauch der deutschen PKW zwischen 1980 und 1998 und Tendenzen für die nächsten 5 Jahre [2-4]

Figure 1 *Driving distances, average specific and total fuel consumption of German passenger vehicles*

Diesen Wachstumstendenzen folgend stiegen in der Vergangenheit Kraftstoffverbrauch und verkehrsbedingte Emissionen ebenfalls kräftig. Mit knapp 3.000 PJ/a benötigt der Verkehr derzeit 21 % des gesamten Primärenergieverbrauchs und ist mit 180 Mio. t CO₂/a für 20 % der Kohlendioxidemissionen verantwortlich (davon Straßenverkehr wiederum 90 %). Sein Anteil ist wegen des relativ stärkeren Wachstums stetig gestiegen. Diese aus Umwelt- und Ressourcensicht unerfreulichen Tendenzen haben seit längerem einen starken Druck auf die Weiterentwicklung von Fahrzeugen und Antrieben ausgeübt, um Energieverbrauch

und Emissionen zu mindern bzw. deutlich zu verringern. Am deutlichsten kommt dies im Rückgang der lokalen Emissionen von Luftschadstoffen wie Kohlenmonoxid, Stickoxiden, Benzol, Kohlenwasserstoffen und Dieselpartikeln zum Ausdruck. Stiegen diese bis etwa 1990 noch stetig an, so sind sie seither infolge deutlich verschärfter Abgasvorschriften und dadurch hervorgerufener neuer Motor- und Abgastechnologien und sauberer Kraftstoffe deutlich zurückgegangen. Die weitere Absenkung der Abgasgrenzwerte (Euro 4,5; SULEV) werden diese Emissionen zukünftig auf etwa ein Zehntel ihrer Spitzenwerte von Anfang der 90er Jahre sinken lassen und somit einen Teil der verkehrsbedingten Umweltbelastungen erheblich reduzieren.

Energieverbrauch und damit Kohlendioxidemissionen folgen dieser erfreulichen Entwicklung bisher nicht (**Abbildung 1**). Der spezifische Durchschnittsverbrauch der deutschen PKW-Flotte sank seit etwa 1980 lediglich von über 10 l pro 100 km auf heute 8,7 l pro 100 km. Höhere Fahrzeuggewichte und größere Leistungen kompensierten einen großen Teil der möglichen Energieeinsparungen. Immerhin stagniert der Kraftstoffverbrauch seit etwa 1995. Man kann also im Personenstraßenverkehr von einer beginnenden Entkopplung von (wachsender) Verkehrsnachfrage und Kraftstoffverbrauch reden, wie es in der gesamten Energieversorgung bereits seit 1973 der Fall ist. Die fahrzeugspezifischen Reduktionsmöglichkeiten sind jedoch nach wie vor beträchtlich. Greift die Selbstverpflichtung der deutschen Automobilindustrie, bis zum Jahr 2008 den durchschnittlichen Normverbrauch aller neuen PKW um 25 % gegenüber dem Stand von 1990 zu reduzieren – was dann einem mittleren Flottenverbrauch bei Neufahrzeugen von 6 l/100 km entspricht - so ist trotz deutlich wachsender Fahrleistung mit einem nur noch schwachen Anstieg [3], möglicherweise sogar leichten Rückgang des Kraftstoffverbrauchs [2] und damit auch der CO₂-Emissionen in den nächsten Jahren zu rechnen. Dies ist zwar eine erfreuliche Tendenz, reicht jedoch nicht aus, um den vom Sektor Verkehr insgesamt zu erbringenden Beitrag einer deutlichen Reduktion von CO₂-Emissionen zu leisten, zumal im Güterverkehr vorerst ähnliche Tendenzen nicht zu erwarten sind.

Soll also der Verkehr deutliche Schritte in Richtung einer wachsenden Nachhaltigkeit tun, so sind in verstärktem Ausmaß **alle** Möglichkeiten der Verringerung des Ressourcenverbrauchs auszuschöpfen. Die technologischen Potenziale auf der Basis verbesserter und neuartiger Antriebe, leichter Fahrzeuge und neuer Kraftstoffe können dazu zweifellos einen beträchtlichen Beitrag liefern, wenn es um die Reduktion von Energie und Klimagasemissionen geht. Doch sind auch alle anderen Maßnahmen der Minderung von Verkehrsbelastungen, also Vermeidung zusätzlicher oder „unsinniger“ Verkehrsleistung, Substitution

von (materiellem) Verkehr und Verlagerung auf andere Verkehrsträger (insbesondere im Güterverkehr) zu ergreifen, wenn andere negative Auswirkungen des menschlichen Mobilitätsbedürfnisses, wie Flächenverbrauch, Lärm und Unfallschäden verringert werden sollen und damit der Verkehr zukunftsfähiger und die von uns allen gewünschte Mobilität nachhaltiger werden soll.

Bezüglich der Umwelteinwirkungen wird **Brennstoffzellen** ein hohes Potenzial zugemessen. Zahlreiche Automobilfirmen unternehmen Anstrengungen, diese innovative Technologie als neuen Antrieb durchzusetzen und die entsprechenden Implikationen insbesondere hinsichtlich der Kraftstoffbereitstellung abzufedern. Eine **Markterschließung** mit Brennstoffzellenfahrzeugen kann je nach den gewählten Parametern sehr unterschiedliche Ausmaße annehmen. Sie hängt wesentlich vom Zeitpunkt der Markteinführung, dem insgesamt erreichbaren Marktpotenzial und der Wachstumsrate, mit der dieses Marktpotenzial erschlossen wird, ab. Es verwundert daher nicht, dass die vorliegenden Szenarien zur Markteinführung einen weiten Bereich überdecken (**Abbildung 2**).

Voraussetzungen für eine günstige Entwicklung sind kurzfristig erreichbare technische Reife, geringe Chancen anderer neuer Antriebskonzepte, eine hohe Akzeptanz der Käufer (auch im Vergleich zu effizienten konventionellen Antriebskonzepten, z.B. 3-Liter-PKW auf Basis des Verbrennungsmotors), ein zielstrebiges Ausbauen der Infrastruktur und das erklärte politische Ziel, tendenziell die Brennstoffzelle bei umweltpolitischen Zielsetzungen zur Reduktion von Emissionen im Verkehrsbereich zu bevorzugen.

Die Shell-Szenarien [2] gehen von einer intensiven und raschen Marktdurchdringung aus. Im optimistischen Szenario „Neue Ordnung“ fahren im Jahr 2010 bereits 700.000 BZ-PKW (1,5 % des Bestandes), im Jahr 2020 sind es mit gut 10 Mio. PKW bereits 20 % des Bestandes.

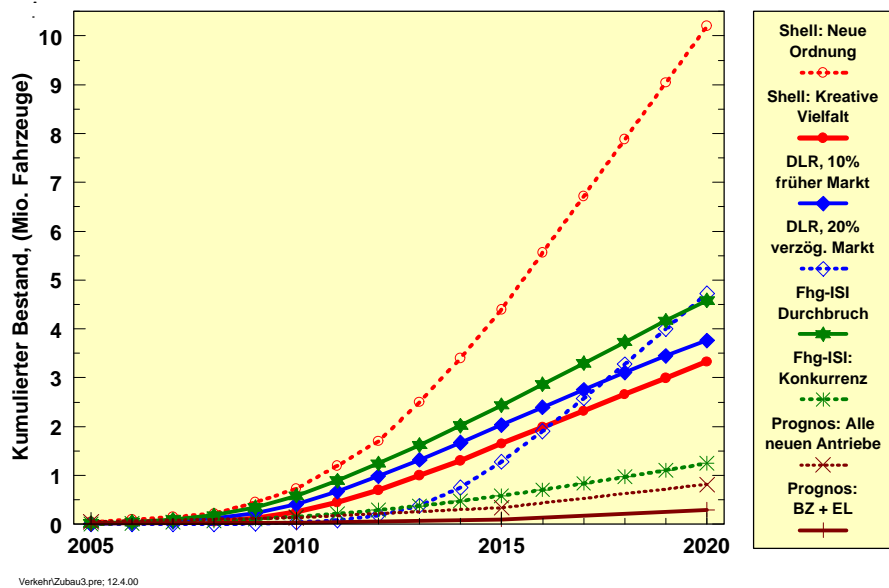


Abbildung 2 Szenarien der Bestandsentwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen bis zum Jahr 2020 ([2, 3, 5]; eigene Berechnungen). Gesamtbestand (Mio PKW): 1999 = 42,4; 2010 = 47, 2020 = 48.

Figure 2 Scenarios of fuel cell production until 2020

Im Szenario „Kreative Vielfalt“ verzögert sich die Markteinführung, führt aber mit 3,3 Mio. PKW (= 7 %) im Jahr 2020 zu einer ähnlichen Größenordnung wie das optimistische Szenario des ISI [5].

Als frühester Zeitpunkt einer Markteinführung wird von der Automobilindustrie das Jahr 2004 angestrebt. Angesichts der noch offenen Frage der Kraftstoffinfrastruktur und der Existenz lediglich einzelner Demonstrationsfahrzeuge zum jetzigen Zeitpunkt ist dies eine sehr ehrgeizige Zeitmarke. Auch spätere Zeitpunkte sind also in Betracht zu ziehen. Auch die Höhe des erreichbaren Marktsegments ist sehr unsicher. Eine rasche und sehr weitgehende Verdrängung des Verbrennungsmotors ist eher unwahrscheinlich und erst zu erwarten (und auch sinnvoll), wenn Kraftstoffe auf der Basis erneuerbarer Primärenergien in ausreichendem und preisgünstigem Maße zur Verfügung stehen. Geht man beispielsweise von einem Marktpotenzial von 25 % der Neuzulassungen im Marktsegment bis etwa 55 kW für Brennstoffzellenfahrzeuge aus, so ergibt sich beispielsweise ein Marktpotenzial von 370.000 Fahrzeugzulassungen pro Jahr, also rund 10 % des heutigen Marktes. Dieses Marktpotenzial wird jedoch nicht auf Anhieb erschlossen werden können, der Markt wird tendenziell exponentiell wachsen. Unterstellt man z.B. eine 50 %-ige Erschließung nach 6 Jahren (185 000 Fahrzeuge/Jahr in 2010) und einen weiteren Verlauf entsprechend einer logistischen Wachstumskurve, so wird das volle Marktpotenzial erst um das Jahr 2020

erreicht. Die entsprechenden Bestandszahlen lauten 0,4 Mio. PKW in 2010 und 3,75 Mio. PKW in 2020. Diese Entwicklung liegt zwischen dem optimistischen Szenario des ISI und dem eher zurückhaltenden Szenario von Shell. Im zweiten Szenario „Verzögerter Markt, 20 %“ (**Abbildung 2**) beginnt der Markteintritt erst im Jahr 2008, das Marktwachstum erfolgt jedoch rascher und das erreichbare Marktsegment wird mit 20 % höher angesetzt. Im Jahr 2010 sind daher erst 40.000 BZ-Fahrzeuge in Betrieb. Bis etwa 2014 gleicht dieses Szenario den pessimistischen Szenarien von ISI und Prognos; ab dem Jahr 2018 übertrifft aber das Szenario mit 3,2 Mio. PKW bereits den Bestand der optimistischen Szenarien von ISI und des Szenarios „Früher Markt, 10 %“.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die eher optimistischen Szenarien für 2010 von Jahresumsätzen von 180 000 bis 250 000 Fahrzeugen und für 2020 von einem Bestand von 3,5 bis 4,5 Mio. BZ-Fahrzeugen ausgehen (also rund 8 % des zu diesem Zeitpunkt erwarteten Gesamtbestands), während vorsichtige Schätzungen maximale Werte um 1 Mio. Fahrzeuge (= 2 %) zu diesem Zeitpunkt annehmen. Automobilkonzerne halten eine Stückzahl von 100 000 Fahrzeugen/Jahr für das Jahr 2010 für realistisch. Vor diesem Hintergrund sind die in [2] angenommenen Maximalwerte von 10 Mio. Fahrzeugen (2020) bzw. 0,8 Mio. (2010) sehr unwahrscheinlich.

Eine Einführung neuer Antriebssysteme in der geschilderten Größenordnung ist nicht zuletzt abhängig von den damit verbundenen ökologischen Folgewirkungen. Begleitet werden sollte sie daher durch ökobilanzielle Untersuchungen zur Absicherung der Umweltverträglichkeit des Gesamtsystems. Im folgenden sollen diesbezügliche Analysen vorgestellt werden.

2 Ökobilanzen als Instrument der ökologischen Beurteilung von Produkten

Ökobilanzen untersuchen Produkte und Dienstleistungen entlang ihres Lebensweges hinsichtlich der mit den Untersuchungsgegenständen verbundenen Umweltaspekte. Die ökologische Untersuchung von Produkten im Rahmen einer Ökobilanz ist in internationalen Normen bezüglich gewisser abzudeckender Grundanforderungen definiert [6]. Die methodische Vorgehensweise lässt sich in vier Teilschritte untergliedern (**Abbildung 3**).

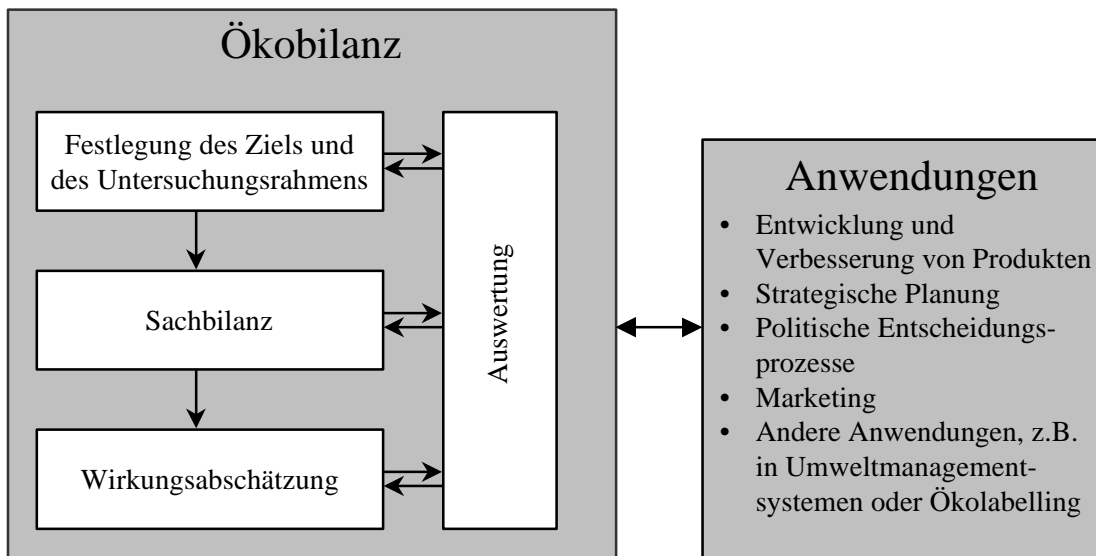


Abbildung 3 Vorgehensweise einer Produktökobilanz [6]

Figure 3 *Product Life Cycle Assessment*

Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. Die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens beschreibt die Bilanzierungsobjekte und führt die Gründe für die Durchführung der Studie, die Zielgruppen und Anwender der Bilanz und Systemannahmen, wie beispielsweise die gesetzten Systemgrenzen, auf. Entscheidungen für die Erfassung oder Vernachlässigung verschiedener Module oder Flüsse müssen offengelegt und begründet werden. In der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens wird die funktionelle Einheit definiert, die den "quantifizierten Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit in einer Ökobilanz-Studie" [6] beschreibt. Alle In- und Outputs werden auf die funktionelle Einheit bezogen. Bei der Bestimmung der funktionellen Einheit muß auf eine möglichst hohe Nutzengleichheit der verschiedenen Analyseobjekte geachtet werden.

In diesem ersten Schritt der Ökobilanz werden zudem die Anforderungen an die Datenqualität, also beispielsweise der zeit- oder ortsbezogene Erfassungsbereich, die Konsistenz und Repräsentativität der Daten, die Unsicherheit der Informationen und die Art der kritischen Prüfung der Bilanz dargelegt. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Schrittes ist die Festlegung der ausgewerteten Umweltwirkungen (Wirkungskategorien; s. u.).

Sachbilanz. Die Sachbilanz liefert eine möglichst unbewertete Erfassung der Energie- und Stoffflüsse innerhalb des Analysegebietes sowie die Berechnungsprozeduren der relevanten In- und Outputs. Dies können verbrauchte oder produzierte Güter, aber auch Emissio-

nen, Abfallströme etc. sein. Erfasst werden in der Regel sämtliche Phasen des Lebensweges, also die Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Systeme, die Bereitstellung der Energieträger sowie die für die Modellierung der Systeme notwendigen Parameter.

Wirkungsabschätzung. Die „Beurteilung der Bedeutung potentieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz“ [6] geschieht in der *Wirkungsabschätzung*. Die Wirkungsabschätzung aggregiert die einzelnen Flüsse b_i in die Biosphäre durch Multiplikation mit Charakterisierungsfaktoren $U_{i,j}$ für eine Substanz i zu einer Umweltwirkung j :

$$U_j = \sum_i b_i \cdot U_{i,j} \quad (i = 1, \dots, x)$$

Diese Charakterisierungsfaktoren bewirken eine Aggregation der Daten von vielen hundert In- und Outputs auf ausgewählte Größen. Die In- und Outputs einer Bilanz können unterschiedlichen Wirkungskategorien, d. h. unterschiedlichen Formen von Umweltwirkungen (z. B. Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, etc.), zugeordnet werden. Innerhalb dieser Kategorien können die Flüsse u. U. mit Hilfe international diskutierter Charakterisierungsfaktoren auf eine vergleichbare Bezugsgröße umgerechnet werden.

Der nächste und nach [7] optionale Schritt kann eine Normierung der Ergebnisse umfassen, das heißt die Umweltwirkungen pro funktioneller Einheit werden auf Referenzumweltwirkungen (z. B. die täglichen Pro-Kopf-Wirkungen in Deutschland) bezogen. Die Ordnung oder Rangbildung der Wirkungskategorien bzw. die Gewichtung der Ergebnisse mit quantitativen Gewichtungsfaktoren sind weitere wahlweise Bestandteile der Wirkungsabschätzung.

Auswertung. Die anschließende Auswertung faßt die "Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung entsprechend dem festgelegten Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz [zusammen], um Schlußfolgerungen und Empfehlungen zu geben" [6].

3 Ökobilanzen von Brennstoffzellen

Der Lebenszyklus von Brennstoffzellen (**Abbildung 4**) umfaßt die Produktion der Systeme, die Bereitstellung der Kraftstoffe, die Betriebsphase sowie die Entsorgung bzw. das Recycling am Ende der Lebensdauer.

Im Folgenden werden die Randbedingungen der dargestellten Bilanz zusammengefasst.

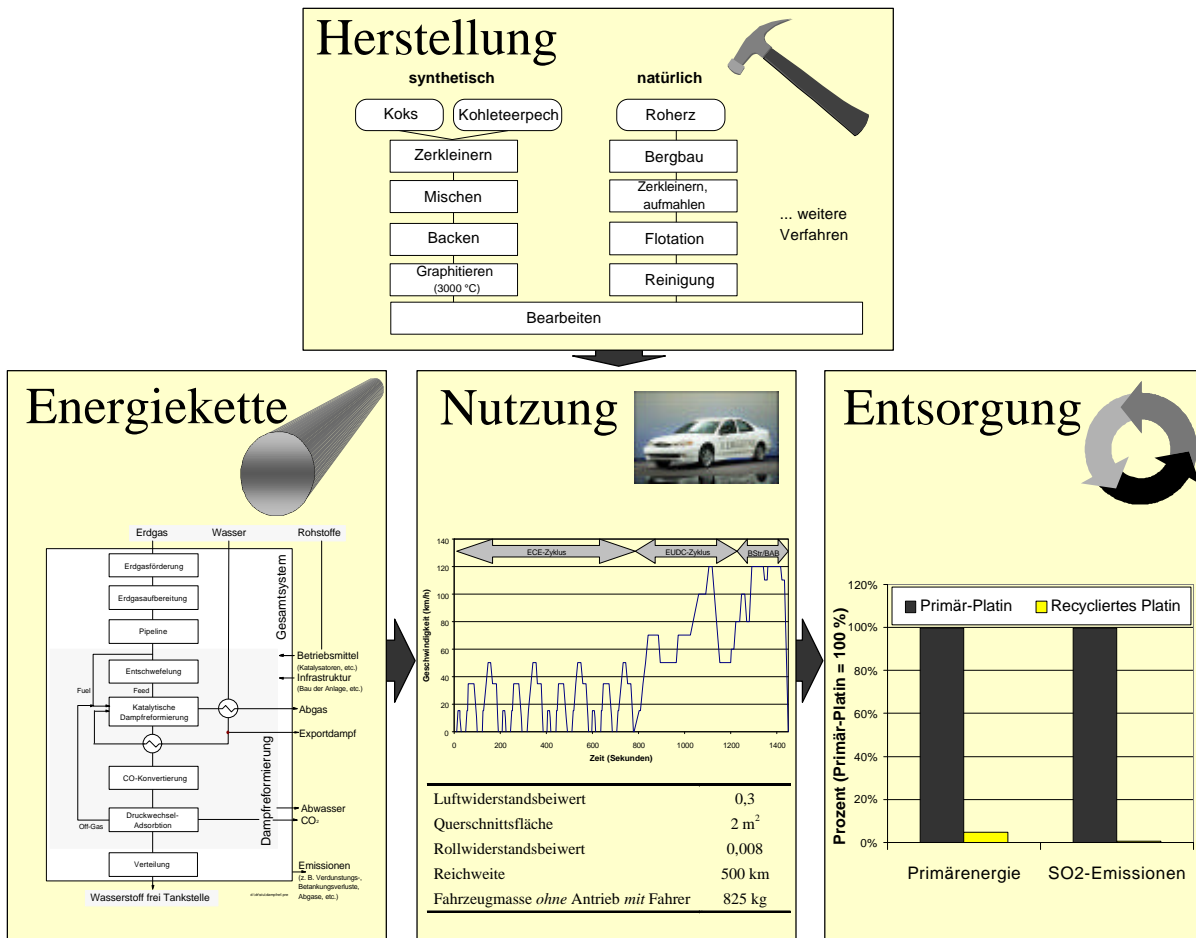


Abbildung 4 Lebenszyklus von Brennstoffzellen und exemplarische Systemaspekte

Figure 4 Life Cycle of fuel cells and selected system aspects

Untersuchungsgegenstand

In [8] werden unterschiedliche Brennstoffzellensysteme in stationären und mobilen Anwendungen bilanziert (siehe auch [9]). Hier werden ausschließlich die Ergebnisse der mobilen Systeme vorgestellt. Funktionelle Einheit der Bilanzen ist die Bereitstellung eines MJ (H_u) Kraftstoff frei Tankstelle bzw. Nutzer (Kapitel 4), die Herstellung eines Gesamtfahrzeuges (Kapitel 5) bzw. ein Fahrkilometer in einem gemischten Fahrzyklus (Kombination aus NEFZ und Autobahnfahrt) mit einem PKW (Leergewicht 750 kg).

Geographischer Bezug

Der Bezugsraum für die Bilanz ist Deutschland, d. h. die Produktion bzw. der Transport der Energieträger, die Herstellung und Nutzung der Systeme sind in Deutschland lokalisiert.

Zeitlicher Bezug

Um den zukünftigen Zeitpunkt der Einführung von Brennstoffzellen angemessen repräsentieren zu können, wird als Bezugszeitpunkt das Jahr 2010 angesetzt. Alle Prozesse, auch die Zusammensetzung der Primärenergieträger und die Bilanz der konventionellen Systeme, nehmen auf dieses Jahr Bezug. Dies bedeutet gleichzeitig, dass auch den konventionellen Systemen ein Optimierungspotenzial zuzugestehen ist.

Datenherkunft und -qualität

Die Daten für die Bereitstellung der Kraftstoffe beruhen auf Angaben der Anlagenhersteller, auf statistischen Auswertungen von Energiebilanzen und Betreiberangaben sowie aus der Literatur. Die Datenqualität für diese Lebenszyklusphase ist als groß zu bezeichnen.

Für die Herstellung der Systeme stand für die Basismaterialien eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung, die im Laufe einiger Jahre am DLR aufgebaut wurde. Hierzu wurden insbesondere Brennstoffzellen-spezifische Materialien mit Daten von Minenbetreibern, chemischer und Anlagenindustrie bilanziert. Für konventionelle Materialien wurde auf die Datenbank GaBi 3 Professional der Universität Stuttgart zurückgegriffen. Die Herstellung des Verbrennungsmotors beruht auf einer ausführlichen Ökobilanz in [10, 11], die mit derselben Datenbank ausgeführt wurde. Die Herstellung von Brennstoffzellen-Stacks wurde mit Daten des Herstellers Ballard für zukünftige Stacks durchgeführt [12]. Lediglich die Angaben für die Peripherie von Brennstoffzellenfahrzeugen beruhen auf Literaturangaben und Abschätzungen [13-15]; für diese ist die Datenqualität als niedrig zu bezeichnen.

Die Nutzung des Fahrzeuges wurde mithilfe verfahrenstechnischer und Systemmodellierungen bestimmt [16, 17], mittels nachmodellierter Pilotfahrzeuge verifiziert und mit Literaturangaben verglichen [15].

Untersuchte Wirkungskategorien

Aus Gründen der Transparenz und Darstellbarkeit werden in dieser Veröffentlichung fünf Wirkungskategorien exemplarisch vorgestellt.

Verbrauch erschöpflicher energetischer Ressourcen. Der Ressourcenverbrauch wird nicht aufgrund der damit zusammenhängenden Umweltauswirkungen erfaßt - diese sind in anderen Wirkungskategorien erfaßt -, sondern aufgrund der Erschöpflichkeit der Ressourcen als schützenswertem Gut. Exemplarisch werden in dieser Arbeit erschöpfliche energetische Ressourcen betrachtet. Die Gewichtung der Ressourcen erfolgt über den Energieein-

halt, der mit den besten verfügbaren Technologien extrahierbar ist. Bei fossilen Energieträgern wird hierzu der obere Heizwert H_o der den Lagerstätten entnommenen Energieträger angesetzt. Bei Uranerz wird die theoretische Spaltungswärme unter Berücksichtigung des energetisch nutzbaren abgereicherten und Rest-Urans herangezogen.

Treibhauseffekt. Den in den Strahlungshaushalt eingreifenden anthropogenen Treibhausgasen wird ein relatives Treibhauspotential (GWP) zugeordnet, das die Klimawirksamkeit in Beziehung zu der von Kohlendioxid setzt. Die GWP-Faktoren (Integrationszeitraum 100 Jahre) sind an Empfehlungen des IPCC angelehnt. Bewertet werden CO_2 , CH_4 (21 kg CO_2 -Äq./kg CH_4) und N_2O (310 kg CO_2 -Äq./kg N_2O). Die biogen bedingten CO_2 -Emissionen, d. h. die bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzten CO_2 -Emissionen, werden nicht als treibhauswirksam verbucht, da der Kohlenstoff bei der photosynthetischen Aktivität der Biomasse zuvor gebunden wurde. Für das biogene CH_4 wird beim Treibhauspotential berücksichtigt, dass in der Biomasse CO_2 gebunden war.

Versauerung. Verschiedene Gase, insbesondere Stickoxide, Schwefeldioxid und Ammoniak, tragen zu einem verringerten pH-Wert des Bodens und der Gewässer bei. Die Quantifizierung geschieht mittels des Versauerungspotentials, das die S-, N- und Halogenatome in Beziehung zu der Molekülmasse setzt [18].

Sommersmog. Bei austauscharmer Wetterlage und bei hoher Sonneneinstrahlung und Umgebungstemperatur bilden sich photochemische Oxidantien. Voraussetzung ist das Vorhandensein von Primärschadstoffen, insbesondere Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen, die sich mit einem Stoßpartner bzw. über eine Kette von Reaktionen in Ozon umwandeln. In einem zweiten Schritt reagiert das Ozon mit Vorläuferschadstoffen. Aufgrund der Datenverfügbarkeit der Reaktivitätsdaten und der Relevanz dieses Sektors wird Sommersmog mittels MIR-Faktoren ("maximum incremental reactivity") ermittelt [19], die bei bodennaher Atmosphäre in Stadtnähe repräsentativ für die Ozonbildung sind. Da Emissionsdaten in der Regel als aggregierte NMHC-Werte vorliegen, werden die über die einzelnen Emissionskomponenten i gewichteten MIR-Faktoren aus Durchschnittsprofilen der Literatur bestimmt.

Kanzerogenität. Aufgrund der großen Bedeutung der Mobilität für die Entstehung kanzerogener Stoffe wird schließlich diese Wirkungskategorie aufgeführt. Die Grundlage für die

Bestimmung der kanzerogenen Wirkung liefert [20]. Als Basis der Aggregation werden dort sogenannte Unit Risk Faktoren ausgerechnet, die das geschätzte Krebsrisiko eines Menschen bei 70jähriger Aussetzung gegen eine Konzentration von 1 µg Schadstoff pro m³ Atemluft quantifizieren. Damit kann Benzol, Benzo(a)pyren, Formaldehyd und Dieselpartikeln (abgekürzt: Partikel) eine kanzerogene Wirkung zugewiesen werden.

Räumliche Differenzierung. Um dem räumlichen Anfall der Flüsse im Fall lokal wirksamer Umweltwirkungen Rechnung zu tragen und somit der Analyse von Wirkungen anstelle möglicher Wirkungen näherzukommen, wird eine Differenzierung in Ortsklassen (OK) in Analogie zu [21] vorgenommen, nämlich bezüglich Gebiete hoher (OK 1), mittlerer bis niedriger (OK 2) und äußerst niedriger Bevölkerungsdichte (OK 3).

Ortsklasse 3 tritt in diesem Kontext vor allem durch Emissionen von Hochseetankern und Offshore-Förderung auf. Die räumliche Differenzierung kann einen Anhaltspunkt über die schädigende Wirkung dieser Emissionen bieten, auch wenn für eine genauere Analyse verschiedene Transmissionspfade untersucht werden müßten. Für die Bewertung lokaler Effekte, z. B. der Versauerung und des Sommersmog, werden in Anlehnung an [21] die Anteile der OK 1 und 2 und 25 % der Emissionen in OK 3 angerechnet.

Normierung. Zusätzlich werden die Ergebnisse der Gesamtbilanzen in Personenäquivalenzen angegeben, das heißt die Umweltwirkungen werden durch die täglichen Pro-Kopf-Umweltwirkungen in Deutschland geteilt. Auf diese Weise erhält man eine Einordnung der Relevanz der Aktivität (hier ein Fahrkilometer) für die Gesamteinwirkungen in Deutschland.

4 Die Kraftstoffe

Eine Reihe unterschiedlicher Kraftstoffoptionen muß hinsichtlich ihrer ökologischen Eigenschaften untersucht werden (**Abbildung 5**). Jeder Kraftstoff besteht dabei aus einer Vielzahl einzelner Prozessschritte (siehe z. B. **Abbildung 4**, "Energiekette"), die

- Exploration, Förderung, Aufbereitung und Transport der Primärenergieträger
- Umwandlung in Endenergieträger
- Transport und ggf. Aufbereitung (Verdichtung, Verflüssigung, etc.)

umfassen. Zusätzlich wird

- die Produktion der notwendigen Infrastruktur (Anlagen-, Pipelinebau, etc.)

berücksichtigt.

Aufgrund der Vielzahl der untersuchten Ketten kann hier nicht auf Einzelheiten eingegangen werden; hierzu sei auf [8] verwiesen. Zusammenfassend lassen sich jedoch Parameter isolieren, die die Bilanz der Kraftstoffe beeinflussen:

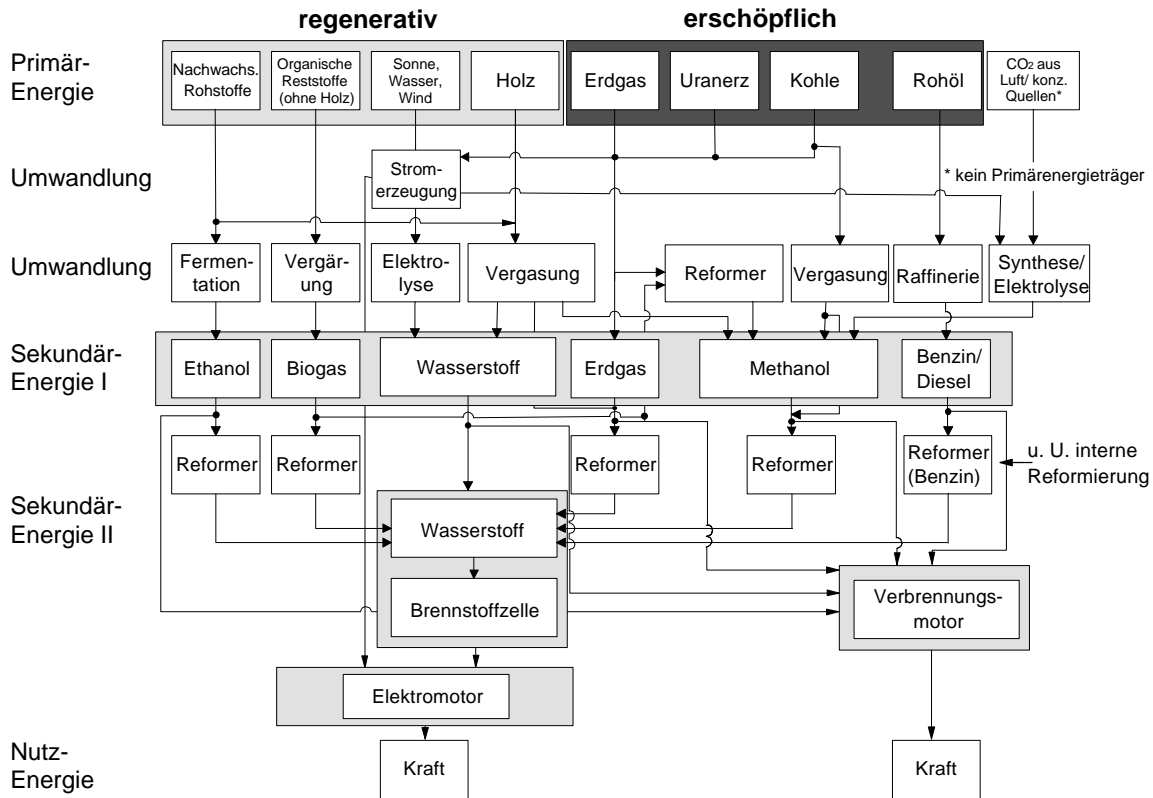


Abbildung 5 Mögliche Kraftstoffe zur Versorgung von Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen und ihre Energieketten

Figure 5 *Fuels for internal combustion engines and fuel cells and the respective supply paths*

- Vor allem entscheidet die **Wahl des Primärenergieträgers** über die Höhe der Umweltwirkungen. Erdgas als kohlenstoffarmer Primärenergieträger führt zu geringeren CO₂-Emissionen pro Energieeinheit als Rohöl. Aus Erdgas hergestellter Wasserstoff und Methanol profitieren beispielsweise davon. Dies genügt jedoch nicht, um den geringeren Wirkungsgrad der Umwandlungsprozesse (s. u.) aufzuheben. Bei der fossilen Wasserstoffproduktion entsteht das CO₂ allerdings fast ausschließlich am Ort der Herstellung. Dies könnte sich längerfristig als vorteilhaft erweisen, da eine Entsorgung von CO₂ bei der Produktion aus fossilen Primärenergieträgern z. B. in Aquiferen, Mineralien oder erschöpften Erdgasquellen wesentlich einfacher ist als bei der Nutzung von Methanol (bei der der Großteil des CO₂ dezentral in den Fahrzeugen anfällt).

Nahezu völlig treibhausneutral ist die Verwendung von Biomasse. Nur die Bereitstellung des Holzes und die Transporte führen zu einem fossilen Energieeinsatz von 5 bis 13 % des Brennwertes des Kraftstoffs. Auch aus regenerativem Strom hergestellter Wasserstoff weist nur minimale Treibhausemissionen auf.

- Zweitens ist der **verfahrenstechnische Aufwand** der Umwandlung der Primärenergieträger in den Endenergieträger unterschiedlich. Die Bereitstellung von Benzin oder Diesel beispielsweise ist weniger energieaufwendig als die Erzeugung von Methanol und Wasserstoff aus Erdgas. Damit die Treibhausbilanz der beiden letzteren Kraftstoffe in einem Brennstoffzellenfahrzeug günstiger im Vergleich zum Benzinmotor ist, müssen die Antriebe mindestens 10 bis 15 % bzw. 2 bis 3 Prozentpunkte effizienter sein.
- Hinzu kommen drittens unterschiedlich umweltwirksame **vorgelagerte Prozeßschritte**, z. B. die Exploration und Förderung des Primärenergieträgers, und nachgelagerte Aufwendungen, z. B. unterschiedliche Transportmedien (Tanker, LKWs, Pipelines, etc.) und -distanzen, die den Wirkungsgrad der Gesamtkette reduzieren und zu weiteren Emissionen führen. Vor allem in schadstoffbezogenen Wirkungskategorien, beispielsweise der Versauerung, machen sich die vorgelagerten Prozeßschritte bemerkbar. Bei diesen Wirkungskategorien sind die regenerativen Kraft- und Brennstoffe nicht zwangsläufig vorteilhaft gegenüber fossilen Ketten.
- Viertens können die Umweltwirkungen der Kraftstoffbereitstellung durch **effiziente Nutzung von Kuppelprodukten** reduziert werden. Im Kværner-Carbon Black & Hydrogen (CB&H)-Prozeß wird beispielsweise das Kohlenstoffatom, das bei der Umwandlung von Methan in Wasserstoff freigesetzt wird, in Form von Ruß genutzt. Das C-Atom wird somit nicht zu CO₂ oxidiert und außerdem wird die zusätzliche Produktion von Ruß, das oftmals aus Öl erzeugt wird, vermieden.

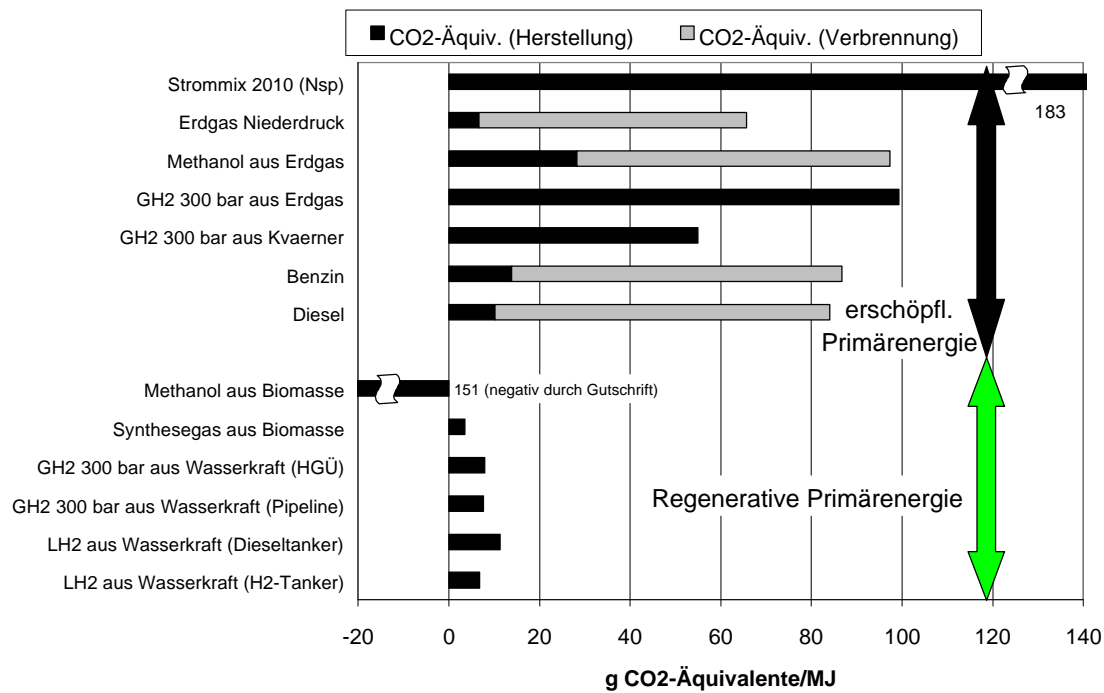
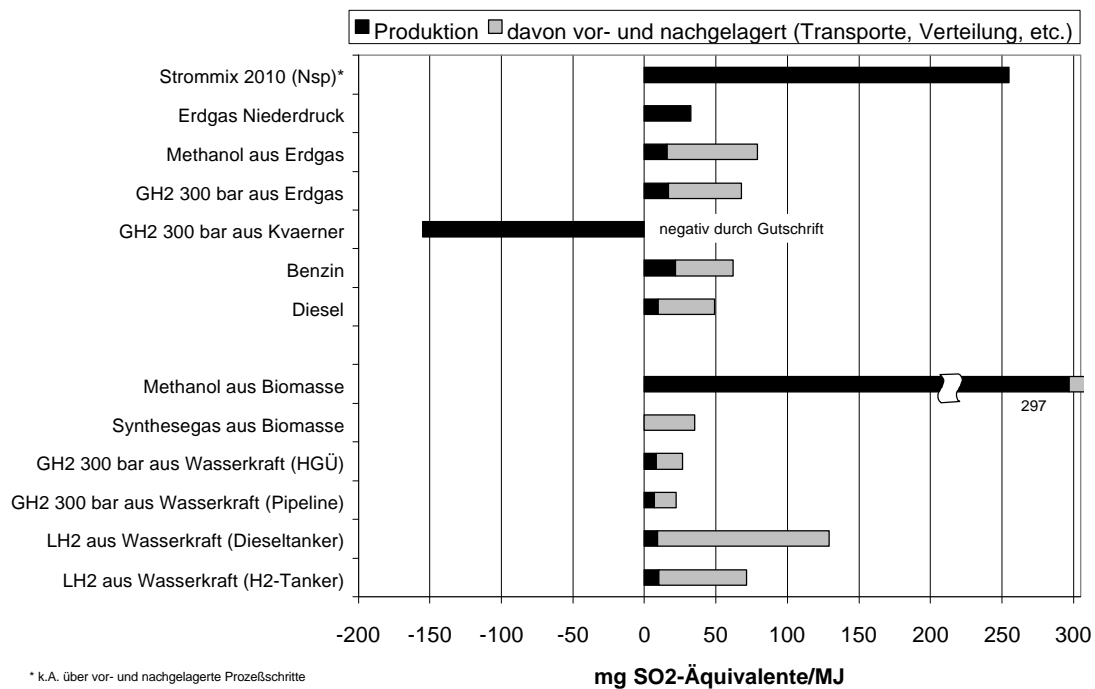


Abbildung 6 Emission von Treibhausgasen durch Produktion und Bereitstellung von Brenn- und Kraftstoffen (bezogen auf 1 MJ_{el} bzw. 1 MJ H_u)

Figure 6 Emission of greenhouse gases by production and combustion of fuels



* k.A. über vor- und nachgelagerte Prozessschritte

Abbildung 7 Versauerung durch Produktion und Bereitstellung von Brenn- und Kraftstoffen (bezogen auf 1 MJ_{el} bzw. 1 MJ H_u)

Figure 7 *Emission of acidifying gases by production and combustion of fuels*

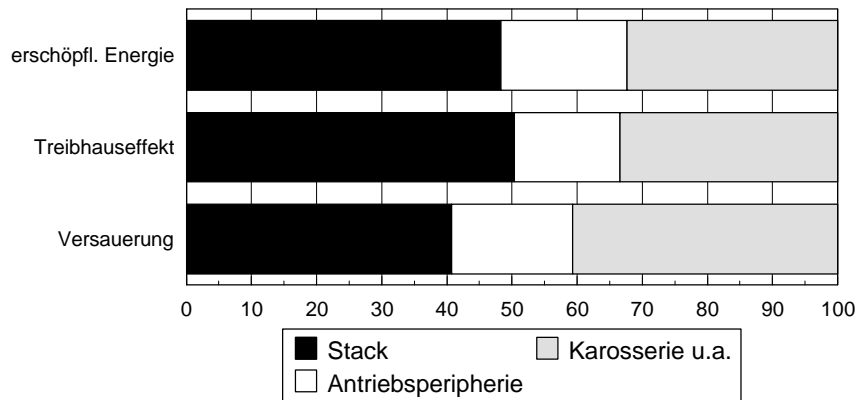
5 Die Herstellung der Fahrzeuge

Die Herstellung der Fahrzeuge umfaßt die Bereitstellung der Basismaterialien und die Verarbeitung dieser Materialien zu Halbzeugen und Bauteilen. Der Recyclinganteil der Materialien wurde gemäß deutscher Durchschnittsanteile bestimmt. Für die Brennstoffzelle (PEFC) von besonderer Relevanz ist die Bereitstellung der Platingruppenmetalle (PGM) als Katalysatoren sowie Grafit als Einsatzstoff für Bipolarplatten. Für den Anteil des PGM-Recyclings wurde angenommen, dass 75 % rezykliert werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nicht nur die technische Recyclingquote (die deutlich über 90 % liegen kann), sondern auch der Anteil der Fahrzeuge, die nicht dem Recyclingkreislauf zur Verfügung stehen (Export in Länder ohne Infrastruktur, etc.), sowie in den ersten Dekaden dynamisch steigender Fahrzeugzahlen die zur Verfügung stehende Gesamtzahl zu entsorgender Fahrzeuge berücksichtigt werden müssen.

Brennstoffzellen-Produktionsprozeß. Die Verarbeitung der Basismaterialien zu Bauteilen erfordert zusätzlich Energie- und Betriebsmittelaufwand und führt zu Umweltwirkungen. Für die Bilanz standen umfangreiche Daten des Produktionsprozesses zukünftiger Serienstacks bei Ballard zur Verfügung (Einzelheiten siehe [12]). Er besteht im einzelnen aus folgenden Schritten:

- Produktion der Gasdiffusionselektrode (GDE) (Imprägnierung mit Teflon, Aufbringung des Katalysators, Sintern);
- Produktion der Membran;
- Verbindung von GDE und Membran durch Anwendung von Druck und Temperatur (Membranelektrodeneinheit MEA);
- Fabrikation der Bipolarplatte (Schneiden, Eindrucken des Musters, Imprägnierung, Abdichten)
- Montage des Stacks und Testprozedur.

Die Bilanz des Gesamtsystems (**Abbildung 8**) zeigt auf, dass die Umweltwirkungen des Brennstoffzellenstacks und der Karosserie mit Rädern, Instrumententafeln, Stoßfängern ungefähr gleich hoch sind, die Peripherie hingegen von etwas geringerer Relevanz ist. Allerdings ist, wie beschrieben, die Datenlage für die Peripherie schlechter.



dr/bilder/Resultate Kapi 7.prz

Abbildung 8 Anteil verschiedener Systemkomponenten an ausgewählten Umweltwirkungen der Herstellung eines Brennstoffzellenfahrzeug (75 % PGM-Recycling)

Figure 8 Contribution of components to selected environmental impacts of the production of a fuel cell vehicle (75 % PGM recycling)

Analysiert man den Anteil der Komponenten des Brennstoffzellenstacks weiter (**Abbildung 9**), so zeigt sich, dass neben den Bipolarplatten, deren Beitrag nicht nur durch das Grafit, sondern auch durch den Harz und den Stromverbrauch zur Verarbeitung der Platten bestimmt werden, die Katalysatormengen von Bedeutung sind, obwohl hier schon von 75 % Recyclinganteil ausgegangen wird. Vor allem die SO₂-Emissionen durch die Gewinnung aus schwefelhaltigen Erzen rufen die Versauerung hervor. Wesentlich für die Höhe der Versauerung ist auch die Herkunft des Platins, da die Entschwefelungseinrichtungen in den verschiedenen Ländern unterschiedlichen technischen Stand aufweisen. Hier wurde von südafrikanischem Platin ausgegangen.

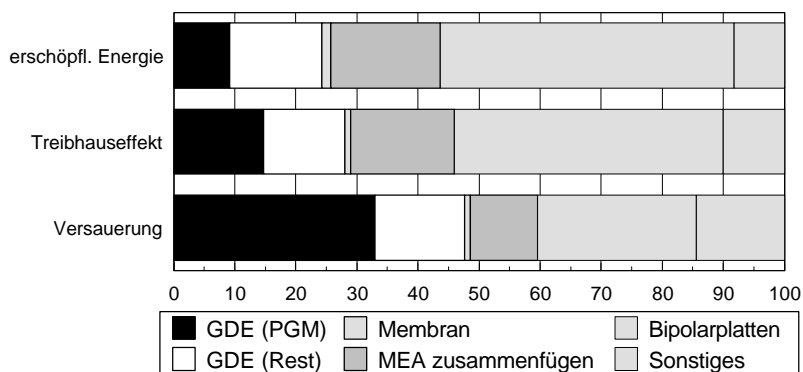


Abbildung 9 Anteil verschiedener Komponenten an ausgewählten Umweltwirkungen der Stackherstellung (75 % PGM-Recycling)

Figure 9 *Contribution of components to selected environmental impacts of stack production (75 % PGM recycling)*

Neben dem Einsatz ökologisch verträglicheren Stroms bei der Herstellung kommt also dem Recycling vor allem der Katalysatormaterialien wesentliche Bedeutung zu. Eine Steigerung auf deutlich über 75 % Recyclingquote ist anzustreben, ggf. durch ein angemessenes Maßnahmenpaket (z. B. Pfand oder Stackleasing). Für Details bezüglich der Stackherstellung siehe [12].

6 Die Gesamtbilanz

Die Gesamtbilanz verknüpft die Bilanzen der Herstellung und Kraftstoffbereitstellung mit den Umwelteinwirkungen durch den Betrieb. Hierzu muss von einem Fahrzyklus und einem Referenzfahrzeug ausgegangen, dessen Spezifikationen aus **Abbildung 4** ersichtlich sind. Zudem müssen die Massen der Antriebssysteme abgeschätzt werden.

Der Kraftstoffverbrauch der Brennstoffzellen-Antriebe wurde basierend auf den Rahmenbedingungen simuliert. Als Verbrauch im Referenzzyklus ergeben sich 1,03 MJ/km für das Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeug, 1,26 MJ/km für Methanol, 1,43 MJ/km für Diesel- und 1,6 MJ/km für Benzin-Verbrennungsmotoren.

Um den zukünftigen Status 2010 zu charakterisieren, wurden auch für die konventionellen Vergleichssysteme Verbesserungspotenziale angenommen. Insbesondere sind die Emissionsfaktoren der Verbrennungsmotoren durch den strengeren Euro 4-Standard gekennzeichnet. Für nicht limitierte Emissionen wurde auf Untersuchungen in [15, 22-27] zurückgegriffen.

Beispielhaft werden aus den untersuchten Wirkungskategorien im folgenden der Treibhauseffekt, die Versauerung, der Sommersmog und die Kanzerogenität vorgestellt.

Treibhauseffekt (Abbildung 10). Die Klimabilanz macht deutlich, dass der Energieträger einen deutlicheren Effekt erzielt als das Antriebskonzept. Durch Einsatz von Biomasse, Wasserkraft oder anderer regenerativer und nahezu treibhausneutraler Energieträger, auch unter Berücksichtigung der Transportaufwendungen (beispielsweise LH₂-Transport durch Tanker mit fossilem Kraftstoff), lassen sich diese Umweltwirkungen deutlich senken. Ein höherer Wirkungsgrad neuer Antriebskonzepte ist bei diesen Primärenergieträgern ökologisch weniger wichtig. Günstig ist der bessere Wirkungsgrad jedoch wegen der höheren Brennstoffkosten und begrenzten Potentiale vieler erneuerbarer Energieträger.

Einsparungen von knapp 15 % (unter Berücksichtigung der Fahrzeug-Herstellung; ohne: 30%) lassen sich bei Einsatz von fossilem Wasserstoff gegenüber Benzin bzw. Diesel erzielen. Hinzu kommt, dass keine CO₂-Emissionen in mobilen Quellen anfallen. Eine eventuelle CO₂-Entsorgung ist dadurch begünstigt. Durch innovative Herstellungsverfahren, beispielsweise den Kvaerner-Prozeß, lassen sich diese Vorteile weiter steigern. Die Verwendung von fossilem Methanol hingegen führt zu Treibhausgas-Emissionen in gleicher Höhe wie die des Benzin-Fahrzeuges. Die negativen Werte des Methanols aus Holz ergeben sich aufgrund der Tatsache, dass als Kuppelprodukte Wärme und Strom erzeugt werden, die mit einem Erdgaskessel bzw. dem Strommix gutgeschrieben werden.

Aus **Abbildung 10** ist ersichtlich, dass die Herstellung des Fahrzeuges Einfluß auf die Lebenszyklusemissionen hat. Bei der Emission von Treibhausgasen trägt die Herstellung des Fahrzeuges (Recycling von 75 % der PGMs) bei Annahme einer Kilometerleistung von 150.000 Kilometern knapp 30 % der Umweltwirkungen bei, die durch Nutzung, Kraftstoffbereitstellung und Herstellung insgesamt entstehen. Damit ist die Produktion eines Brennstoffzellenautos in dieser Wirkungskategorie ungefähr doppelt so aufwendig wie die eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor. Überlegungen, die Auslastung eines Fahrzeuges zu erhöhen, wenn dies die Lebensdauer der Stacks zuläßt, sollten daher angestellt werden.

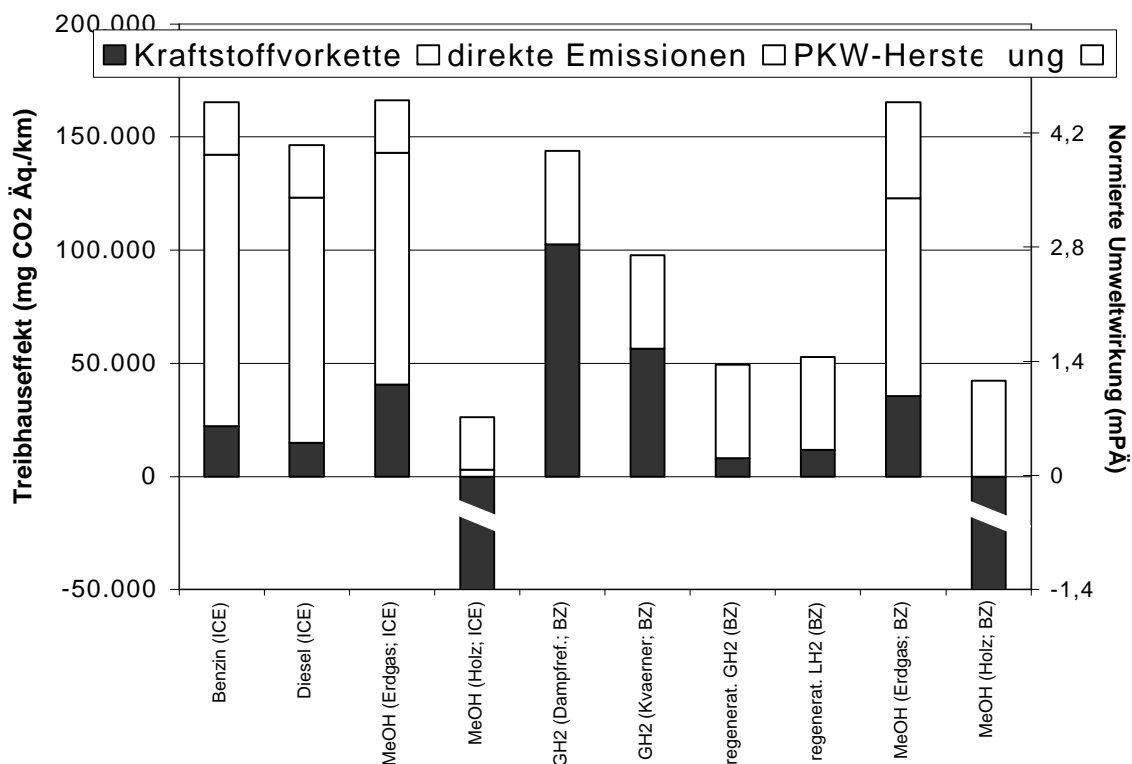


Abbildung 10 Bilanz der Treibhausgasemissionen verschiedener Antriebskonzepte und Kraftstoffe im Referenzfahrzyklus.

ICE: Verbrennungsmotor. mPÄ: milli-Personenäquivalenzen (=Umwelteinwirkungen pro km/tägliche Pro-Kopf-Einwirkungen in Deutschland). Regenerativer H₂: Elektrolyse aus Wasserkraft. GH₂: HGÜ. LH₂: Dieseltanker. H₂ kann grundsätzlich auch im Ottomotor eingesetzt werden (Analyse aus Datenmangel nicht durchgeführt).

Figure 10 *Emission of greenhouse gases of various power trains and fuels*

Versauerung. Verbrennungsmotoren weisen durchweg eine höhere Versauerung auf als Brennstoffzellen-Fahrzeuge (**Abbildung 11**). Obwohl beispielsweise fossiler Wasserstoff und Methanol pro MJ zu einer höheren Versauerung führen (**Abbildung 7**) als Benzin und Diesel, trägt die Kraftstoffvorkette bei Brennstoffzellen aufgrund des geringeren Verbrauchs weniger bzw. nur ähnlich viel zur Versauerung bei. Vor allem die direkten Emissionen, die beim Dieselfahrzeug (NO_x) die Versauerung dominieren, bevorteilen die Brennstoffzellenfahrzeuge. Methanol aus Biomasse schneidet hier wegen der hohen NO_x-Emissionen des analysierten Konzeptes entsprechend schlechter ab. Allerdings fallen diese Emissionen nicht im Fahrzeug – und mithin oft in Ballungsräumen – an, sondern zentral am Ort der Anlage. Durch eine veränderte Verfahrensführung ist hier ein großes Optimierungspotenzial vorhanden.

Zu beachten ist, dass für die Verbrennungsfahrzeuge bereits ein Euro 4-Standard, d. h. sehr geringe direkte Emissionen, angesetzt wurden. Bei den innovativen Kraftstoffketten fällt auf, dass die Rußsubstitution beim Kværner-CB&H-Prozeß zu einer negativen Versauerungsbilanz, d. h. zu einer Netto-Einsparung durch die hohe Einsparung an SO₂-Emissionen, führt.

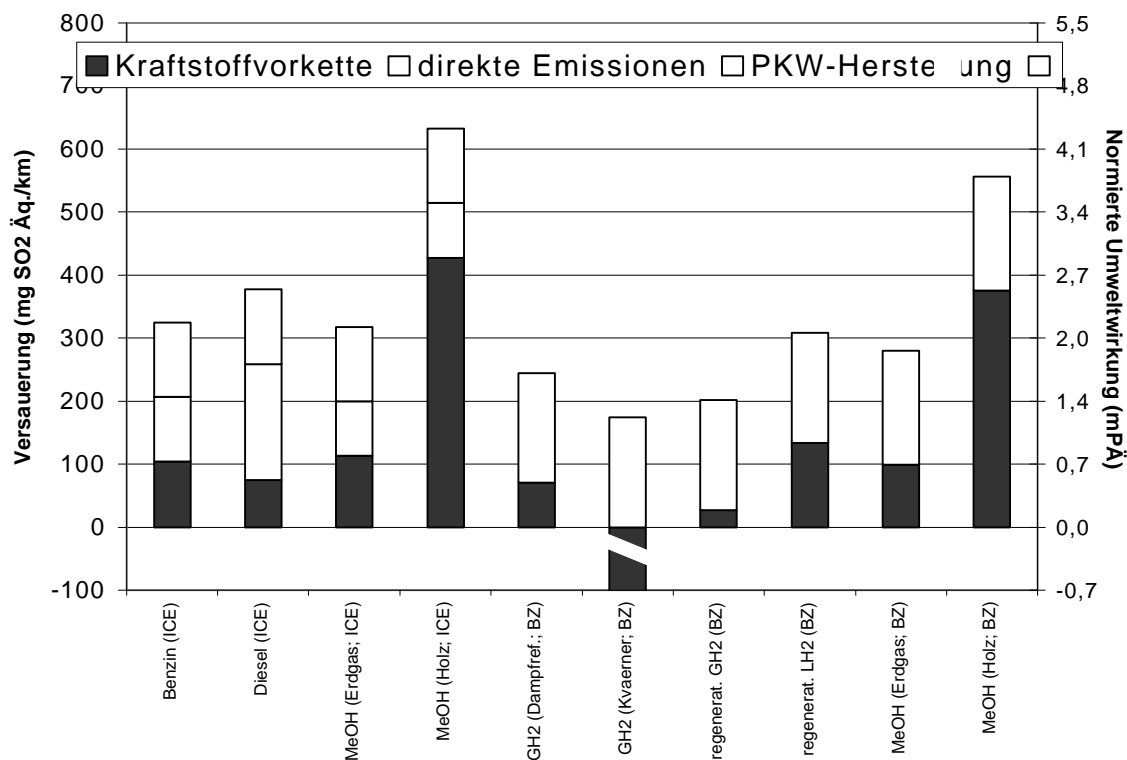


Abbildung 11 Bilanz der Versauerung verschiedener Antriebskonzepte und Kraftstoffe im Referenzfahrzyklus (Erläuterung s.o.)

Figure 11 Emission of acidifying gases of various power trains and fuels

Beachtenswert ist der hohe Anteil der Herstellung des Brennstoffzellen-Fahrzeuges an der Versauerung. Die Herstellung des Fahrzeugs verursacht in dieser Wirkungskategorie mehr als die Hälfte der Lebenszykluseinwirkungen. Ähnlich erhöhte Aufwendungen für die Herstellung wurden in anderen Untersuchungen auch für Hybrid- und Elektrofahrzeuge festgestellt [13].

Sommersmog. Mit Ausnahme des biogenen Methanols zeichnen sich die Brennstoffzellen-Fahrzeuge durch deutlich geringere Sommersmog-Emissionen aus (**Abbildung 12**). Vor allem die geringen (Methanol-BZ) bzw. nicht vorhandenen (H_2 -BZ) NMHC-Emissionen der Nutzungsphase bedingen den Vorsprung der Brennstoffzellenkonzepte. Zudem sind die Emissionen des Methanol-Fahrzeugs mit Ausnahme des Formaldehyds weniger photochemisch reaktiv. In dieser Bilanz wurde ein Anteil von zwei Dritteln Formaldehyd an den reformerbedingten NMHC-Emissionen angesetzt. Hinzu kommen die Verdampfungsemissionen. Trotzdem ist der Einfluß der Nutzungsphase der Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf den gesamten Sommersmog gering.

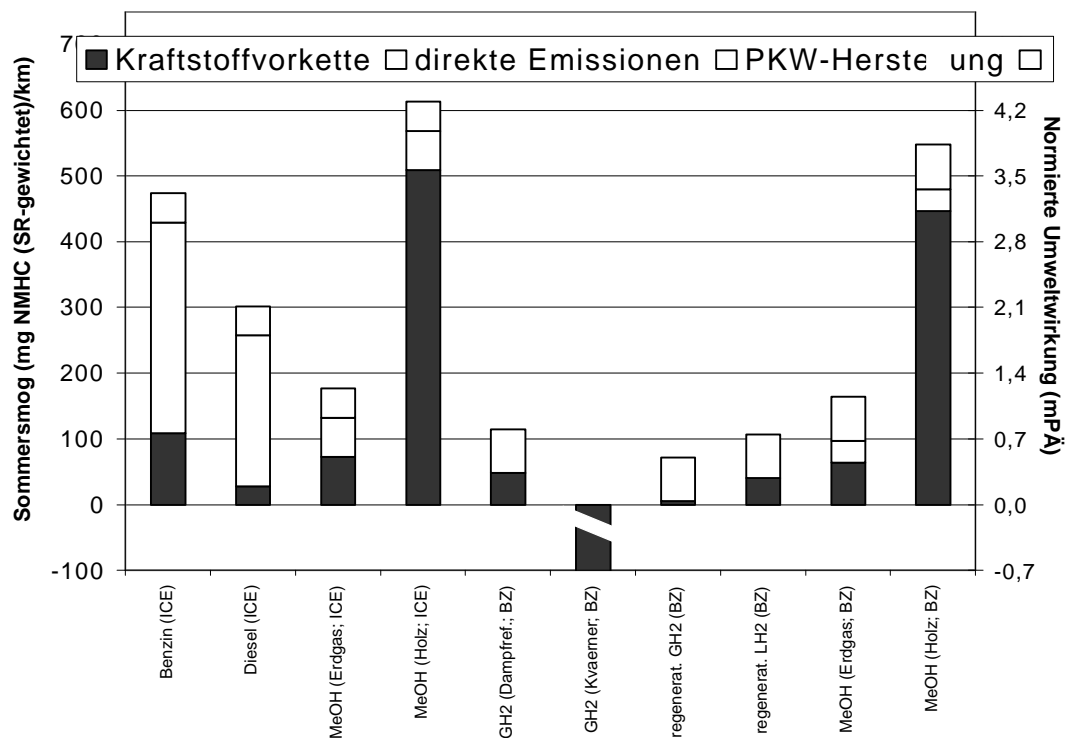


Abbildung 12 Bilanz des Sommermogs verschiedener Antriebskonzepte und Kraftstoffe im Referenzfahrzyklus (Erläuterung s.o.)

Figure 12 Emission of gases contributing to sommersmog of various power trains and fuels

Kanzerogenität. Die Kanzerogenität ist vor allem bei den Dieselfahrzeugen ausgeprägt (**Abbildung 13**), insbesondere durch die Partikelemissionen. Partikelfilter für Dieselfahrzeuge sind daher eine vordringliche Maßnahme zur Verbesserung der Umweltbilanz des Dieselfahrzeuges. Brennstoffzellenfahrzeuge zeichnen sich durchgängig durch extrem niedrige kanzerogene Emissionen auch in den Vorketten aus. Die hohen kanzerogenen Emissionen aus der biogenen Methanolkette stammen aus der Holzbereitstellung, in etwa gleichem Maße aus den Emissionen des Schleppers und der Hackmaschine. Die Formaldehyd-Emissionen des Brennstoffzellen-Fahrzeuges sind bei dem angenommenen Charakterisierungsfaktor nicht von Belang. Die Herstellung des Brennstoffzellen-Fahrzeuges ist in dieser Wirkungskategorie nicht von Bedeutung.

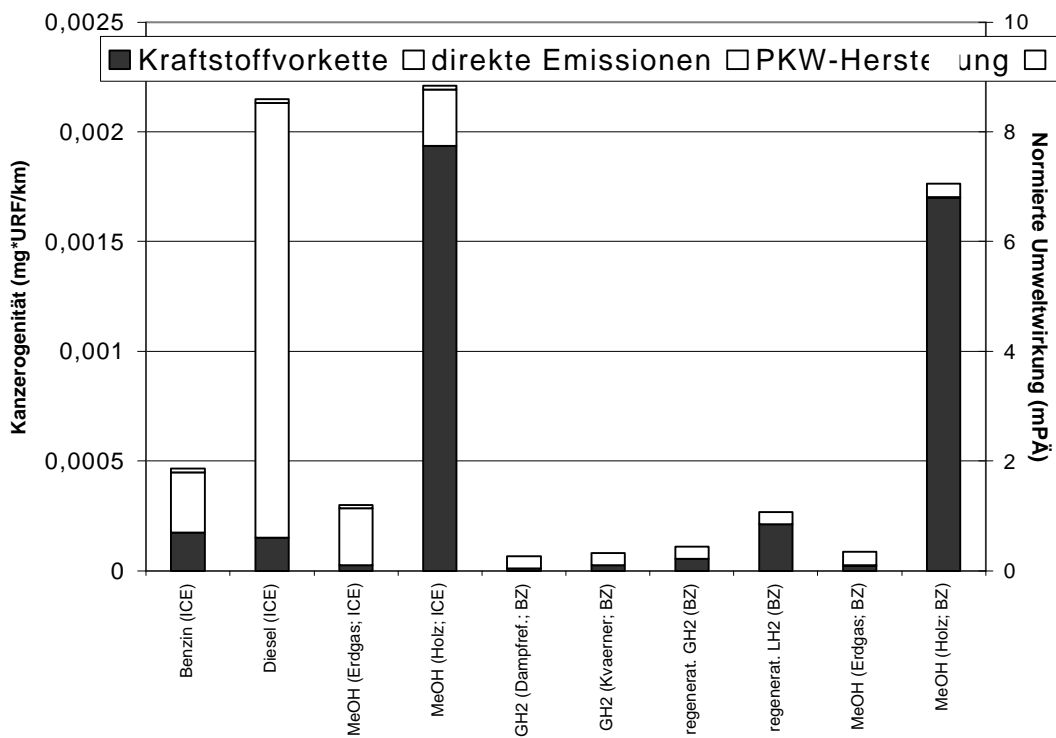


Abbildung 13 Bilanz der Kanzerogenität verschiedener Antriebskonzepte und Kraftstoffe im Referenzfahrzyklus (Erläuterung s.o.)

Figure 13 Emission of carcinogenic substances of various power trains and fuels

Einfluß der Lebensdauer des Fahrzeuges. Die Abschreibung der Herstellung ist umgekehrt proportional zu der während der Lebensdauer gefahrenen Fahrstrecke. Je länger also das Fahrzeug betrieben wird, desto weniger ist die erhöhte Aufwendung für die Herstellung von Bedeutung. Der Break-even zwischen Benzin- und H₂-Brennstoffzellenfahrzeug liegt deutlich unter 100.000 Kilometer (**Abbildung 14**). Mit steigender Fahrleistung prägt sich der

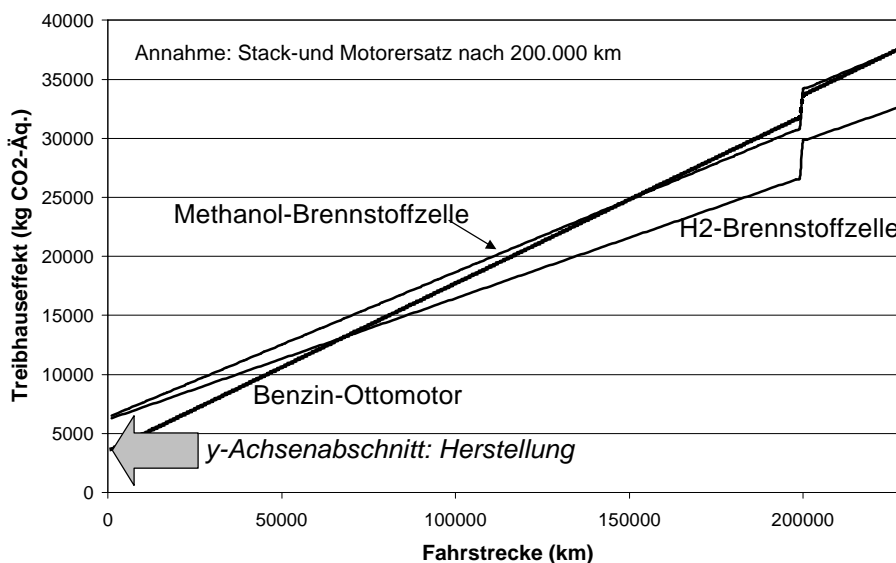


Abbildung 14 Treibhauseffekt in Abhängigkeit von der Fahrleistung des Fahrzeugs

Figure 14 Emission of greenhouse gases as a function of the driving distance of vehicles

Vorteil für Wasserstoff-Brennstoffzellenfahrzeuge stärker aus. Dies gilt nur solange, bis es nicht zu nennenswerten Ersatzinvestitionen kommen muß (in **Abbildung 14** Stack- bzw. Motorsersatz nach 200.000 km angenommen).

Zukünftige Optimierungspotenziale. Die vorangehende Analyse zeigt, dass bezüglich der schadstoffgetragenen Wirkungskategorien die Brennstoffzelle eindeutige Vorteile hat und daher keiner Sensitivitätsanalyse bedarf. Bei dem Verbrauch erschöpflicher energetischer Ressourcen und den Treibhausgasemissionen hängt das Resultat hingegen vom Kraftstoff (Wasserstoff oder Methanol) bzw. vom Verbrauch ab.

Alle Antriebskonzepte weisen Optimierungspotentiale auf. Diese sind z. T. allen Fahrzeugen gemeinsam und betreffen beispielsweise den Luft- und Rollwiderstand, die Reduktion der Karosseriemasse und des Verbrauchs der Nebenaggregate u. ä. Aber auch antriebsbezogen gibt es Optimierungsmöglichkeiten. Beim Benzin-Verbrennungsmotor sind z. B. durch Direkteinspritzung, variable Ventilsteuerzeiten oder Hubraumverkleinerung mit mechanischer Aufladung Einsparpotentiale zwischen 8 und 15 % erzielbar [28]. Vor allen Dingen das Teillastverhalten gilt es zu verbessern. Auch beim Dieselmotor dürfte innerhalb einer Dekade eine deutliche Verbrauchsreduktion möglich sein (Common Rail, Pum-

pe/Düse), wobei der Schwerpunkt bei der Reduktion der Emissionen, vor allem der Partikel, liegen wird. Hybrid-Konzepte können sowohl beim Benzin wie beim Diesel eine deutliche Verbrauchsreduktion bewirken. In der Sensitivitätsanalyse wird angenommen, dass die Zielwerte der Umweltministerkonferenz [29] mit 90 g direkter CO₂-Emissionen pro km in dem hier definierten Referenzzyklus erreicht werden. Dies entspricht einem Verbrauch von 3,83 l Benzin/100 km bzw. 3,42 l Diesel/100 km.

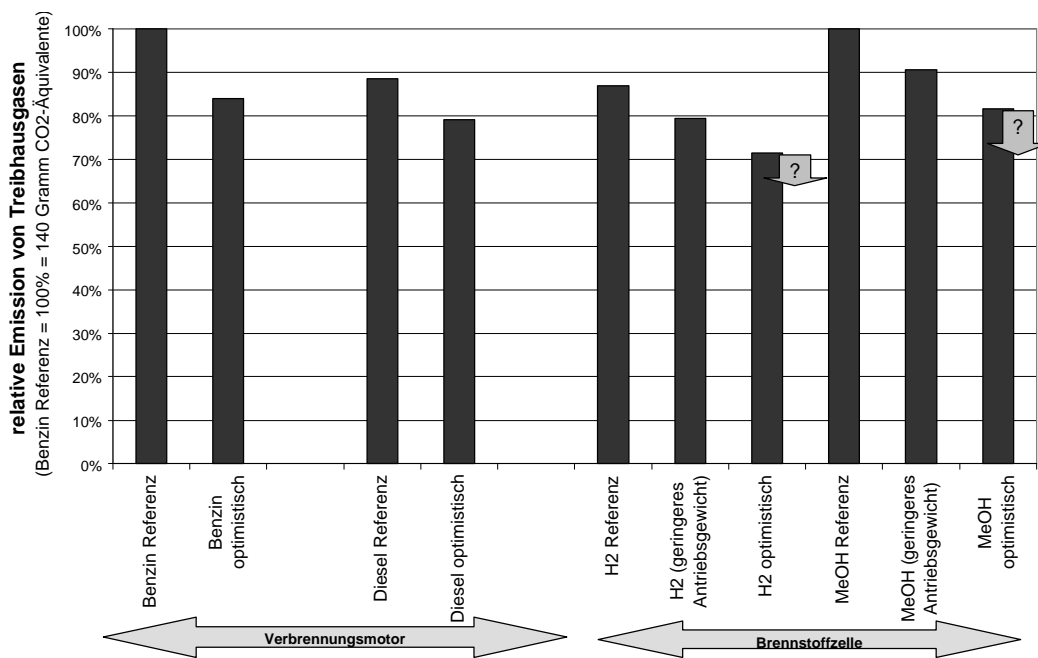


Abbildung 15 Zukünftige mögliche Treibhausgasemissionen bei Optimierung der Referenzsysteme mit fossilen Treibstoffen

Figure 15 Potential future emissions of greenhouse gases with optimised systems and fossil fuels

Bei der Brennstoffzelle ist neben einer Steigerung der Wirkungsgrade von Stack und Peripherie auch durch die Möglichkeit der Bremsenergieerückgewinnung (Batterieeinsatz erforderlich), durch ein verstärktes Lastmanagement (Abschalten von Teilen der Peripherie im Stillstand etc.), und vor allem durch Gewichtsreduktion eine Verbrauchsminderung möglich. Insgesamt sollte verstärkt ein optimiertes System Brennstoffzelle/Batterie untersucht werden, um optimal die Vorteile der Brennstoffzelle mit denen des klassischen Elektroautos zu verschmelzen. Zudem eignet sich die Brennstoffzelle besonders für Niedrigstverbrauchsfahrzeuge, bei denen die bisherigen Hemmnisse – Wasserstofftank, Gewicht und Volumen des Antriebssystems, Kosten – von weitaus geringerer Bedeutung sind.

Aus **Abbildung 15** ist ersichtlich, dass von den auf fossilen Brennstoffen beruhenden Systemen die Brennstoffzelle auf Wasserstoffbasis von allen Varianten die klimafreundlichste Lösung ist, vor allen Dingen, wenn weiteres Optimierungspotenzial realisiert wird. Der Entwicklung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen mit dem Kraftstoff Wasserstoff ist daher höchste Priorität einzuräumen.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge auf fossiler Methanolbasis hingegen können nur eine geringfügige Treibhausgas-Reduktionswirkung aufweisen. Selbst bei Optimierung der bereits optimistisch angesetzten Systeme fällt die Treibhausbilanz nicht signifikant besser aus als die des Dieselfahrzeugs. Aus der Perspektive des Klimaschutzes im Rahmen eines fossilen Kraftstoffsystems ist der PKW auf Brennstoffzellen-Basis somit vor allem mit dem Kraftstoff Wasserstoff empfehlenswert. Sobald ein marktreifes, ausentwickeltes Brennstoffzellen-Fahrzeug bereitsteht, ist zudem eine Wiederholung der Bilanz für das Gesamtsystem angeraten.

Gelingt der langfristig unabdingbare Übergang zu Kraftstoffen auf Basis erneuerbarer Primärenergieträger, so stellt sich die Frage nach dem optimalen Kraftstoff erneut. Allerdings bietet Wasserstoff im Vergleich zu Methanol ein größeres Spektrum an Herstellungsverfahren. Insbesondere die Möglichkeit, Wasserstoff aus regenerativem Strom herzustellen, erweitert das Spektrum möglicher Pfade. Hinzukommt, dass die einfachere Bereitstellungskette (keine Reformierung an Bord des Fahrzeuges) auch bei z. B. Biomasseketten zu einer erhöhten Ausschöpfung der mitunter begrenzten Potenziale führt.

Literatur

1. Enquete, Wege zu einer klimaverträglichen Verkehrspolitik. Bericht der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Dt. Bundestags. Bonn (1994).
2. Shell, Mehr Autos - weniger Emissionen. Szenario des PKW-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis 2020. Shell AG, Abt. Energie- und Wirtschaftspolitik, Hamburg (1999).
3. Prognos: Energiereport III. Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. 2000, Stuttgart: Schäffer-Pöschel-Verlag.
4. BMV: Verkehr in Zahlen 1998. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr. 1999, Bonn: Deutscher Verkehrs-Verlag.
5. ISI: Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle. Symposium zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg. Stuttgart, 27.09.1999. (1999).
6. DIN_EN_ISO_14040: Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen. 1997, Berlin: Beuth Verlag.
7. DIN_EN_ISO_14042: Ökobilanz. Wirkungsabschätzung. Entwurfsfassung. 1998, Berlin: Beuth Verlag.

8. M. Pehnt, Ganzheitliche Bilanzierung von Brennstoffzellen als zukünftigen Energiesystemen. Veröffentlichung in Vorbereitung. Dissertation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (2000).
9. M. Pehnt: Life Cycle Assessment of Fuel Cells and Relevant Fuel Chains. In: Proc. Hyforum International Hydrogen Energy Forum 2000. 2000. Munich (Germany).
10. G.W. Schweimer, Sachbilanz des 3 Liter Lupo. Volkswagen AG, Wolfsburg (1999).
11. G.W. Schweimer und M. Schuckert, Sachbilanz eines Golf. Volkswagen AG, IKP der Universität Stuttgart, Wolfsburg (1996).
12. M. Pehnt: Life Cycle Assessment of Fuel Cell Stack Production. Int. J. Hydrogen Energy accepted for publication (2000).
13. T. Fleißner, Primärenergetische Optimierung eines autarken Hybridfahrzeuges. IfE Schriftenreihe Heft 40. Dissertation, TU München, München (1999).
14. ESU: Ökoinventare von Energiesystemen. Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. R. Frischknecht et. al. 1996, Zürich.
15. FZJ, P. Biedermann, K.U. Birnbaum, T. Grube, *et al.*, Systemvergleich: Einsatz von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen. Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Forschungszentrum Jülich, Jülich (1999).
16. C. Carpetis, Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben (mit Brennstoffzellen und/oder Batterien) im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor. STB-Bericht Nr. 22, DLR-IB-200044417400. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart (2000).
17. C. Carpetis und J. Nitsch: Neue Antriebskonzepte im Vergleich. MTZ Motortechnische Zeitschrift 60 (1999). S. 94-99.
18. CML, R. Heijungs, J.B. Guinee, G. Huppes, *et al.*, Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Backgrounds. Center of Environmental Science, Leiden (1992).
19. Acurex, Evaluation of Fuel-Cycle Emissions on a Reactivity Basis. Acurex Environmental Corporation, Mountain View (1996).
20. UBA, Durchführung eines Risikovergleiches zwischen Dieselmotoremissionen und Ottomotoremissionen hinsichtlich ihrer kanzerogenen und nicht-kanzerogenen Wirkungen. UBA Forschungsvorhaben 216 04 001/1. Fraunhofer-Institut für Toxikologie & Aerosolforschung, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung, Medizinisches Institut für Umwelthygiene der Universität Düsseldorf, Forschungs- und Beratungsinstitut Gefahrstoffe GmbH, Berlin (1999).
21. J. Borken, A. Patyk und G.A. Reinhardt: Basisdaten für ökologische Bilanzierungen. 1999, Braunschweig, Wiesbaden: vieweg.
22. ifeu, A. Patyk und U. Höpfner, Ökologischer Vergleich von Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsenergien unter besonderer Berücksichtigung der Brennstoffzelle. Studie im Auftrag des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag. Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg (1999).
23. C. Bach, N. Kläntschi, N. Heeb, H.W. Jäckle, *et al.*, Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen. Schlußbericht. EMPA, Dübendorf (1998).
24. M.P. Gover, S.A. Collins, G.S. Hitchcock, D.P. Moon, *et al.*: Alternative Road Transport Fuels - A Preliminary Life-cycle Study for the UK. 1996, Oxon, UK: ETSU.
25. M.A. Delucchi, Emissions of Non-CO2 Greenhouse Gases from the Production and Use of Transportation Fuels and Electricity. Institute of Transportation Studies, University of California at Davis, Davis (USA) (1997).
26. S.-O. Koßmehl, Beurteilung der technischen, ökologischen und ökonomischen Bedingungen für den Einsatz von Biokraftstoffen im Kraftfahrzeug. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin (1995).

27. TÜV, D. Hassel und et.al., Abgas-Emissionsfaktoren von PKW in der Bundesrepublik Deutschland - Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990. Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Bericht 8/94. Berlin (1994).
28. M. Fischer, Die Zukunft des Ottomotors als PKW-Antrieb - Entwicklungschancen unter Verbrauchsaspekten. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin (1998).
29. Umweltministerkonferenz, Anforderungsprofile für ökologisch vertretbare Automobile. Bericht der Arbeitsgruppe "Umwelt und Verkehr" der Umweltministerkonferenz vom 11.3.1998. (1998).