

Energie- und Umweltaspekte der H₂-Bereitstellung für Verkehrssysteme: Erste Ergebnisse einer vergleichenden Analyse

Kurzfassung zum Vortrag beim FGU-Seminar "Alternative Kraftstoffe für Fahrzeuge aus Umweltsicht" am 7.+8. Oktober 1991 in Berlin

Uwe R. Fritsche, Koordination Energiebereich

Öko-Institut – Institut für angewandte Ökologie e.V., Büro Darmstadt

Darmstadt, Oktober 1991

Zusammenfassung

Derzeit führt das Öko-Institut im Auftrag des Hessischen Ministers für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten eine Erweiterung und Ergänzung des GEMIS-Programms zur Version 2.0 durch. Diese neue Version wird u.a. die explizite Modellierung von Personen- und Güterverkehrssystemen erlauben. Dabei sollen auch Prozessketten für unkonventionelle Energieträger im Verkehrsbereich analysiert und dargestellt werden.

Im Zuge von Vorarbeiten zu dieser Untersuchung wird von ersten Ergebnissen berichtet, die sich auf Wasserstoff als Sekundärenergieträger im Verkehrssektor beziehen. Diesen werden orientierende Abschätzungen alternativer Verkehrssysteme gegenübergestellt. Für die Fragestellung "H₂ als Treibstoff" wurden mit Hilfe der GEMIS-Version 1.3 verschiedene orientierende Prozessketten erstellt, die Wasserstoff als Sekundärenergieträger für Verkehrssysteme bereitstellen. Dabei wurden verschiedene Primärenergiequellen, Umwandlungstechniken und Transportsysteme einbezogen sowie Varianten zur Nutzung im Fahrzeug definiert. In Ergänzung wurden zur Definition eines Vergleichssystems auch ein "ÖKO"-Diesel-Fahrzeug mit abgebildet. Als wesentliche Grundlage für die Modellierung mit GEMIS diente eine erste Literaturübersicht.

Die orientierende Analyse von H₂-Prozessketten unter günstigen Annahmen für die H₂-Erzeugung durch Solar- und Wasserkraftstrom ergab für zukünftige H₂-Pkw-Szenarien, dass nur ein - noch hypothetisches - hocheffizientes Brennstoffzellen-Fahrzeug gegenüber einem "ÖKO"-Pkw mit konventionellem Treibstoff emissionsärmer sein kann, wenn die H₂-Verflüssigung durch eine direkte Ankopplung an die H₂-Prozesskette erfolgt.

Die scheinbar emissionsarme Erzeugung von H₂ durch Solarzellen und Wasserkraft wird bei den "RE"-Varianten durch die Bereitstellung konventioneller Elektrizität für die Verflüssigung somit stark relativiert. Beachtlich ist auch der disaggregierte Vergleich: Der direkt freigesetzt vor-Ort-Anteil der Emissionen ist bei den "RE"- und "REQ"-Varianten z.T. höher als beim "ÖKO"-Pkw, nur der "REQ"-Brennstoffzellen-Pkw liegt leicht günstiger. Das effiziente "ÖKO"-Auto erscheint damit für die nächsten Jahre als die unter Umweltgesichtspunkten attraktivere Option, wobei Aspekte der Kosteneffizienz noch unberücksichtigt blieben.

Mittelfristig stellt daher nicht die Bereitstellung neuer emissionsarmer Treibstoffe eine ökologisch orientierte Verkehrsstrategie dar, sondern die Ausnutzung der Effizienzpotentiale von Antriebssystemen für konventionelle Treibstoffe. "ÖKO"-Pkw mit großer Effizienz erfordern allerdings Einschränkungen bei Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Nutzlast.

Zur Bereitstellung des heute nachgefragten Transportdienstleistungs-Mix sind solche Fahrzeuge allein nicht geeignet. Vielmehr bedürfen sie einer Kombination mit schienengebundenen Systemen, bei denen ggf. H₂ als Treibstoff interessant sein könnte.

1 Einleitung

Im Rahmen des GEMIS-Projekts (kurz für Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme) wurde vom Öko-Institut in Kooperation mit der GH Kassel eine Datenbasis und Methodik für umweltbezogene Analysen und Vergleiche von Energiesystemen zur Bereitstellung von Wärme und Elektrizität entwickelt.

Die Datenbasis enthält energetische Kenngrößen (Nutzungsgrade, Leistung, Auslastung), Schadstoffemissionen (SO₂, NO_x, Staub, CO₂) sowie anfallende Reststoffe und Flächeninanspruchnahme. Weiterhin wurde ein Computerprogramm zur vergleichenden Umweltanalyse von Energiesystemen entwickelt¹.

Nach Abschluss des GEMIS-Projektes wurde das Programm im Auftrag der Klima-Enquete-Kommission weiterentwickelt, wobei neben CO₂ weitere klimarelevante Emissionen aufgenommen (CH₄, N₂O), eine Umrechnung auf CO₂-Äquivalente implementiert und ein Datensatz für 1987 erstellt wurde².

Im Zuge von Datenanpassungen für Schleswig-Holstein (ÖKO 1990), München (ÖKO 1991a), Berlin (ÖKO 1991b) und Hannover (ÖKO 1991c) wurde eine Anzahl von Verkehrssystemen sowie modernen Systeme zur Biomassenutzung und Kraft-Wärme-Kopplung in die Datenbasis aufgenommen.

Derzeit führt das Öko-Institut im Auftrag des Hessischen Ministers für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten eine Erweiterung und Ergänzung des GEMIS-Programms zur Version 2.0 durch (ÖKO, GHK 1991). Diese neue Version wird, neben der Einbeziehung einer orientierenden Kostenbilanzierung, auch die explizite Modellierung von Personen- und Güterverkehrssystemen erlauben. Dabei sollen auch Prozessketten für unkonventionelle Energieträger im Verkehrsbereich analysiert und dargestellt werden.

Im Zuge von Vorarbeiten zu dieser Untersuchung wird im Folgenden von ersten Ergebnissen berichtet, die sich auf Wasserstoff als Sekundärenergieträger im Verkehrssektor beziehen. Diesen werden orientierende Abschätzungen alternativer Verkehrssysteme gegenübergestellt.

Die Daten und Schlussfolgerungen sind als vorläufig anzusehen und müssen im Laufe der weiteren Arbeiten validiert oder ggf. modifiziert werden.

¹ Vgl. dazu näher Fritsche, Rausch, Simon (1989). Die Arbeiten zu GEMIS wurden durch den Hessischen Minister für Umwelt und Energie bzw. Wirtschaft und Technik in den Jahren 1987-1989 gefördert.

² vgl. dazu näher ÖKO 1989

2 Modellierung von Prozessketten zur H₂-Bereitstellung

Für die Fragestellung "H₂ als Treibstoff" wurden mit Hilfe des GEMIS-Programms verschiedene orientierende Prozessketten erstellt, die Wasserstoff als Sekundärenergieträger für Verkehrssysteme bereitstellen. Dabei wurden verschiedene Primärenergiequellen, Umwandlungstechniken und Transportsysteme einbezogen sowie Varianten zur Nutzung im Fahrzeug definiert. In Ergänzung wurden zur Definition eines Vergleichssystems auch ein "ÖKO"-Diesel-Fahrzeug mit abgebildet.

Als wesentliche Grundlage für die Modellierung mit GEMIS diente eine erste Literaturübersicht (VDI 1989; DECHEMA 1987; DLR 1986), die im Zuge von weiteren Arbeiten ergänzt werden wird (vgl. Abschnitt 6).

2.1 Energiequellen zur H₂-Bereitstellung

Als Energiequelle für die Erzeugung von Wasserstoff im Ausland wurde ein Mix von Strom aus Solarzellen und großen Wasserkraftanlagen (je 50 %) angenommen. Die Daten für diese Systeme beziehen sich auf Nordafrika und wurden auf Basis der Wasserstoff-Systemstudie der DLR und GEMIS-Daten definiert. Als Varianten hierzu können auch andere Energiequellen dienen, etwa das heutige Grundlast-Mix der Stromerzeugung, modernste Erdgas-GuD-Kraftwerke, Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung oder Atomkraftwerke.

2.2 H₂-Herstellung

Als Elektrolyseur zur Aufspaltung von H₂O wurden heutige Technik für den Grundlastbetrieb angesetzt, womit sich ein Strombedarf von 4,5 kWh/Nm³ H₂ ergibt. Ergänzend wurde die Frischwasserbereitstellung und Wasseraufbereitung in die Energiebilanz mit einbezogen, wobei Bedarfswerte nach Angaben der DLR-Systemstudie verwendet wurden.

2.3 Transport von H₂

Der Transport von H₂ von der ausländischen Gewinnung zu den Tankstellen in der BRD erfolgt im "Direkt"-Szenario in Form von Flüssigwasserstoff (LH₂) in Kühlschiffen und inländisch mit Kühllkw. LH₂ wird dabei direkt nach der Elektrolyse verflüssigt. Als Verflüssiger wird ein heute verfügbares System angenommen, das einen Strombedarf von 11 kWh/kg LH₂ aufweist.

Im "Indirekt"-Szenario wird gasförmiger H₂ über Hochdruck-Pipelines und ein lokales Niederdruck-Netz bereitgestellt und bei den Tankstellen verflüssigt. Für die Verflüssigung von H₂ bei der Tankstellen-Andienung über Pipelines wurde ein konventioneller Verflüssiger entsprechend dem im "Direkt"-Szenario angenommen.

Als weitere Variation wurde zwischen dem System zur Bereitstellung des Stroms für die Verflüssigung unterschieden. In den "RE"-Varianten wurde angenommen, dass der Strom im heutigen Mix der westdeutschen Kraftwerke erfolgt. In den "REQ"-Varianten wird dagegen unterstellt, dass angelieferter H₂ direkt in einem modernen GuD-Kraftwerk umgesetzt wird und so den Strom für die Verflüssigung aus der Prozesskette selbst stammt. Während in den "RE"-Varianten demnach fossile und nukleare Elektrizität in die Prozesskette eingekoppelt werden, bilden die "REQ"-Varianten die längerfristig mögliche Entwicklung zu einem "reinen" H₂-System ab³.

2.4 Nutzung von LH₂ in Verkehrssystemen

Zur Nutzung des LH₂ wurde ein auf H₂-Betrieb umgerüsteter Pkw mit Direkt-Injektions-Dieselmotor (DI) unterstellt sowie ein hypothetisches Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen (BZ). Beide Systeme können LH₂ über die "direkte" oder die indirekte Route an der Tankstelle erhalten.

Die Effizienz der Pkw wurde mit 40 kWh/100 km für das DI-Fahrzeug und mit 20 kWh/100 km für das BZ-Fahrzeug angesetzt. Diese spezifischen Verbräuche können mit einem konventionellen Fahrzeugdesign erreicht werden, wobei allerdings Beschränkungen bei Reichweite und Nutzlast auftreten. Dabei wird berücksichtigt, dass das (hypothetische) BZ-System aufgrund höherer Effizienz weniger Tankvolumen für die gleiche Fahrstrecke benötigt.

Als Vergleichssystem wurde ein "ÖKO"-Diesel-Fahrzeug angenommen, das ebenfalls über einen DI-Motor verfügt, aber extrem schwefelarmen Dieseltreibstoff einsetzt. Schon aufgrund der geringeren Tanklast ist dieses Fahrzeug effizienter als das LH₂-Vergleichsfahrzeug. Da aber die Treibstoffkosten beim "ÖKO"-Diesel auch bei gleicher Effizienz erheblich unter denen der H₂-Systeme liegen, wurde hier aus Konsistenzgründen ein deutlich effizienteres Fahrzeug angesetzt, das durch Leichtbauweise, elektronisches Motormanagement und Beschränkungen bei Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Nutzlast das LH₂-DI-System in der Treibstoffausnutzung um 50 % unterbietet.

Ein solches "ÖKO"-Auto wurde vom Öko-Institut in einer Studie zu gesamtdeutschen Energie-Szenarien als Strategiefahrzeug für den Verbund ÖPNV und Schienenfernverkehr vorgestellt (ÖKO 1991).

³ Allerdings wird für die Wasseraufbereitung und den Tankerantrieb auch in diesen Varianten der Einsatz von Erdgas bzw. Bunker-C-Öl angenommen.

3 Erste Ergebnisse der Energie- und Emissionsbilanzierungen

Die in Abschnitt 2 diskutierten Prozessketten und Varianten wurden mit GEMIS Version 1.3 für Vergleichsrechnungen als Anlagen und Szenarien definiert.

Für die Prozessketten zur Bereitstellung von Flüssigwasserstoff frei Fahrzeug (inkl. Betankungsverluste) ergeben sich die in Tabelle 1 aufgeführten Werte. Die "RE"-Szenarien beziehen sich auf die Bereitstellung von Strom für die H₂-Verflüssigung durch den heutigen Kraftwerkspark, die "REQ"-Szenarien dagegen auf die Bereitstellung des Verflüssiger-Stroms durch ein H₂-befeuertes GuD-Kraftwerk. Unter "dir" ist die direkte Route (LH₂-Transport) zu verstehen und unter "ind" die indirekte Route (Gastransport mit dezentraler Verflüssigung).

Tabelle 1: Primärenergie und Gesamtemissionen zur Bereitstellung von LH₂ frei Fahrzeug

Szenario	Primärenergie [kWh/kWh _{end}]	Schadstoff [g/kWh _{end}]					
		SO ₂	CH ₄	CO	NO _x	Staub	CO ₂
RE-LH ₂ -dir	4,19	0,38	0,62	0,22	0,87	0,06	325,9
RE-LH ₂ -ind	5,14	0,33	0,54	0,19	0,88	0,06	308,7
REQ-LH ₂ -dir	4,99	0,27	0,06	0,15	1,05	0,05	127,5
REQ-LH ₂ -ind	6,87	0,28	0,06	0,16	1,23	0,06	163,0

Quelle: eigene Berechnung mit GEMIS

Die Ergebnisse zeigen, dass zwischen den beiden Routen "direkt" und "indirekt" nur geringe Unterschiede bestehen, obwohl die jeweilig genutzte Infrastruktur für LH₂- bzw. H₂-Transporte sehr unterschiedlich ist. Die Varianten "RE" und "REQ" zeigen dagegen klare Unterschiede bei den Emissionen, da hier die Effekte der Ankopplung des "RE"-Wasserstoff-Systems an das bestehende fossil/nukleare Stromsystem zur Bereitstellung der Elektrizität für die Verflüssigung merkbar sind.

Wegen der geringen Unterschiede bei der "direkten" und "indirekten" Route wird im folgenden nur mit einer vorgelagerten Transportprozesskette gerechnet, die ein Mix von je 50 % direkter und indirekter Verflüssigung abbildet.

Die mit dieser Prozesskette "beliefernten" Verkehrssysteme wurden in einem zweiten GEMIS-Lauf verglichen. Als zu erbringende Dienstleistung wurde für alle Fahrzeuge die Bereitstellung von 1 Personen-km (P*km) angesetzt. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen die folgenden Tabellen,

In Tabelle 2 werden die Primärenergiebedarfe und Gesamtemissionen der Verkehrssysteme aufgeführt.

Tabelle 2: Primärenergiebedarf und Gesamtemissionen für die Fahrzeug-Vergleiche

Szenario	Primärenergie [kWh/P*km]	Schadstoff [g/P*km]					
		SO ₂	CH ₄	CO	NO _x	Staub	CO ₂
H ₂ -RE-DI	2,08	0,16	0,26	0,09	0,71	0,03	142,99
H ₂ -RE-BZ	1,30	0,10	0,16	0,06	0,26	0,02	90,51
H ₂ -REQ-DI	2,64	0,12	0,03	0,07	0,83	0,03	66,50
H ₂ -REQ-BZ	1,65	0,08	0,02	0,04	0,33	0,02	42,71
ÖKO-Diesel	0,23	0,01	0,08	0,02	0,04	0,01	58,51

Bei der Primärenergiebilanzierung wurden Solarstrom und Wasserkraft nicht mit einem Primärenergie-Äquivalent (PEÄ) umgerechnet, sondern der Nutzungsgrad der Stromerzeugung auf 100 % gesetzt (PEÄ = 1).

Durch Berücksichtigung der Strahlungseigenschaften und atmosphärischen Verweildauern kann GEMIS aus den klimarelevanten Emissionen auch "CO₂-Äquivalente" bestimmen, Diese Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle,

Tabelle 3: Klimarelevante Emissionen für die Fahrzeug-Vergleiche

in g/P*km	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ Äq
H ₂ -RE-DI	143,0	0,26	0,01	150,2
H ₂ -RE-BZ	90,5	0,16	0,00	94,4
H ₂ -REQ-DI	66,5	0,03	0,01	69,1
H ₂ -REQ-BZ	42,7	0,02	0,00	43,7
ÖKO-Diesel	58,5	0,08	0,00	60,6

Schließlich erlaubt GEMIS eine Umrechnung von gasförmigen Emissionen auf "Umweltkosten" (Monetarisierung) unter Verwendung des Vermeidungskostenansatzs. Bei der Heranziehung von Schadenskosten ergäben sich - außer bei CO₂ - ähnliche Werte.

Tabelle 4: Monetarisierete Umweltkosten der Gesamtemissionen für die Fahrzeug-Vergleiche

in Pf/P*km	ohne CO ₂	CO ₂ -niedrig	CO ₂ -hoch
H ₂ -RE-DI	0,4	0,6	1,8
H ₂ -RE-BZ	0,2	0,3	1,1
H ₂ -REQ-DI	0,4	0,5	1,1
H ₂ -REQ-BZ	0,2	0,2	0,6
ÖKO-Diesel	0,1	0,1	0,6

4 Vergleichende Diskussion der Ergebnisse

Die in Abschnitt 3 dargestellten Vergleiche führen zu dem Ergebnis, dass unter der Voraussetzung einer Ankopplung von regenerativ erzeugtem H₂ an ein fossil-nukleares Stromsystem zur Verflüssigung ("RE"-Varianten) sowohl ein DI-Pkw wie auch ein hypothetisches Brennstoffzellen-Fahrzeug höhere Emissionen (und auch andere Umwelteffekte) aufweisen als ein "ÖKO"-Pkw mit konventioneller Treibstoffversorgung⁴,

Die scheinbar emissionsarme Erzeugung von H₂ durch Solarzellen und Wasserkraft wird bei den "RE"-Varianten durch die Bereitstellung konventioneller Elektrizität für die Verflüssigung somit stark relativiert: Selbst wenn in Zukunft deutliche Verbesserungen (10-25%) der spezifischen Bedarfe für Elektrolyse und Verflüssigung angenommen würden, ergäben sich nur geringe Änderungen dieses Befundes. Auch die "REQ"-Varianten mit H₂-erzeugtem Strom für die Verflüssigung zeigen für den H₂-betriebenen D.I.-Pkw keinen Umweltvorteil gegenüber dem "ÖKO"-Pkw mit konventionellem Treibstoff. Nur der hypothetische Brennstoffzellen-Pkw liegt leicht günstiger als der "ÖKO"-Diesel.

Beachtlich ist auch der disaggregierte Vergleich: Der direkt freigesetzt vor-Ort-Anteil der Emissionen ist bei den "RE"- und "REQ"-Varianten z.T. höher als beim "ÖKO"-Pkw, nur der "REQ"-Brennstoffzellen-Pkw liegt leicht günstiger.

5 Vorläufige Schlussfolgerungen

Die orientierende Analyse von H₂-Prozessketten unter günstigen Annahmen für die H₂-Erzeugung durch Solar- und Wasserkraftstrom ergab für zukünftige H₂-Pkw-Szenarien, dass nur ein - noch hypothetisches - hocheffizientes Brennstoffzellen-Fahrzeug gegenüber einem "ÖKO"-Pkw mit konventionellem Treibstoff emissionsärmer sein kann, wenn die H₂-Verflüssigung durch eine direkte Ankopplung an die H₂-Prozesskette erfolgt.

Das effiziente "ÖKO"-Auto erscheint damit für die nächsten Jahre als die unter Umweltgesichtspunkten attraktivere Option, wobei Aspekte der Kosteneffizienz noch unberücksichtigt blieben.

Mittelfristig stellt daher nicht die Bereitstellung neuer emissionsarmer Treibstoffe eine ökologisch orientierte Verkehrsstrategie dar, sondern die Ausnutzung der Effizienzpotentiale von Antriebssystemen für konventionelle Treibstoffe. "ÖKO"-Pkw mit großer Effizienz erfordern allerdings Einschränkungen bei Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung und Nutzlast. Zur Bereitstellung des heute nachgefragten Transportdienstleistungs-Mix sind solche Fahrzeuge allein nicht geeignet. Vielmehr bedürfen sie einer Kombination mit schienengebundenen Systemen, bei denen ggf. H₂ als Treibstoff interessant sein könnte.

⁴ Dabei wird allerdings extrem schwefelarmer Dieselmotorkraftstoff unterstellt.

6 Ausblick auf weitere Arbeiten

Die vorgestellten Prozessketten und Szenarienvergleiche von Fahrzeugen beruhen auf einer ersten orientierenden Datendefinition, die durch eine Übersicht vorhandener Standard-Literatur gewonnen wurde. Ziel dieser Darstellung war die Erläuterung des Vorgehens bei komplexen Systemvergleichen sowie die oft anti-intuitiven Resultate von prozesskettenorientierten Szenario-Rechnungen.

Die bislang nur orientierenden Definitionen müssen im Zuge der anstehenden Arbeiten validiert und ggf. modifiziert werden, Schon jetzt sind aber die o.g. Resultate und Schlussfolgerungen wegen der vorsichtigen Datenwahl als robust anzunehmen.

Neben der Datenvalidierung ist es notwendig, einerseits weitere Treibstoffe (z.B. für Elektro-Pkw Prozessketten verschiedener Kraftwerksparte, Biomasse-Treibstoffe), andererseits weitere Verkehrssysteme (Bahn, Bus, Schiffe) zu untersuchen, um einen systemischen Vergleich kombinierter Transportnachfragen (vgl. unten) zu erlauben.

Weitere Arbeiten betreffen die Möglichkeiten zur solarthermischen Wasserstoffbereitstellung, die derzeit konzeptionell untersucht wird (Schüle 1989), sowie die Modellierung der verschiedenen Demonstrationsanlagen (z.B. HYSOLAR).

Auch hinsichtlich der Endenergiewandler im Fahrzeug müssen neuere Ergebnisse der Forschung und Entwicklung, insbesondere im Bereich von Diesel-Direkteinspritzung und Brennstoffzellen, in die Datenbasis integriert werden.

Generell erfordert ein systemischer Vergleich von Transportsystemen aber auch die genauere Abgrenzung von alternativen Verwendungsarten für Sekundärenergieträger, d.h. beispielsweise den Einsatz in stationären KWK-Systemen, sowie die Berücksichtigung von Dienstleistungselementen wie Reichweite und Betankungsmodi, Kopplungsmöglichkeiten zu anderen Transportsystemen (kombinierter modal split) und der Effizienz der Fahrzeuge selbst.

Statt einzelner Technologien und Treibstoffe sollten daher Kombinationen von Systemen verglichen werden, die zur Bereitstellung der gleichen Dienstleistung führen und deren Wechselwirkungen mit den vorgelagerten Energiesystemen (insbesondere Kraftwerkspark) durch Zurechnung entsprechender Anteile berücksichtigt werden. Hierzu werden im Rahmen der Erstellung von GEMIS-2,0 konzeptionelle Vorschläge entwickelt.

Bei der Umweltanalyse sind neben Emissionen, Flächeninanspruchnahme und Reststoffen auch qualitative Aspekte (z.B. Risiken, Artenvielfalt) einzubeziehen, um eine aussagefähige Bewertung von alternativen Verkehrsstrategien zu erlauben. Die hierzu erforderlichen Untersuchungen sind bislang nur in geringem Umfang erfolgt und nur wenig systematisiert, sodass künftige Arbeiten in diesem Bereich ansetzen müssen.

Literatur

DECHEMA 1987: Wasserstoffwirtschaft - Herausforderung an das Chemieingenieurwesen, DECHEMA-Monographien Band 106; Weinheim

Enquete (Enquete-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages) (Hrsg.) 1990: Energie und Klima - Studienprogramm "Internationale Konvention zum Schutz der Erdatmosphäre sowie Vermeidung und Reduktion energiebedingter klimarelevanter Spurengase" Bde. 1-10; Bonn

Fritsche U, Rausch L, Simon K-H 1989: Umweltanalyse von Energiesystemen: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS); Öko-Institut, GH Kassel; i.A. des Hessischen Ministers für Wirtschaft u. Technik (1.+2.Auflage Wiesbaden 1990, 3.+4.Aufl. 1991)

ÖKO (Öko-Institut) 1987: Sonnenenergiewirtschaft; Kohler S u.a.; Frankfurt

ÖKO (Öko-Institut) 1989: Emissionsmatrix für klimarelevante Schadstoffe in der BRD; Fritsche U; in: Enquete 1990 Bd. 2, S. 49-86

ÖKO (Öko-Institut) 1990: Anwendung des GEMIS-Programms auf die Endenergieanalyse für Schleswig-Holstein; Fritsche U, Kohler S; i.A. des Ministers für Gesundheit, Soziales und Energie Schleswig-Holstein; Darmstadt, Freiburg

ÖKO (Öko-Institut) 1991a: Externe Kosten von Heizsystemen in München; Fritsche U, Kohler S; i.A. der Stadt München; Darmstadt

ÖKO (Öko-Institut) 1991b: Anpassung des GEMIS-Programms an die Energie- und Umweltdaten für Berlin (West+Ost) sowie die DDR; Fritsche U, Matthes F; i.A. des Umweltsenators Berlin; Darmstadt, Berlin

ÖKO (Öko-Institut) 1991c: Untersuchung der Verursacheranteile klimarelevanter Emissionen in Hannover; Fritsche U u.a. ; i.A. des Umweltamts der Stadt Hannover; Darmstadt, Kassel, Freiburg

ÖKO (Öko-Institut)/GHK (Gesamthochschule Kassel) 1991: GEMIS 2.0 - Integriertes Computermodell zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie- und Verkehrssystemen; Forschungsprojekt i.A. des Hessischen Ministers für Umwelt, Energie, Reaktorsicherheit und Bundesangelegenheiten; Darmstadt, Kassel

Schüle M 1989: Solarthermische Wasserstofferzeugung; in: Brennstoff-Wärme-Kraft Jg. 41 (1989) Heft 3, S. 101 ff

VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 1989: Wasserstoff-Energietechnik II; VDI-Bericht 725; Düsseldorf

Winter C-J, Nitsch J (Hrsg.) 1989: Wasserstoff als Energieträger; Berlin, Heidelberg, New York (2. überarb. u. erw. Aufl.)