




ludwig bölkow
systemtechnik



Fraunhofer
ISI



Wuppertal Institut
für Klima, Umwelt, Energie
GmbH



Überleitung der Ergebnisse aus GermanHy in das Emissionsberechnungs- modell TREMOD

Schlussbericht Teil I
(Kurzdarstellung)

Wolfram Knörr (IFEU)
Alexander Schacht (IFEU)
Patrick R. Schmidt (LBST)
Werner Weindorf (LBST)
Julia Michaelis (Fraunhofer ISI)
Martin Wietschel (Fraunhofer ISI)
Frank Merten (Wuppertal Institut)
Peter Viebahn (Wuppertal Institut)
Hans Holdik (BASt)

Heidelberg, Juni 2013 (Stand Dezember 2012)

Kontakt Daten der beteiligten Institute

BAST – Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D – 51427 Bergisch Gladbach
Tel: +49 (0)2204 43-0, Fax: +49 (0)2204 43-694
E-Mail: info@bast.de, Website: www.bast.de

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung
Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3, D – 69120 Heidelberg
Tel: +49 (0)6221 4767-0, Fax: +49 (0)6221 4767-19
E-Mail: ifeu@ifeu.de, Website: www.ifeu.de

ISI – Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung
Breslauer Straße 48, D – 76139 Karlsruhe
Tel: +49 (0)721 6809-0, Fax: +49 (0)721 689 152
E-Mail: presse@isi.fraunhofer.de, Website:
www.isi.fraunhofer.de

LBST – Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
Daimlerstr. 15, D – 85521 München/Ottobrunn
Tel: +49 (0)89 608 110-0, Fax: +49 (0)89 609 97 31
E-Mail: info@lbst.de, Website: www.lbst.de

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Döppersberg 19, D – 42103 Wuppertal
Tel: +49 (0)202 2492-0, Fax: +49 (0)202 2492 108
E-Mail: info@wupperinst.org, Website:
www.wupperinst.org



Gefördert durch das

Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und
Brennstoffzellentechnologie (NIP)

Beauftragt vom

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
(BMVBS)
Invalidenstraße 44, 10115 Berlin

In Abstimmung mit der

Nationalen Organisation Wasserstoff- und
Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH)
Fasanenstraße 5, 10623 Berlin

Bei dem vorliegenden Dokument handelt es sich um die Zusammenfassung der Studienergebnisse. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Nutzung steht unter dem Zustimmungsvorbehalt der Erarbeiter sowie der Auftraggeber.

Überleitung der Ergebnisse aus GermanHy in das Emissionsberechnungsmodell TREMOD

Kurzdarstellung

Aufgabenstellung und Voraussetzungen

Ziel des Vorhabens war es, TREMOD (Transport Emissions Modell), das Verkehrsemissionsmodell der Bundesregierung, um Szenarien zu erweitern, die Wasserstoff als Energieträger berücksichtigen. Als Datengrundlage für die TREMOD-Erweiterung waren die - teilweise aktualisierten - Ergebnisse der 2009 abgeschlossenen Metastudie „GermanHy“ zentral. Dabei wurden neben den direkten Emissionen und Kraftstoff- bzw. Energieverbräuchen auch die der gesamten Energiekette, d.h. die der Vorkette für die Energiebereitstellung, auf Grundlage der Arbeiten in GermanHy mit einbezogen.

Das Vorhaben wurde vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU), der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST), dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durchgeführt.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte TREMOD so überarbeitet werden, dass das Modell die zukünftige Verwendung von Wasserstoff als Treibstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge im Verkehr angemessen darstellt. Dazu wurde die bestehende Datenbankstruktur, die die Fahrzeugschichten und verwendeten Kraftstoffarten abbildet, um Wasserstoff als Energieträger erweitert.

Die Ergebnisse aus den GermanHy-Szenarien wurden übertragen, wobei eine wesentliche Voraussetzung war, die Konsistenz der zu integrierenden GermanHy- und TREMOD-Szenarien z. B. in Bezug auf Interaktion mit anderen alternativen Antriebsarten sicherzustellen. Dazu wurde dasjenige Szenario aus GermanHy als Grundlage genommen, welches einen ambitionierten Klimaschutz unterstellt („Brennstoffzellen -Pkw-Klimaschutz“). Um ferner die aktuellen Fahrzeugentwicklungen bei Elektrofahrzeugen (hier als Batterie- und Hybridfahrzeuge definiert) angemessen abzubilden, wurde dieses Szenario aus GermanHy auf der Nachfrageseite um ein „Elektro-

mobilität“-Szenario erweitert, dass neben Pkw mit Brennstoffzelle auch batterieelektrische und Plug-in-Hybrid-Pkw als Konzepte berücksichtigt („Pkw-Elektromobilität-Klimaschutz“).

Der Energieeinsatz sowie die Faktoren für die direkten und indirekten Emissionen für Erzeugung und Verteilung des Wasserstoffs wurden aus den GermanHy-Daten teils übernommen, teils in aktualisierter Form abgeleitet und in das Modell implementiert. So waren beispielsweise aus GermanHy Daten zu den wesentlichen treibhausrelevanten Gasen (CO₂, CH₄ und N₂O) verfügbar. Ergänzend wurden für die relevanten Prozesse auch die Emissionen von PM, NO_x, SO₂, NMHC und CO recherchiert und implementiert.

Schließlich war für das TREMOD-Modell der Bestand der Fahrzeuge, seine Zusammensetzung nach Größenklassen, die erbrachte Fahrleistung sowie die Menge des verwendeten Wasserstoffs für die in den Szenarien abzubildenden Jahre zu definieren. Hierzu wurde die Wasserstoffnutzung in drei Fahrzeuggrößenklassen aufgefächert. Aufgrund der aktuellen Situation und der Einschätzung der GermanHy-Partner ist es hinreichend, nur mit komprimiertem Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge abzubilden und Verbrennungsmotoren, die Wasserstoff als Kraftstoff verwenden, außen vor zu lassen.

Abschließend wurde das Modell mit Hilfe der beiden Szenarien „Brennstoffzellen-Pkw-Klimaschutz“ und „Pkw-Elektromobilität-Klimaschutz“ für den Zeitraum bis zum Jahr 2050 erfolgreich auf Funktionalität und Plausibilität getestet.

Mit dem Modell TREMOD ist es nun für alle Anwender möglich, Abgasemissionen und Energieverbräuche des Verkehrs unter Annahme unterschiedlicher Flottenzusammensetzungen und Anteile von Brennstoffzellenfahrzeugen in Abhängigkeit vom gewählten Energiemix zu berechnen.

Grundannahmen, Erkenntnisse und Aussagen

Welche Szenarien zur Marktdurchdringungen der neuen Antriebstechnologien wurden zugrunde gelegt?

- Das Szenario „Brennstoffzellen-Pkw Klimaschutz“ mit hoher Marktdurchdringung aus GermanHy wird unter heutiger Sicht als zu optimistisch angesehen und der Markthochlauf für Brennstoffzellenfahrzeuge wurde entsprechend gesenkt. Es ergeben sich hieraus für 2020 0,5 Mio. FCEV. Für 2030 erhöht sich der Anteil auf 5,6 Mio. FCEV.
- Das Szenario „Pkw-Elektromobilität-Klimaschutz“ basiert auf den Vorgaben der Bundesregierung bzgl. der Anzahl an Elektrofahrzeugen und einer internationalen Studie von McKinsey bzgl. der Anzahl an Brennstoffzellenfahrzeugen. Es ergeben sich hieraus für 2020 1 Mio. Elektrofahrzeuge (40% BEV und 60% PHEV) und 200.000 FCEV. Für 2030 erhöht sich der Anteil auf 6 Mio. BEV/PHEV und 2 Mio. FCEV.

Wie entwickelt sich die Energieeffizienz der verschiedenen Fahrzeugkonzepte?

- Als Treiber für die Steigerung der Energieeffizienz der Fahrzeuge wurden die politischen Ziele für die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor angelegt. Diese unterstellen, dass der für die EU diskutierte Flottenzielwert von 95 g/km für 2020 erreicht wird [EU-KOM 2009].
- Da die konventionellen Pkw bis 2020 den wesentlichen Beitrag zur Zielerreichung leisten müssen, nimmt deren spezifischer Energieverbrauch zwischen 2010 und 2020 um rund ein Viertel ab. Für die Jahre nach 2020 wird eine weitere jährliche Minderung von 1,2%/Jahr angenommen. Bis zum Jahr 2050 halbiert sich dadurch der spezifische Energieverbrauch der konventionellen Fahrzeuge gegenüber 2010.
- Auch bei den Elektrofahrzeugen (Batterie- und Hybridfahrzeuge) und Brennstoffzellenfahrzeugen werden bis 2050 Effizienzsteigerungen angenommen, so dass deren spezifischer Energieverbrauch gegenüber aktuellen Fahrzeugen um ca. ein Drittel niedriger liegt.

Welche Umweltwirkungen sind mit der Bereitstellung von Wasserstoff und Strom im Rahmen einer Energiewende im Verkehr verbunden?

- Für die Berechnung der Energievorketten wurde der Strommix nach [Leitstudie 2011] „Basisszenario A“ und der Wasserstoffmix nach [GermanHy 2009] „Klimaschutz mit CCS“ (KLI-CCS) angenommen. Das Wasserstoffszenario KLI-CCS berücksichtigt zwar den Kernenergieausstieg, bedarf jedoch der Überarbeitung aufgrund neuerer energiepolitischer Entwicklungen, wie z.B. der stark umstrittenen Akzeptanz für CO₂-Speicherung und

Endlagerung (CCS) in Deutschland, steigende Energiepreise, etc.. Im Rahmen dieser Arbeit war eine neue Modellierung des H₂-Szenarios nicht möglich, die Wasserstoffpfade konnten dessen ungeachtet um neue Entwicklungen beim Wasserstofftransport erweitert werden.

- Mit einem Lebenszyklusbilanzierungstool wurden Energieaufwand, Treibhausgasemissionen und Schadstoffemissionen für Einzelpfade sowie die sich daraus ergebenden Energiemixe berechnet.
- Die Ergebnisse zeigen, dass mit weiteren Verbesserungen auf Seiten des Fahrzeugantriebs die Umweltwirkungen der Kraftstoffbereitstellung im Vergleich zu den Umweltwirkungen bei der Kraftstoffnutzung an Bedeutung gewinnen.
- Gegenläufige Entwicklungen in verschiedenen Umweltwirkungskategorien weisen darauf hin, dass ein einzelner Indikator (z.B. Treibhausgase) für eine robuste Bewertung von Energieketten alleine nicht ausreicht. Im Vergleich zum Einsatz erneuerbarer Energien für die Wasserstofferzeugung führt die Nutzung von Steinkohle in Kombination mit CCS (CO₂-Abscheidung und –Speicherung) zu signifikant höheren nicht-erneuerbaren Energieaufwendungen. Außerdem steigen die mit der Kohlegewinnung verbundenen Methan-, Schwefeldioxid- sowie Staub- / Partikelemissionen.
- Das GermanHy-Wasserstoffszenario KLI-CCS bedarf dringend der Aktualisierung. Alternativ könnte das GermanHy-Szenario „begrenzte Energieressourcen“ (RES) angelegt werden. Um das RES-Szenario in TREMOD abbilden zu können, müssten jedoch die Szenarien für die Kraftstoffnachfrage angepasst werden. Über die aktuell berücksichtigten technischen Effizienzverbesserungen im Fahrzeug hinaus wäre auch die Berücksichtigung von Mobilitätsaspekten wie Verkehrsverlagerung (Modal Split) und Verkehrsvermeidung (Suffizienz) notwendig.

Welche Reduktion der Klimagasemissionen lässt sich bis 2050 erreichen?

- Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft für das Szenario „Pkw-Elektromobilität-Klimaschutz“ wesentliche Annahmen zur Markteinführung der neuen Fahrzeugkonzepte, die daraus resultierende Entwicklung der Fahrzeugbestände und Fahrleistungen, sowie als Ergebnis die Entwicklung der CO₂-Emissionen. Die Konsequenz eines bis zum Jahr 2050 weitgehend auf Brennstoffzellen-, Plug-in-Hybrid- und batterieelektrischen Antrieb umgestellten Pkw-Verkehrs ist eine Reduktion der CO₂-Emissionen um mehr als 100 Mio t gegenüber dem heutigen Stand, was einem Rückgang von mehr als 80% der durch Pkw erzeugten Treibhausgase entspricht. In dem an GermanHy angelehnten Szenario „Brennstoffzellen-Pkw-Klimaschutz“, dass nur Fahrzeuge mit Brennstoffzellen als Ersatz der konventionellen Fahrzeuge unterstellt, wird eine ähnliche Minderung der CO₂-Emissionen erreicht.

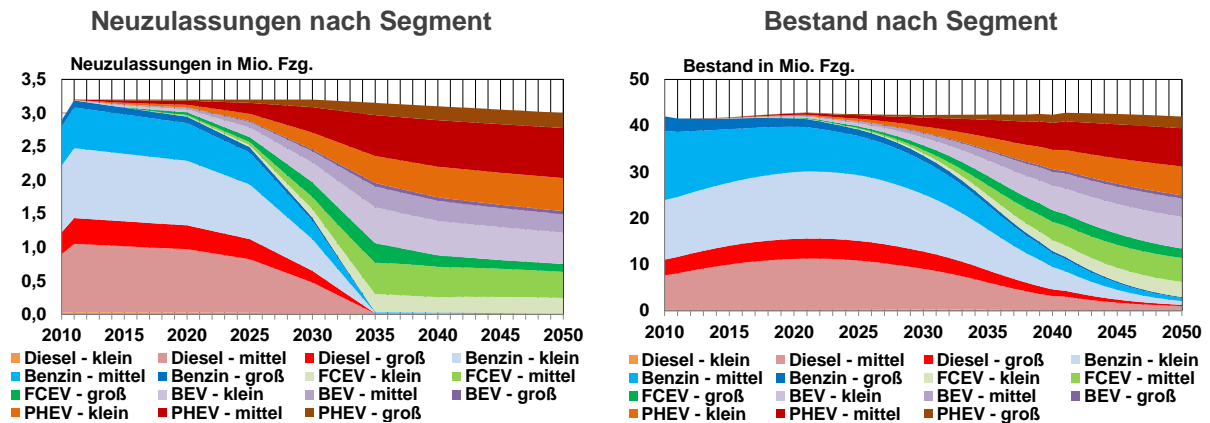


Abbildung 1 Pkw Fahrzeugneuzulassungen gemäß Ergebnissen der Studie TREMOD-GermanHy (linkes Teilbild) und Veränderungen im Fahrzeuggesamtbestand (rechtes Teilbild) differenziert nach unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten (Benziner, Diesel, Brennstoffzellen-, Batterie- und Hybridfahrzeugen) und Segmenten („große“, „mittlere“, „kleine“ Fahrzeugklasse)

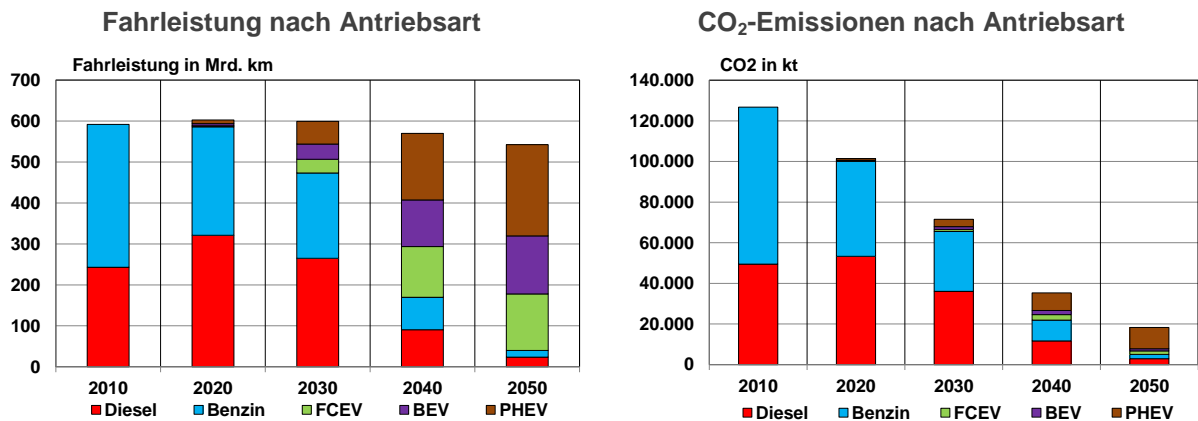


Abbildung 2: TREMOD-GermanHy Szenario zur jährlichen Pkw-Fahrleistung, differenziert nach Antriebskonzepten

Abbildung 3: TREMOD-GermanHy Szenario für das Reduktionspotential für CO₂ aus Pkw im Straßenverkehr bis zum Jahr 2050 auf Basis der in Abb. 1 und 2 aufgezeigten Bestands- und Fahrleistungsszenarien

Welche Aussagekraft haben die Szenarienergebnisse und welche Anforderungen ergeben sich an die weitere Szenarienmodellierung?

- Die Szenarienergebnisse zeigen, dass unter der Prämisse der getroffenen Annahmen für den Pkw-Verkehr in den beiden Szenarien zwischen 2010 und 2050 deutliche Minderungen beim Energieverbrauch, den Treibhausgasemissionen und wichtigen Luftschadstoffemissionen erreicht werden können. Die breite Markteinführung von Brennstoffzellen-, Plug-in-Hybrid- und batterieelektrischen Fahrzeugen ermöglicht die Umweltvorteile.
- Die Minderungspotenziale des Pkw-Verkehrs sind aus heutiger Sicht relativ hoch, da eine Vielzahl technischer Möglichkeiten bei den Antrieben und der Energieerzeugung zur Verfügung stehen.

- In anderen Verkehrsbereichen, vor allem beim Straßengüterverkehr, beim Flugverkehr und der Schifffahrt sind die Möglichkeiten zur Umstellung auf regenerative Energien und Antriebe aus heutiger Sicht beschränkter als beim Pkw.
- Es ist daher zu empfehlen, alle Verkehrsträger in die Szenarienrechnungen mit einzubeziehen, um die Minderungspotenziale und die Energiebedarfe des gesamten Verkehrs abschätzen zu können.
- Interaktionen zwischen den Sektoren Energie, Verkehr und den übrigen Verbrauchssektoren spielen zukünftig eine große Rolle und sollten bei der Entwicklung von Szenarien stets berücksichtigt werden. Wasserstoff kann sowohl als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge wie auch als stationärer Energiespeicher eingesetzt werden und somit eine zentrale Rolle spielen.