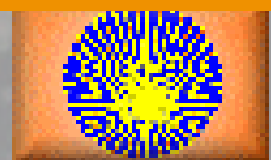




Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

**P. Biedermann, K. U. Birnbaum, Th. Grube,
B. Höhle, J. Linßen, A. Lokurlu, R. Menzer,
M. Walbeck, J.-Fr. Hake, D. Stolten**



Forschungszentrum Jülich GmbH

Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung

Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik

Institut 3 - Energieverfahrenstechnik

Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

Peter Biedermann

Karl Ulf Birnbaum

Thomas Grube

Bernd Höhle

Jochen Linßen

Ahmet Lokurlu

Reinhard Menzer

Manfred Walbeck

Jürgen-Friedrich Hake

Detlef Stolten

Schriften des Forschungszentrums Jülich

Reihe Energietechnik / Energy Technology

Band 19

ISSN 1433-5522

ISBN 3-89336-310-6

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen / Peter Biedermann -Jülich:

Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2002

(Schriften des Forschungszentrums Jülich. Reihe Energietechnik / Energy Technology; Bd. 19)

ISBN 3-89336-310-6

Herausgeber
und Vertrieb:

Forschungszentrum Jülich GmbH
ZENTRALBIBLIOTHEK
D-52425 Jülich
Telefon (0 24 61) 61- 5368, Telefax (0 24 61) 61- 6103
e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de
Internet: <http://www.fz-juelich.de/zb>

Covergestaltung:

Grafische Betriebe, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck und elektronische
Vervielfältigung:

Fa. Punkt GmbH, Berlin

Copyright:

2002

Schriften des Forschungszentrums Jülich

Reihe Energietechnik / Energy Technology Band / Volume 19

ISSN 1433-5522

ISBN 3-89336-310-6

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder in anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.



Vorwort

Der Bericht wurde in gestraffter Form in der Art einer gegliederten, logisch aufgebauten Folienpräsentation gestaltet. Dabei wurde der begleitende Texte entweder als Folie oder als weitere Erläuterung zur Folie mit einer aktiven Verknüpfung ( **Folienerläuterung**) abgelegt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	7
1 Einleitung und allgemeiner Stand der Technik	9
Folie 2: Brennstoffzellen für den Energiemarkt	10
Folie 3: Kenntnisstand (I)	11
Folie 4: Kenntnisstand (II)	12
Folie 5: Kenntnisstand (III)	13
Folie 6: Kenntnisstand (IV)	14
Folie 7: Arbeitsansätze	15
2 Fahrzeuganalysen.....	16
Folie 9: Anforderungen an Brennstoffzellen-Elektroantriebe (I)	17
Folie 10: Anforderungen an Brennstoffzellen-Elektroantriebe (II)	18
Folie 11: Limitierte Emissionen: Standards und PEFC-Elektrofahrzeuge	19
Folie 12: Auswahl: Brennstoffzellen-Systeme für Traktion.....	20
Folie 13: Vergleich von Antriebskonzepten (H_2 , CH_3OH , C_8H_{18}).....	21
Folie 14: Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Konfiguration des Systems	22
Folie 15: Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Methodik	23
Folie 16: Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Ergebnisse und Vergleich mit Literaturdaten.....	24



Folie 17: Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Energie- und Leistungsmanagement.....	25
Folie 18: Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen: PEFC-Elektrofahrzeuge (Beispiel: Methanol)	26
Folie 19: Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen: Klassenbildung und Fahrzeugkennwerte	27
Folie 20: Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen Randbedingungen der Rechnungen.....	28
Folie 21: Vergleich simulierter Energieverbräuche in den Fahrzeugklassen	29
Folie 22: Sensitivitätsanalyse: Leistungsgewicht Antriebstrang Beispiel: Methanol-PEFC–Elektrofahrzeug	30
Folie 23: Fahrzeugklassenbildung PEFC-Elektrofahrzeuge	31
Folie 24: APU (Auxiliary Power Unit) zur Bordenergieversorgung	32
Folie 25: SOFC-System für eine APU (Auxiliary Power Unit).....	33
Folie 26: Vergleich: Brennstoffzellen-APU vs. Verbrennungsmotor/ Generator	34
Folie 27: Busse und Bahnen (I) BZ-Elektroantriebe für den Öffentlichen Personenverkehr	35
Folie 28: Busse und Bahnen (II) Vorteile BZ- und Elektro-Antrieb vs. Diesel-Antrieb.....	36
Folie 29: Ausführungsbeispiele PEFC-Busantriebe	37
Folie 30: Kriterien und Anforderungen: Traktion für die Schiene	38
Folie 31: Fahrzeuganalysen: Zusammenfassung	39
3 Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale.....	40
Folie 33: Endenergieträger-Auswahl	41
Folie 34: Bereitstellungswege Kohlenwasserstoff-basierter Kraftstoffe	42
Folie 35: Zusätzlicher Primärenergieeinsatz für die Kohlenwasserstoff- basierte Bereitstellung von 1 MJ Kraftstoffenergieinhalt (I).....	43
Folie 36: Zusätzlicher Primärenergieeinsatz für die Kohlenwasserstoff- basierte Bereitstellung von 1 MJ Kraftstoffenergieinhalt (II).....	44



Folie 37: CO ₂ -Emissionen der Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung (I)	45
Folie 38: CO ₂ -Emissionen der Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung und Verbrennung	46
Folie 39: CO ₂ -Emissionen der Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung (II)	47
Folie 40: Infrastruktur Kraftstoffe	48
Folie 41: Infrastruktur Mineralöltransport.....	49
Folie 42: Infrastruktur Erdgastransport	50
Folie 43: Tankstellenbestand und Kraftstoffabsatz in Deutschland	51
Folie 44: Investitionskosten von Komponenten der Infrastruktur	52
Folie 45: Kostensituation für neue Kraftstoffe (ohne Steuer)	53
Folie 46: Kraftstoffpreise in Abhängigkeit vom Rohölpreis.....	54
Folie 47: Verfügbarkeit Biokraftstoffe (I)	55
Folie 48: Verfügbarkeit Biokraftstoffe (II)	56
Folie 49: Sicherheitstechnische Daten der Kraftstoffe	57
Folie 50: Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale- Zusammenfassung	58
4 Kostenanalysen.....	59
Folie 52: Anlegbarer Aufpreis für einen Diesel-Pkw mittlere Fahrzeugklasse	60
Folie 53: Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw kleine Fahrzeugklasse	61
Folie 54: Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw mittlere Fahrzeugklasse	62
Folie 55: Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw große Fahrzeugklasse	63
Folie 56: Anlegbarer Aufpreis für einen CH ₂ PEFC-Elektro-Bus	64
Folie 57: Betriebskostenvergleich.....	65
Folie 58: Beispiel für momentane Kostenstruktur: Stationäre Anwendung, PEFC-BHKW 250 kW _e	66



Folie 59: Heutige Kostenverteilung PEFC-Stack	67
Folie 60: Heutige Kostenverteilung reine Materialkosten (PEFC-Stack)	68
Folie 61: Kostenanalysen: Zusammenfassung	69
5 Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen.....	70
Folie 63: Energieumwandlungsketten für Pkw - NEFZ-Fahrzyklus	71
Folie 64: Aufbereitung der Simulationsdaten - Schematische Abbildung der Datenaggregation	72
Folie 65: Definition IKARUS-Verkehrsmuster	73
Folie 66: Spezifischer Energiebedarf (Fahrzeugbetrieb)	74
Folie 67: Spezifischer Primärenergiebedarf (Gesamt-EUK)	75
Folie 68: Spezifische CO ₂ -Emissionen (Fahrzeugbetrieb)	76
Folie 69: Spezifische CO ₂ -Emissionen (Gesamt-EUK).....	77
Folie 70: Abschätzung der maximalen CO ₂ -Einsparpotenziale im Pkw-Verkehr	78
Folie 71: Abschätzung der maximalen CO ₂ -Einsparpotenziale im Gesamt-Verkehr (Personen- und Güterverkehr)	79
Folie 72: Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen: Zusammenfassung	80
6 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen.....	81
Folie 74: Vom Technikum zum Markt	82
Folie 75: Kraftstoffe und Brennstoffzellen-Elektroantriebe	83
Folie 76: Handlungsstrategien für den Einsatz von Brennstoffzellen (I) ...	84
Folie 77: Handlungsstrategien für den Einsatz von Brennstoffzellen (II) ..	85
Folie 78: Handlungsstrategien für den Einsatz von Brennstoffzellen (III) .	86
Anhang.....	87
Folienerläuterungen	93



Kurzfassung

Studienbeschreibung

Die Studie "Brennstoffzellen für mobile Anwendungen" wurde gemeinschaftlich von der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung STE (Federführung) sowie dem Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik IWW-3 des Forschungszentrum Jülich erarbeitet.

Angesetzt wurde bei der zur Zeit diskutierten Frage nach den Möglichkeiten des Einsatzes von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen auf dem Weg zu einer zukünftigen "Nachhaltigen Mobilität". In diesem Kontext wurde untersucht, ob mit den bereits sichtbaren und den zukünftig erwarteten Eigenschaften von Brennstoffzellenantrieben im Energiebedarfs-sektor "Verkehr" Vorteile in Bezug auf Umweltsituation und Energieträgerversorgung erwartet werden können, auch im Vergleich zu weiterentwickelten konventionellen Fahrzeugen. Ein Schwerpunkt der Untersuchung lag bei der Ermittlung von Technik- und Kraftstoffbereitstellungsdaten sowohl für mit Brennstoffzellen angetriebene als auch für weiterentwickelte konventionelle Kraftfahrzeuge. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden F&E-Schwerpunkte im Bereich der mobilen Brennstoffzellen-Anwendungen identifiziert und Handlungsempfehlungen gegeben.

Arbeitsprogramm

Im einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte bearbeitet und abgeschlossen:

- Analyse von Brennstoffzellenantrieben nach ökonomischen und ökologischen Kriterien unter Berücksichtigung technischer Innovationen für Stacks, Peripherieeinheiten und Elektro-Antriebe
- Fahrzeugsimulationen und Validierung der gewonnenen Ergebnisse
- Analysen für zukünftige Energieträger: Verfügbarkeit, Herstellung, Transport, Infrastrukturen, Kosten, Spezifikationen, Sicherheits- und Zulassungsbestimmungen
- Bedingungen der Markteinführung: Steuern, Umweltauflagen und Akzeptanz
- Potenzialabschätzungen: Energie- und Emissionsbilanzen

Ergebnisse der Arbeiten

Zur Analyse von Technik- und Kraftstoffbereitstellungsdaten wurden rechnergestützte Modelle verwendet. Die technischen Systemanalysen von Brennstoffzellen-Antriebssystemen in Fahrzyklen wurden mit Hilfe des längsdynamischen Simulationsmodells



SIMBA durchgeführt. Besonderes Augenmerk galt der Ermittlung von Energiebedarfs- und Emissionsdaten des Gesamtfahrzeugsystems. Die Betrachtung des Energie- und Leistungsmanagements sowie die Klassifizierung der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge nach verschiedenen Fahrzeugklassen waren Gegenstand weiterer Untersuchungen. Dabei hat sich gezeigt, dass durch die Einführung eines elektrischen Speichers beim Methanol-Fahrzeug mit Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEFC) in Verbindung mit einer Bremsenergieerückgewinnung eine Energieeinsparung möglich ist. Die Ergebnisse der Fahrzeugklassen-Spreizung haben für die untersuchten Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge eine sehr große Streubreite bei den Emissionen und auch beim Kraftstoffbedarf erkennen lassen.

Die verschiedenen Wege einer Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung wurden mit Hilfe des Bilanzierungsmodells KRAKE ausgewertet und der zugehörige Primärenergiebedarf sowie die CO₂-Emissionen der vorgelagerten Kette ermittelt. Die Ergebnisse für die verschiedenen Bereitstellungswege weisen in Abhängigkeit vom untersuchten Endenergieträger und den unterstellten Herstellungs- und Transportpfaden eine breite Streuung auf.

Die Einführung neuer Kraftstoffe wurde vor dem Hintergrund von Verfügbarkeit, Erzeugung, Transport, Infrastrukturen, Kosten, Spezifikationen, Sicherheits- und Zulassungsbestimmungen betrachtet.

Mögliche Aufpreise für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge wurden mit Hilfe von Anlegbarkeitsüberlegungen überprüft. Ein Vergleich der Betriebskosten für verschiedene Fahrzeugklassen wurde durchgeführt, wobei für die Wirtschaftlichkeitsüberlegungen Modifikationen bei der Mineralölsteuergesetzgebung unterstellt wurden. Die Kostenstruktur eines Brennstoffzellen-Stacks wurde an einem Ausführungsbeispiel aus der stationären Anwendung nachvollzogen. Kostensenkungspotenziale wurden insbesondere beim Herstellungsprozess des Stacks identifiziert, da bei einer großtechnischen Serienfertigung wesentliche Einspareffekte zu erwarten sind.

Um deutlich zu machen, wie sich die Ergebnisse der Analyse einzelner Technik- und Kraftstoffbereitstellungs-Konzepte im Gesamtkontext des Verkehrs und der Energieversorgung auswirken, wurden abschließend Energieumwandlungsketten ganzheitlich analysiert. Mittels des rechnergestützten IKARUS-Verkehrsmodells wurden Potenzialabschätzungen bezüglich Energiebedarfs- und Emissionsreduzierungen im Verkehr bei der Einführung der Brennstoffzellentechnik im Pkw-Bereich mit Hilfe von Szenario-rechnungen durchgeführt. Als Vergleichsbasis für die Verbrauchs- und Emissionsfaktoren von konventionellen und fortschrittlichen Verbrennungsmotor-Fahrzeugen wurde die Datenbank des IKARUS-Modells verwendet. Bezogen auf die Emissionen des Gesamtverkehrs ergab sich bei den unterstellten Kraftstoffbereitstellungspfaden und Fahrzeugen nur eine geringe Reduzierung der CO₂-Emissionen im Vergleich zum Einsatz fortschrittlicher Verbrennungsmotor-Fahrzeuge.

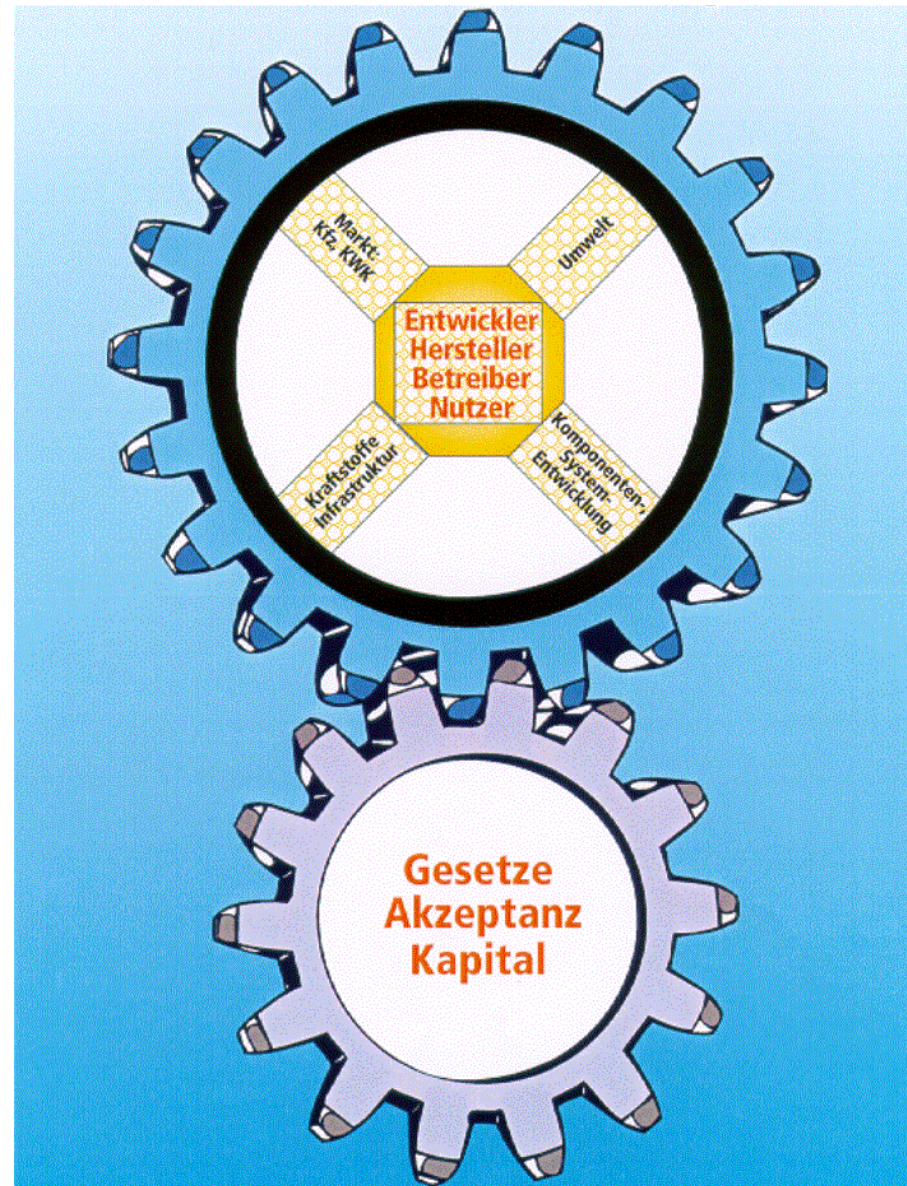


Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen



1) Einleitung und allgemeiner Stand der Technik

- 2) Fahrzeuganalysen**
- 3) Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale**
- 4) Kostenanalysen**
- 5) Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen**
- 6) Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen**



Brennstoffzellen für den Energemarkt



Kenntnisstand (I)

In der Entwicklung und Erprobung befindliche Brennstoffzellen-Elektroantriebe werden sich an konkurrierenden Antriebssystemen messen lassen müssen.

- **Antriebe konventioneller Bauart mit Verbrennungsmotoren**
- **Hybridantriebe mit systembedingt höheren Gewichten und Kosten**
- **Elektroantriebe mit batteriebedingt höheren Gewichten und Kosten**



Kenntnisstand (II)

Der Einsatz von nicht-fossil erzeugtem Wasserstoff als Brenngas wird die besonderen Vorteile der Brennstoffzellen gegenüber konventionellen Lösungsansätzen aufzeigen können:

- **spezifischer Energiebedarf**
- **spezifische Emissionen**



Kenntnisstand (III)

Nicht für Nischenlösungen, wohl aber für den mittelfristigen Energiemarkt gilt, dass andere Energieträger als Wasserstoff Vorrang haben werden:

- **Erdgas für stationäre Anwendungen und für VM***
- **Erdgas, Alkohole**, flüssige synthetische Kohlenwasserstoffe** für mobile Anwendungen**

* VM = Verbrennungsmotor

** mit An-Bord-Wasserstoff-Erzeugung in einem Brennstoffzellen-Elektro-Kfz



Kenntnisstand (IV)

Die Ausrichtung der Brennstoffzellenentwicklung für mobile Anwendungen ist geprägt durch die Diskussion über

- **den „richtigen“ Kraftstoff,**
- **Funktionstüchtigkeiten der Technik,**
- **Kostensenkungen und**
- **neue Wertschöpfungspotenziale.**



Arbeitsansätze

Analyse von Brennstoffzellenantrieben nach ökonomischen und ökologischen Kriterien unter Berücksichtigung technischer Innovationen für Stacks, Peripherieeinheiten und Elektro-Antriebe

Fahrzeugsimulationen und Validierung

Analysen für zukünftige Energieträger:

Verfügbarkeit, Herstellung, Transport, Infrastrukturen, Kosten, Spezifikationen, Sicherheits- und Zulassungsbestimmungen

Bedingungen der Markteinführung:

Steuern, Umweltauflagen und Akzeptanz

Potenzialabschätzungen:

Energie- und Emissionsbilanzen der Energieumwandlungsketten



Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

1) Einleitung und allgemeiner Stand der Technik



2) *Fahrzeuganalysen*

3) Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale

4) Kostenanalysen

5) Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen

6) Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen



Anforderungen an Brennstoffzellen-Elektroantriebe (I)

- Zelle:** fester Elektrolyt
hohe Leistungsdichte
- Stack:** hohe Leistungsdichte
gute Wärmeabfuhr (Flüssigkeitskühlung)
- System:** schnelle Betriebsbereitschaft
gutes dynamisches Verhalten (Laständerungsgeschwindigkeit)
hoher Wirkungsgrad für Nettostromerzeugung
Bereitstellung elektrischer Energie im *Stand-By*-Modus
geringe Stillstandsverluste
hohe Erschütterungsunempfindlichkeit
minimales Gefährdungspotenzial
Kostensenkungspotenzial: Stack und insbesondere Peripherie



Anforderungen an Brennstoffzellen-Elektroantriebe (II)

Kraftstoff: hohe Energiedichte (Reichweite)
langfristige Verfügbarkeit
langfristig: nicht-fossile Basis

Brenngaserzeugung an Bord:

hohe Kraftstoffvariabilität
gutes dynamisches Verhalten
geringe Beeinträchtigung des Wirkungsgrades für Nettostrom

Fahrzeug: hohes Beschleunigungsvermögen (Leistungsspeicher)
genügende Reichweite (Energiespeicher)
Bremsenergie-Rückgewinnung und -Speicherung (*Stop+Go*)



Limitierte Emissionen: Standards und PEFC-Elektrofahrzeuge

Emissions-Standards	CO mg/km	NO _x mg/km	NMOG mg/km	PM 10 mg/km
Europa EURO 2005 OK/DK	1000 / 500	80 / 250	100 / 50 ⁴⁾ (KW)	- / 25
Kalifornien ¹⁾ ULEV 120.000 M	1312	43	34	6
SULEV 120.000 M (= Near Zero: Nissan (Benzin) Ford, Honda (CNG), FC MeOH, Hybrid-Antriebe)	625	12	6	6
ZEV (Batterie, H ₂ -BZ)	0	0	0	0
Methanol-PEFC-Elektrofahrzeug (Methanolreformer, Katalyt- Konverter, Brennstoffzelle, Elektromotor (Technikum) ^{2) 3)})	1 ± 0,2	0,13 ± 0,025	1 ± 0,2	0

¹⁾Kalifornische Standards nach ARB-Vorschlag vom Dez. 1997; ²⁾Quelle bezüglich Emissionen: [RIEDEL 1996]; ³⁾entsprechend 1,0 - 1,4 MJ/km;

⁴⁾Summe VOC + NO_x = 300 mg/km;

CO = Kohlenmonoxid; NMOG flüchtige organische Gase ohne Methan; NO_x Stickoxide; PM10 Partikel (10µm^Ø); KW Kohlenwasserstoffe



Auswahl: Brennstoffzellen-Systeme für Traktion

- **PEFC**-Niedertemperatur-Systeme kommen heute für die Traktion vorrangig bei Straßen- oder Schienenfahrzeugen in Betracht.
- **AFC**-Niedertemperatur-Systeme setzen den Betrieb mit reinem Sauerstoff und Wasserstoff voraus; Sauerstoffspeicherung bzw. Luftzerlegung erschwert die mobile Anwendung.
- **PAFC**-Niedertemperatur-Systeme haben nach allen vorliegenden Erfahrungen ein zu niedriges Kostensenkungspotenzial und einen für mobile Anwendungen nicht geeigneten flüssigen Elektrolyten.
- **MCFC**-Hochtemperatur-Systeme werden u.a. wegen des geschmolzenen Elektrolyten keine Anwendung für die Traktion finden.
- **SOFC**-Hochtemperatur-Systeme haben bei geringerem Brenngaserzeugungsaufwand einen höheren elektrischen Wirkungsgrad. Gegen SOFC-Systeme sprechen: aufwendigere Anfahrprozeduren, hohe Standverluste, aufwendige Isolierung, Empfindlichkeit gegenüber Erschütterungen; APU-Anwendungen sind in der Diskussion.

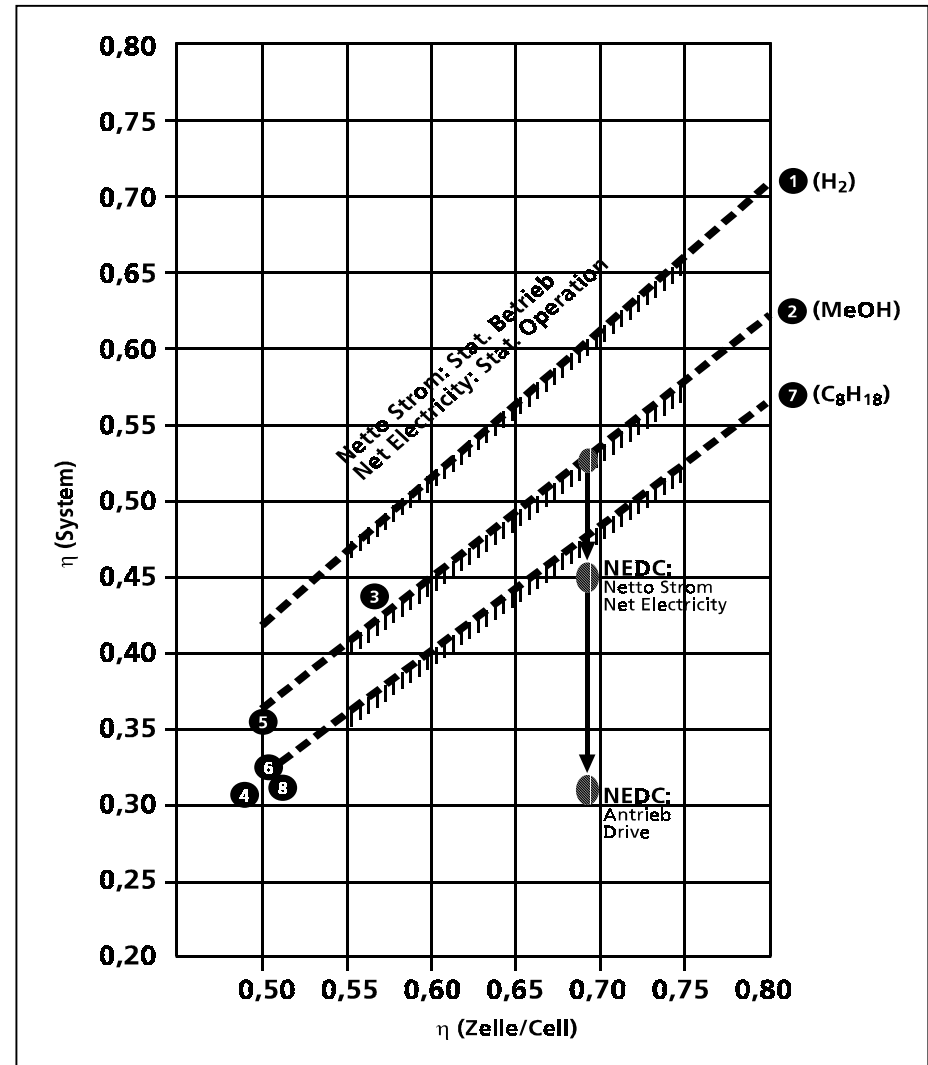




Vergleich von Antriebskonzepten (H_2 , CH_3OH , C_8H_{18})

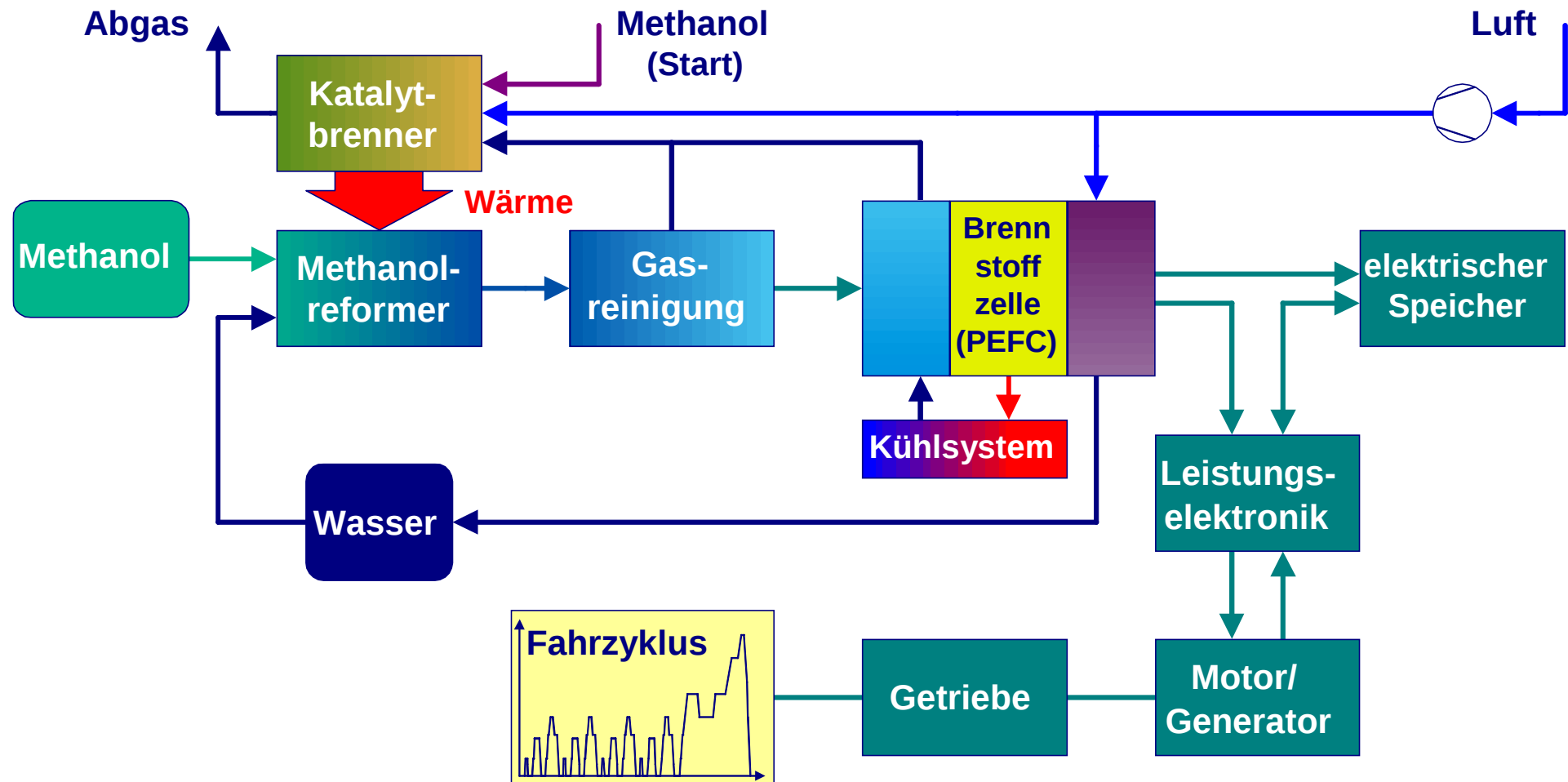
- Verfahrensführung abhängig vom Kraftstoff
- Verfahrensanalyse Netto-Stromerzeugung
 - BZ-System ohne Elektroantrieb
 - Keine Lastabhängigkeiten
- Dynamische Antriebssimulation
 - Betriebsverhalten im NEFZ
 - Beschreibung bisher nur für Pkw mit Hilfe von Betriebskennfeldern und Übergangsfunktionen

- 1 – MENZER/HÖHLEIN (1999): Wasserstoff
- 2 – MENZER/HÖHLEIN (1999): Methanol: HSR / Membran
- 3 – LAMM (1999): Methanol: HSR / Membran
- 4 – ETSU (1999): Methanol: HSR / Shift / PROX
- 5 – ETSU (1999): Methanol: HSR / Membran
- 6 – ETSU (1999) - Methanol: ATR
- 7 – MENZER/HÖHLEIN (1999) Benzin: ATR
- 8 – LAMM (1999): Benzin: ATR





Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Konfiguration des Systems





Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Methodik

● Fahrzeug und Fahrzyklus

- Methanol-Dampfreformer, Gastrenn-Membran und PEFC-Brennstoffzelle, elektrischer Speicher als Kurzzeit-Energiespeicher
- Fahrzyklus: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ), Teilzyklen Stadt (ECE) und Überland (EUDC)

● Datengrundlage

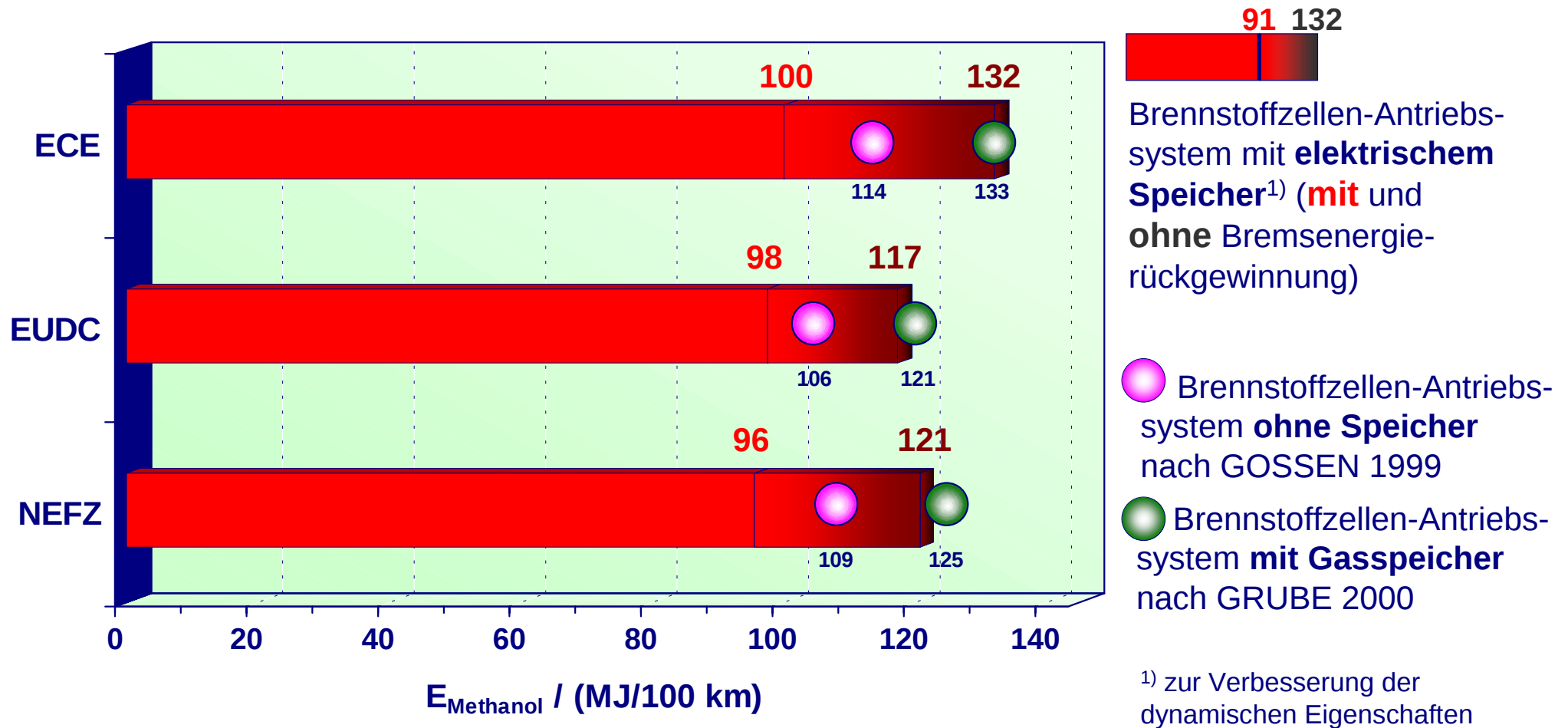
- Kennlinien und Kennfeldern (Elektromotor, Brennstoffzelle, Reformer)
- Übergangsfunktionen (Reformer, Gastrenn-Membran)
- experimentelle Ergebnisse des FZJ (Brenngaserzeugung)

● Auslegung/Definition

- Leistungsklassifizierung entsprechend heutiger Pkw
(Höchstgeschwindigkeit: 170 km/h, 0 auf 100 km/h in 15 s)
- Bandbreite für ausgewählte Parameter (z.B. Leergewicht, Widerstandsbeiwerte, spezifisches Antriebsgewicht, Wirkungsgrad der Brennstoffzelle)



Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Ergebnisse und Vergleich mit Literaturdaten





Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Energie- und Leistungsmanagement

● Elektrischer Kurzzeit-Energiespeicher

- Verbesserung der dynamischen Eigenschaften der Strombereitstellung
- Möglichkeit der Rückspeisung von Energie bei Bremsvorgängen durch Motor/Generator (Bremsenergie-Rückgewinnung)
- Kaltstartverhalten des Systems nicht berücksichtigt

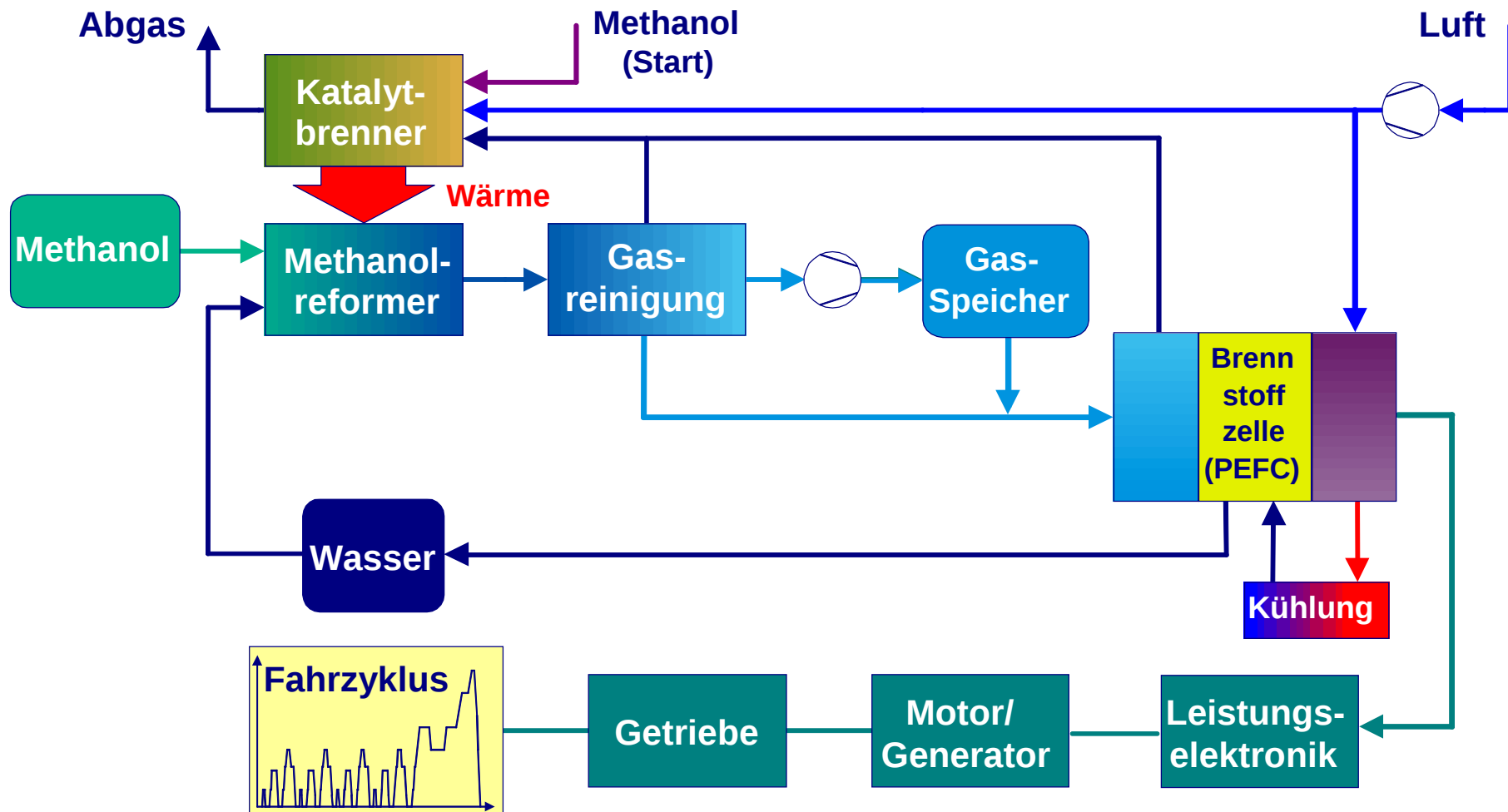
● Ergebnisse als Mittelwerte aus der Bandbreitendefinition

- Reduzierung des Energiebedarfs in den Fahrzyklen durch Bremsenergie-Rückgewinnung um 16 % bis 24 %
- im Stadtzyklus (ECE) größtes Potential zur Verringerung des Energiebedarfs durch Bremsenergie-Rückgewinnung (häufige Bremsvorgänge)





Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen PEFC-Elektrofahrzeuge (Beispiel: Methanol)





Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen Klassenbildung und Fahrzeugkennwerte

	Klasseneinteilung		
	klein	mittel	groß
Fahrzeugbasisgewicht (ohne Antrieb und Tanksystem) [kg]	860	950	1270
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0,32	0,3	0,3
Querspanfläche [m ²]	1,9	2,0	2,2
Rollwiderstandsbeiwert	0,0095	0,0095	0,0095
Maximale Geschwindigkeit [km/h]	150	180	220
Beschleunigungsvermögen 0 - 100 km/h [s]	15	11	9

Äußere Anforderungen
(Kunde, Hersteller usw.)
an das Fahrzeug

CH₂ - PEFC-Elektrofahrzeug

	Klasseneinteilung		
	klein	mittel	groß
Nettoantriebsleistung [kW _{Rad}]	43	80	140
Stack-Bruttoleistung [kW _{el}]	75	135	270
Antriebsgewicht [kg/kW _{Rad}]	6	6	6
Fahrzeuggewicht (ohne Fahrer) [kg]	1123	1435	2117
Reichweite [km]	500	500	500

MeOH - PEFC-Elektrofahrzeug

	Klasseneinteilung		
	klein	mittel	groß
Nettoantriebsleistung [kW _{Rad}]	53	95	185
Stack-Bruttoleistung [kW _{el}]	90	160	310
Antriebsgewicht [kg/kW _{Rad}]	8	8	8
Fahrzeuggewicht (ohne Fahrer) [kg]	1319	1750	2801
Reichweite [km]	500	500	500





Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen: Randbedingungen der Rechnungen

● Fahrzeug und Fahrzyklus

- Methanol-Dampfreformer, Gastrenn-Membran und PEFC-Brennstoffzelle
- Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ)

● Datengrundlage

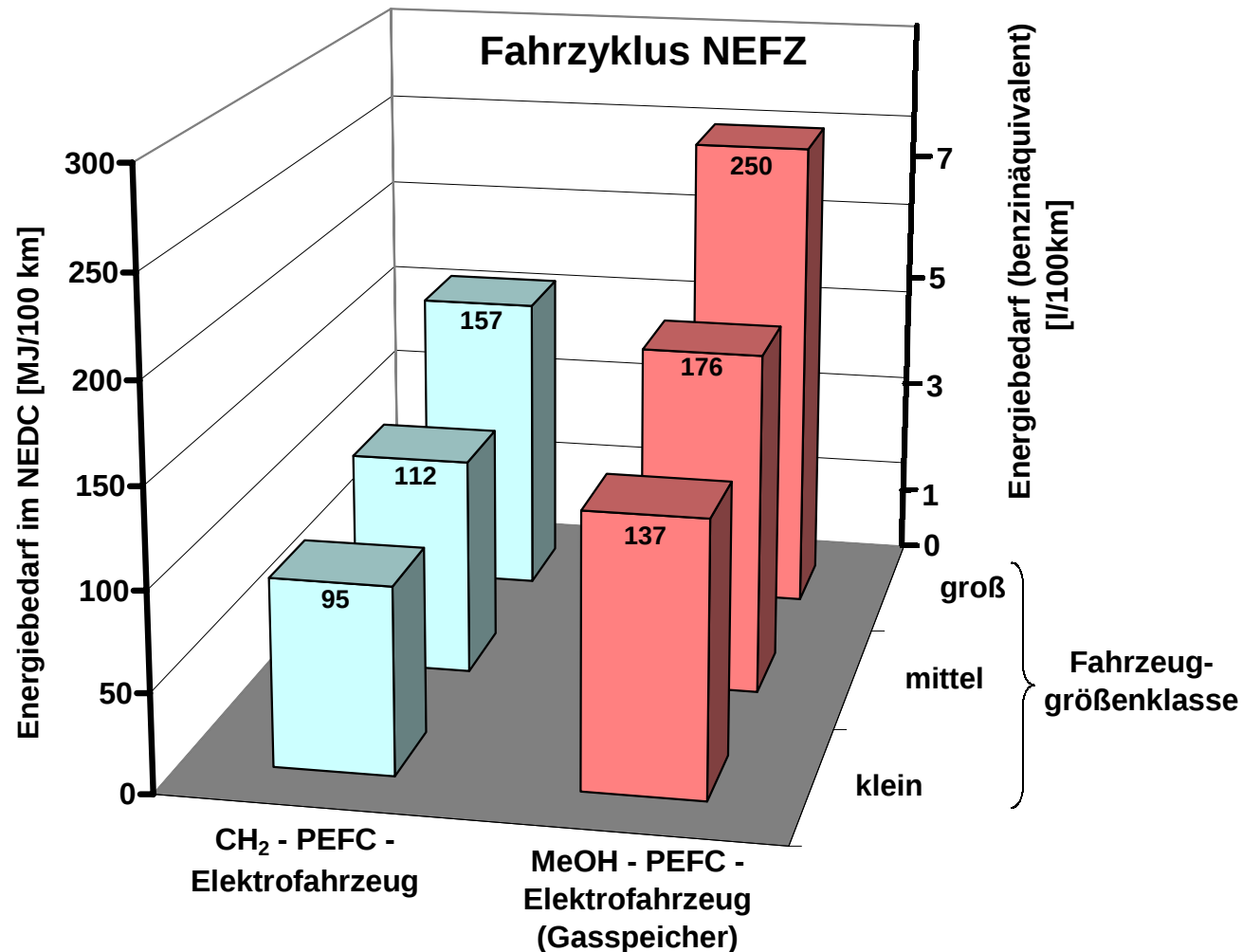
- Kennlinien und Kennfeldern (Elektromotor, Brennstoffzelle, Gas-Zwischenspeicher Reformer)
- Übergangsfunktionen (Reformer, Gastrenn-Membran)
- experimentelle Ergebnisse des FZJ (Brenngaserzeugung)

● Auslegung/Definition

- Fahrzeugklassifizierung entsprechend Anforderungen an die Fahrdynamik (Kriterien: Höchstgeschwindigkeit, max. Beschleunigung)
- Spreizung ausgewählter Fahrzeug- und Antriebsstrangparameter (z.B. Leergewicht, Widerstandsbeiwerte, spezifisches Antriebsgewicht)

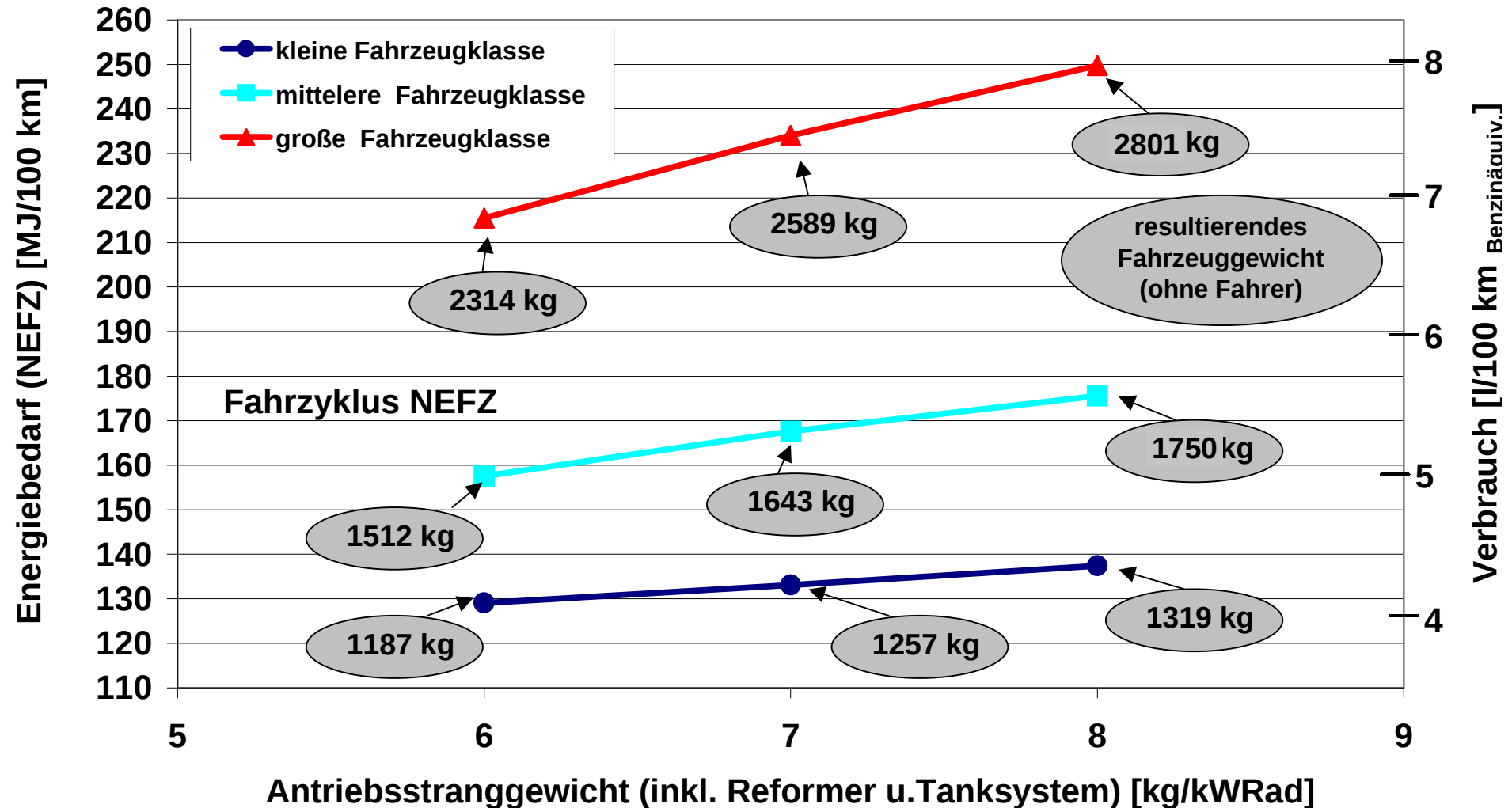


Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen: Energiebedarf in den Fahrzeugklassen





Sensitivitätsanalyse: Leistungsgewicht Antriebsstrang Beispiel: Methanol-PEFC-Elektrofahrzeug





Fahrzeugklassenbildung PEFC-Elektrofahrzeugen

- Die Modellsimulationen der PEFC-Elektrofahrzeuge im NEFZ-Fahrzyklus ergeben große Bandbreiten des Energiebedarfs für die exemplarisch gebildeten Fahrzeugklassen

(CH ₂ -PEFC-Elektro-Pkw	95 – 157 MJ/100 km
Methanol-PEFC-Elektro-Pkw	137 – 250 MJ/100 km)
- Der Wirkungsgradvorteil durch den höheren Teillastanteil des BZ-Systems bei leistungsstarken BZ-Elektrofahrzeugen wird bei den angenommen Leistungsgewichten durch den höheren Energiebedarf (Mehrgewicht des Antriebsstrangs) wieder kompensiert.
- Der progressive Anstieg des Energiebedarfs von leistungsstarken Fahrzeugen, bedingt durch das hohe Leistungsgewicht des Antriebsstrangs,
 **lässt eine Markteinführung von Brennstoffzellenantriebssystemen bei kleinen Fahrzeugen erwarten.**



APU (Auxiliary Power Unit) zur Bordenergieversorgung

- Kraftfahrzeugen statt Lichtmaschine + Bleiakkumulator
 - Flugzeugen statt zusätzlicher Gasturbine
 - in - Schiffen, Sportbooten statt Diesellaggregat + Bleiakkumulator
 - Wohnmobilen, Wohnwagen zur Elektrizitätsversorgung
 - Notstromaggregaten
- Insbesondere bei stehendem Fahrzeug oder Flugzeug

Verbraucher: - Klimaanlage und Kühleinrichtungen
 - Licht und elektrische Antriebe

BMW-Initiative (zusätzlicher Partner: Renault)

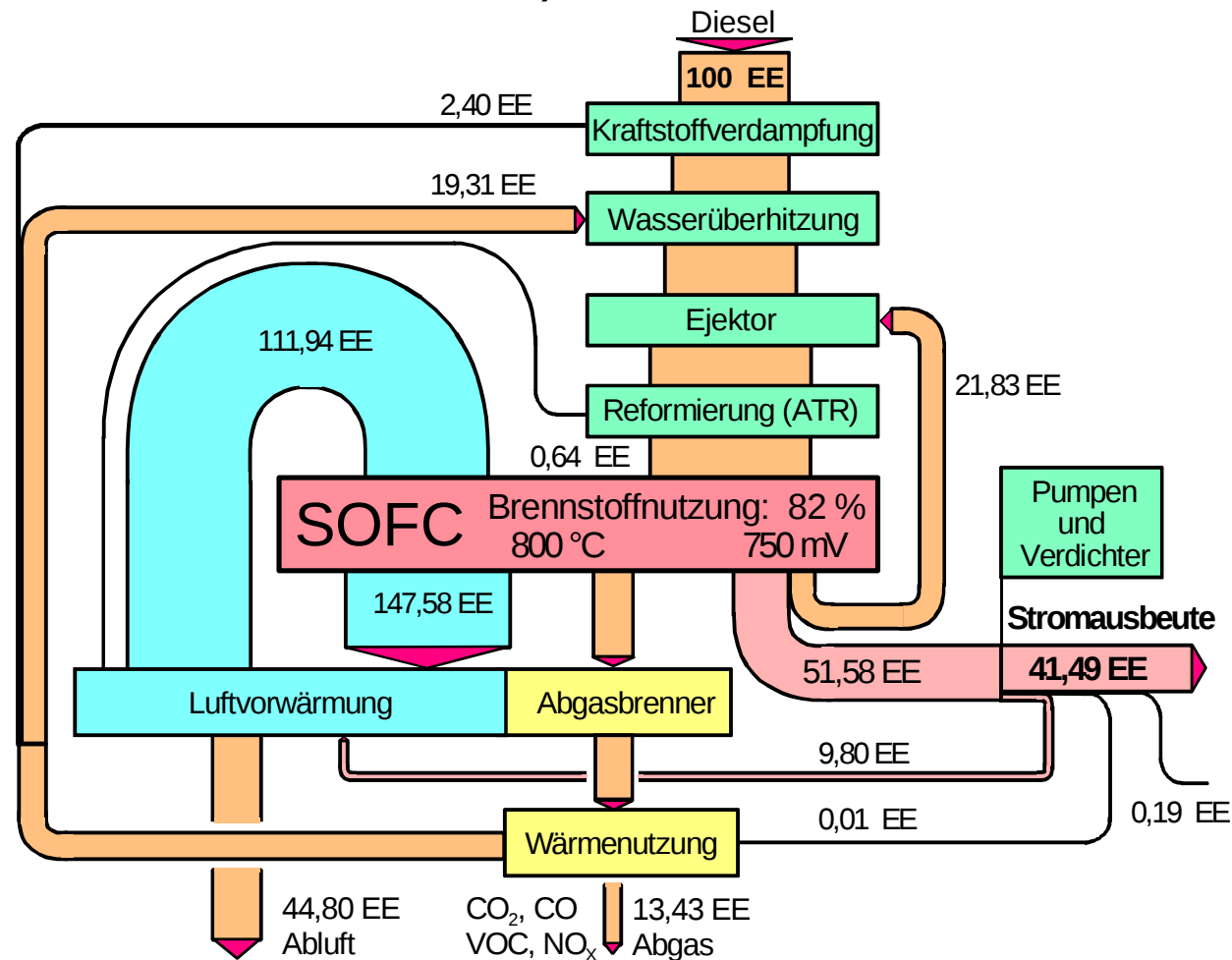
PEFC für Typ 750hL mit Wasserstoff-ICE: APU 5kW mit H₂-Betrieb
BMW-Partner: International Fuel Cells

SOFC für Fahrzeuge mit Benzin oder Diesel als Kraftstoff
BMW-Partner: Delphi (siehe auch Global und FZJ)



SOFC-System für eine APU (Auxiliary Power Unit)

Kraftstoff: Diesel; beheizter Reformer



EE = Energieeinheiten



Vergleich: Brennstoffzellen-APU vs. Verbrennungsmotor/ Generator

Wirkungsgradvorteil

BZ-APU

(= Verbrauchsvorteil)

● groß

● vorhanden

Verbraucher, Einsatzort

in nicht in Fahrt befindlichen
Fahrzeugen und als Stromversorger
(Notstromaggregat)

für fahrende Fahrzeuge mit hohem
Strombedarf für Nebenaggregate
(wobei Bedarf durch einen
Kurbelwellengenerator nicht mehr
gedeckt werden kann)





Busse und Bahnen (I)

BZ-Elektroantriebe für den Öffentlichen Personenverkehr

Situation: Konkurrenz zwischen BZ- und Dieselantrieb

Einsatz in: Bus, Straßenbahn, Stadtbahn

Betriebsart: emissionsfreier Betrieb bei Hybridantrieben mit Verbrennungsmotor

Oberleitungersatz (Streckenerweiterung)

Betriebskosten (erwartet):

BZ-Bus vs. Diesel-Bus vergleichbar

BZ-Bus vs. Straßenbahn deutlich geringer

BZ/H₂-Busse (Ziel):

< 1.000 DM/kW_e (Diesel heute: 300 DM/kW_{mech.})

> 30.000 h Betrieb, größere Kraftstoffauswahl

BZ-Bahnen: Adaption von BZ-Busantrieben; keine eigene Entwicklung





Busse und Bahnen (II)

Vorteile BZ- und Elektro-Antrieb vs. Diesel-Antrieb

BZ-Antrieb (H₂) Regelung einfacher optimierbar
keine / geringe lokale Emissionen (Abgas, Lärm)
niedrige Betriebstemperatur
höherer Wirkungsgrad
geringere Vibrationen

Bus-Antrieb mit *fortgeschrittenem elektrischen Antriebsstrang
(Batterie u. Hybrid**)**

Emissionsreduktion
Kraftstoffeinsparung
Synergien bezüglich zunehmender Elektrifizierung
in Fahrzeugen (Komfort, MechaTronik)

Erfahrungen*: 15a, 70 Busse, > 5 Mio. km

*) Proton Motor Fuel Cell GmbH

**) Hybrid: Dieselmotor+Kompakt-Generator / Schwungradspeicher / Supercap / Oberleitung / Batterie / Brennstoffzelle





Ausführungsbeispiele PEFC-Busantriebe

Konsortium	Kraftstoff Druck	BZ-Stack / kW _e Spannung / V	Reichweite / km v _{max} / km h ⁻¹	Projekt- umfang
MAN, Linde, Siemens, LBSt	H ₂ 250 bar	4 x 30 400	300 85	
DaimlerChrysler, NEBUS, Ballard	H ₂ 300 bar	8 x 30 720	k.A. 85	
EvoBus, NEFLEET Xcellsis (PEFC)	H ₂ k.A.	250 k.A.	200 - 300 80	30 Busse MB Citaro
Ballard: Vancouver, Chicago	H ₂ 250 bar	205 k.A.	~ 500 (BER) 85	11 Busse
Georgetown University, Xcellsis (PEFC)	MeOH	100 + Batterie k.A.	k.A. k.A.	
UK DTI	MeOH	50 + 125 Batterie k.A.	k.A. k.A.	
ProtonMotor	H ₂ k.A.	18 x 4,5 400	k.A. BER	
Neoplan, DLR, deNora	H ₂ 250bar	3 x 18 + Batterie 400	k.A. k.A.	

k.A. = keine Angaben; BER = Bremsenergieerückgewinnung



Kriterien und Anforderungen: Traktion für die Schiene

Anlagenleistung:	250 kW _e bis 6 MW _e (250 kW _e -Module)
Kraftstoff:	H ₂ , Methanol, andere flüssige Energieträger
Betriebsart:	Dauerbetrieb mit stark wechselnder Last
Lastfolgeverhalten:	hohe Leistungsänderungsgeschwindigkeit
Jahresnutzungsdauer:	1.000 bis 2.000 h
Stromart:	Gleichstrom
Spannung:	Gleichspannung (450 V bis 2 kV, Zwischenspannungsebenen)





Fahrzeuganalysen: Zusammenfassung

- **Niedrige limitierte Betriebsemissionen der An-Bord-Reformierung von Methanol PEFC-Fahrzeugen; Emissionsfreiheit der Wasserstoffvariante**
- **Elektrischer Energiespeicher in Verbindung mit Bremsenergieerückgewinnung mit Potenzial zur Verbrauchseinsparung (Einsparung bis 24 % im Stadtzyklus ECE)**
- **Große Bandbreite simulierter Kraftstoffverbräuchen von PEFC-Elektrofahrzeugen verschiedener Fahrzeugklassen (MeOH-FCV: 45 % Bandbreite; CH₂-FCV: 39 % Bandbreite im NEFZ); Bedingt durch das hohe Antriebstranggewicht Einführung der Fahrzeuge nur in kleinen Fahrzeugklassen interessant**
- **Wirkungsgradvorteile beim Einsatz von Brennstoffzellen zur elektrischen Energieversorgung von Fahrzeugen (APU) im Fahrzeugstillstand und bei hohem elektrischem Leistungsbedarf (z.B. Oberklasse- Fahrzeuge)**
- **Einsatz von Brennstoffzellen in Elektrobussen (Vorbereitung von Demoserien im Inselbetrieb)**



Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

- 1) Einleitung und allgemeiner Stand der Technik
- 2) Fahrzeuganalysen



3) Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale

- 4) Kostenanalysen
- 5) Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen
- 6) Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

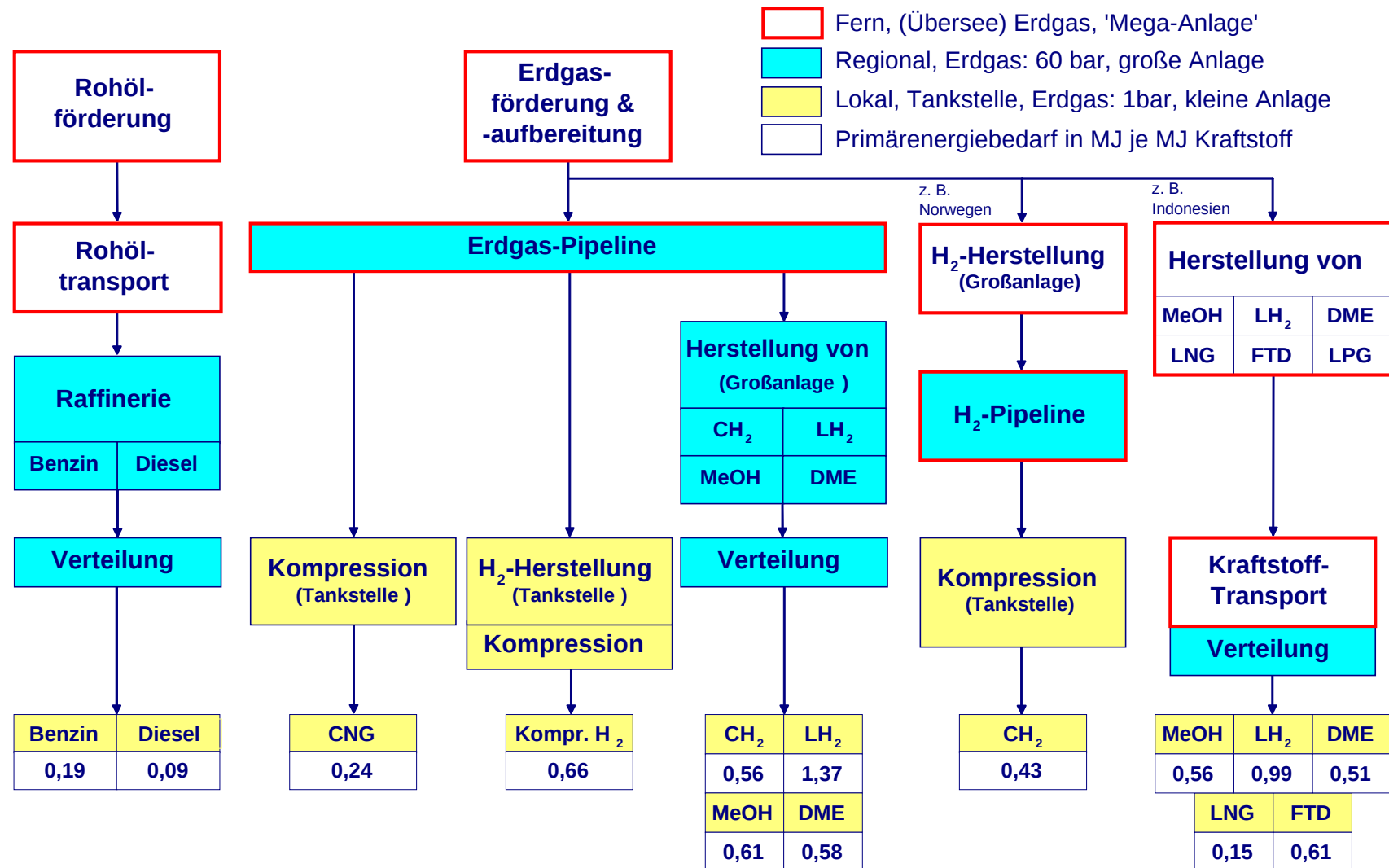


Endenergieträger-Auswahl

- Endenergieträger werden dann eine besondere Aussicht auf zukünftige Nutzung haben, wenn sie gleichzeitig für konventionelle (Verbrennungsmotor) wie für neue (Brennstoffzellen) Antriebssysteme langfristig und kumulativ auch bei Einsatz regenerativer Primärenergieträger genutzt werden.
- Verfügbarkeit der Endenergieträger sowie deren Kosten, die von Primärenergie-, Transport- und Verteilungskosten sowie den Umwandlungskosten abhängen, sind in Verbindung mit der Steuergesetzgebung entscheidend für die Auswahl des Kraftstoffs. Diese beeinflussen gemeinsam mit den Herstellungskosten der Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge die Nutzung beim Kunden.

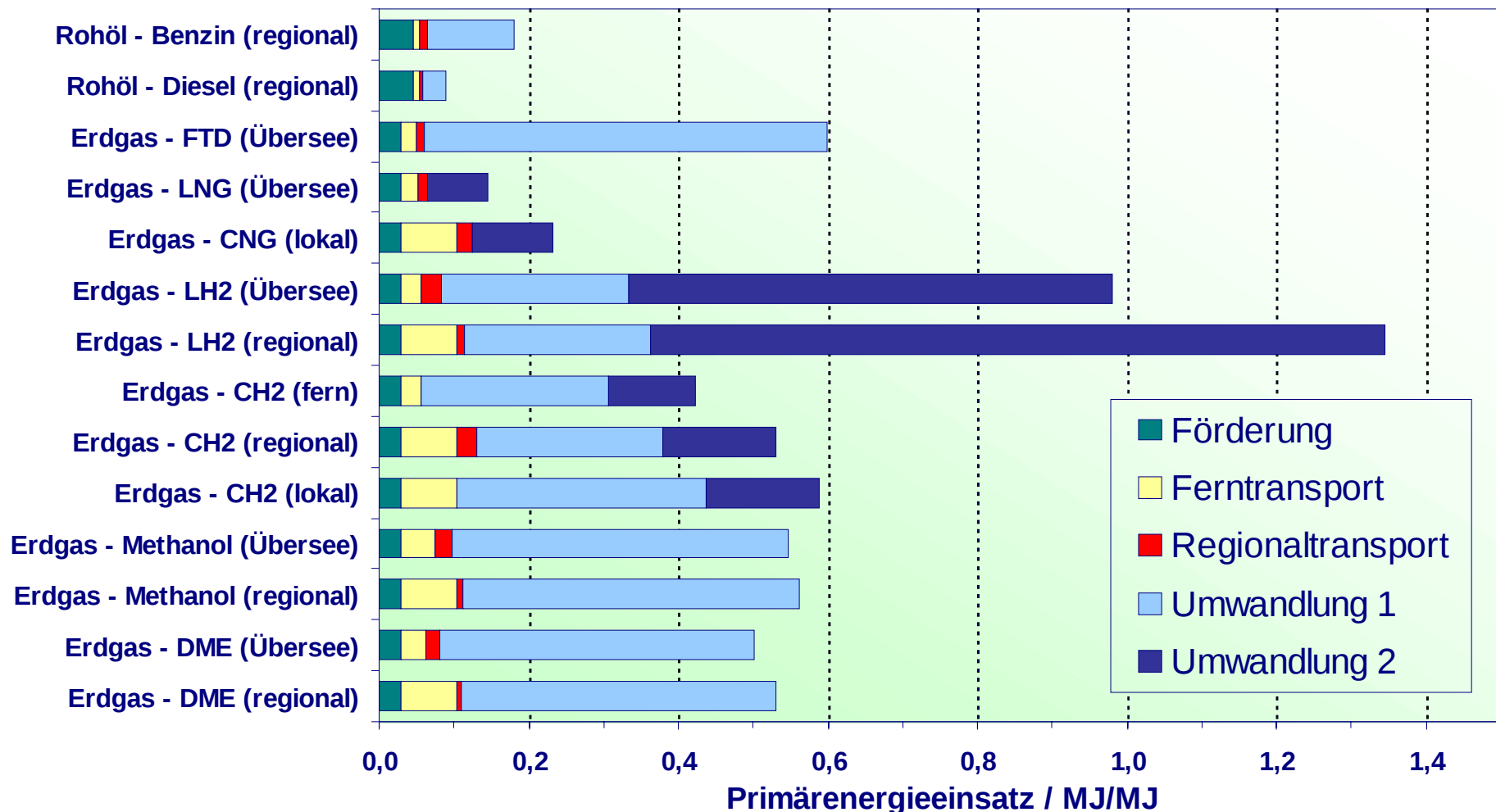


Bereitstellungswege Kohlenwasserstoff-basierter Kraftstoffe





Zusätzlicher Primärenergieeinsatz für die Kohlenwasserstoffbasierte Bereitstellung von 1 MJ Kraftstoffenergieinhalt (I)



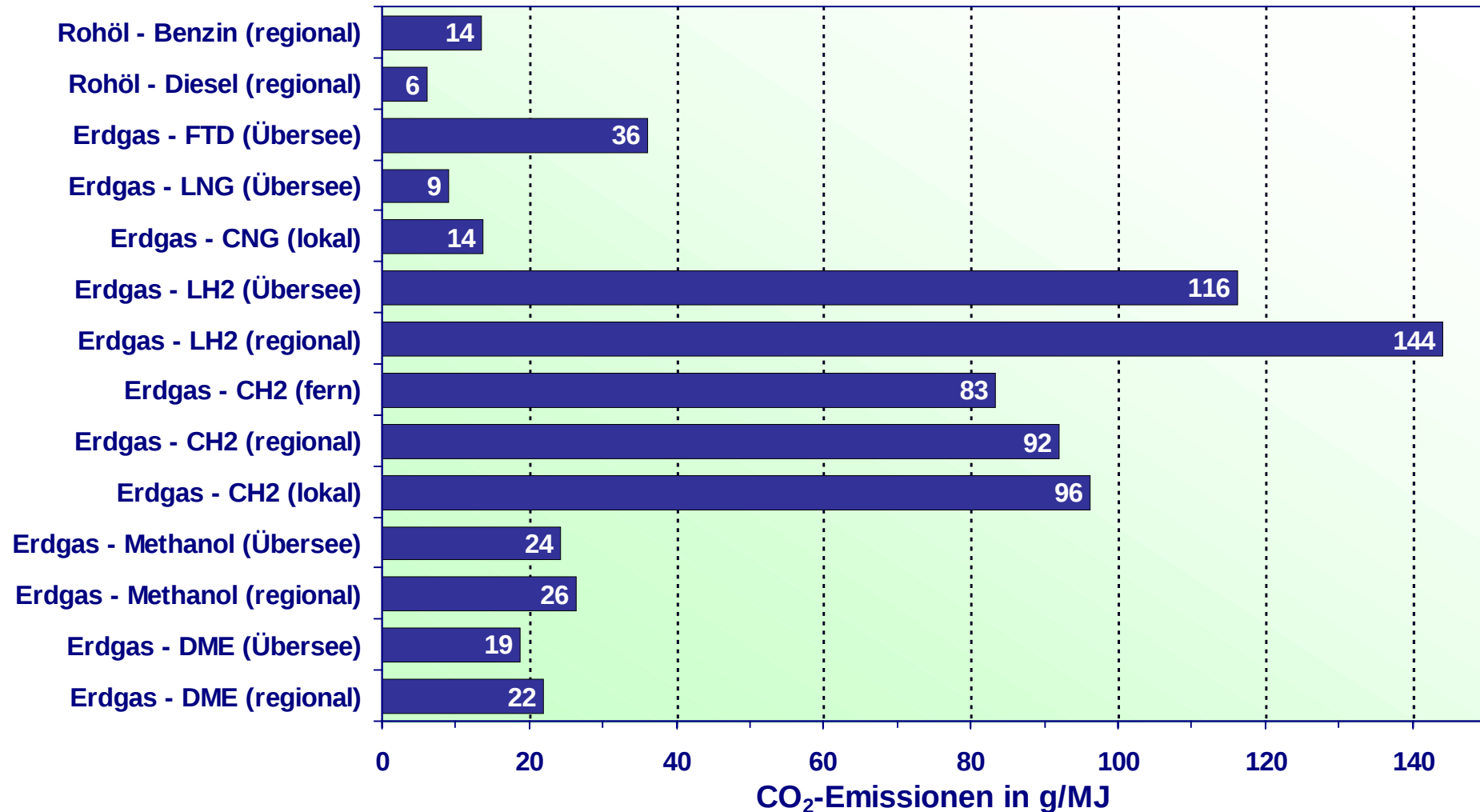


Zusätzlicher Primärenergieeinsatz für die Kohlenwasserstoff-basierte Bereitstellung von 1 MJ Kraftstoffenergieinhalt (II)

- **Niedrigster Primärenergieeinsatz für die Bereitstellungspfade Benzin und Diesel ($0,1 - 0,2 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$)**
- **Primärenergiebedarf der CNG- bzw. LNG-Bereitstellungskette auf niedrigem Niveau**
- **Primärenergieeinsatz zur Bereitstellung von Methanol, DME und FT-Diesel im gleichen Bereich ($0,5 - 0,6 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$)**
- **Bereitstellung von flüssigem Wasserstoff (LH_2) mit hohem Bedarf an Primärenergie ($1,0 - 1,4 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$)**
- **Bedarf an fossiler Primärenergieträger für die Bereitstellung von Biodiesel heute etwa $0,35\text{-}0,4 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$ [NITSCH 2000]**

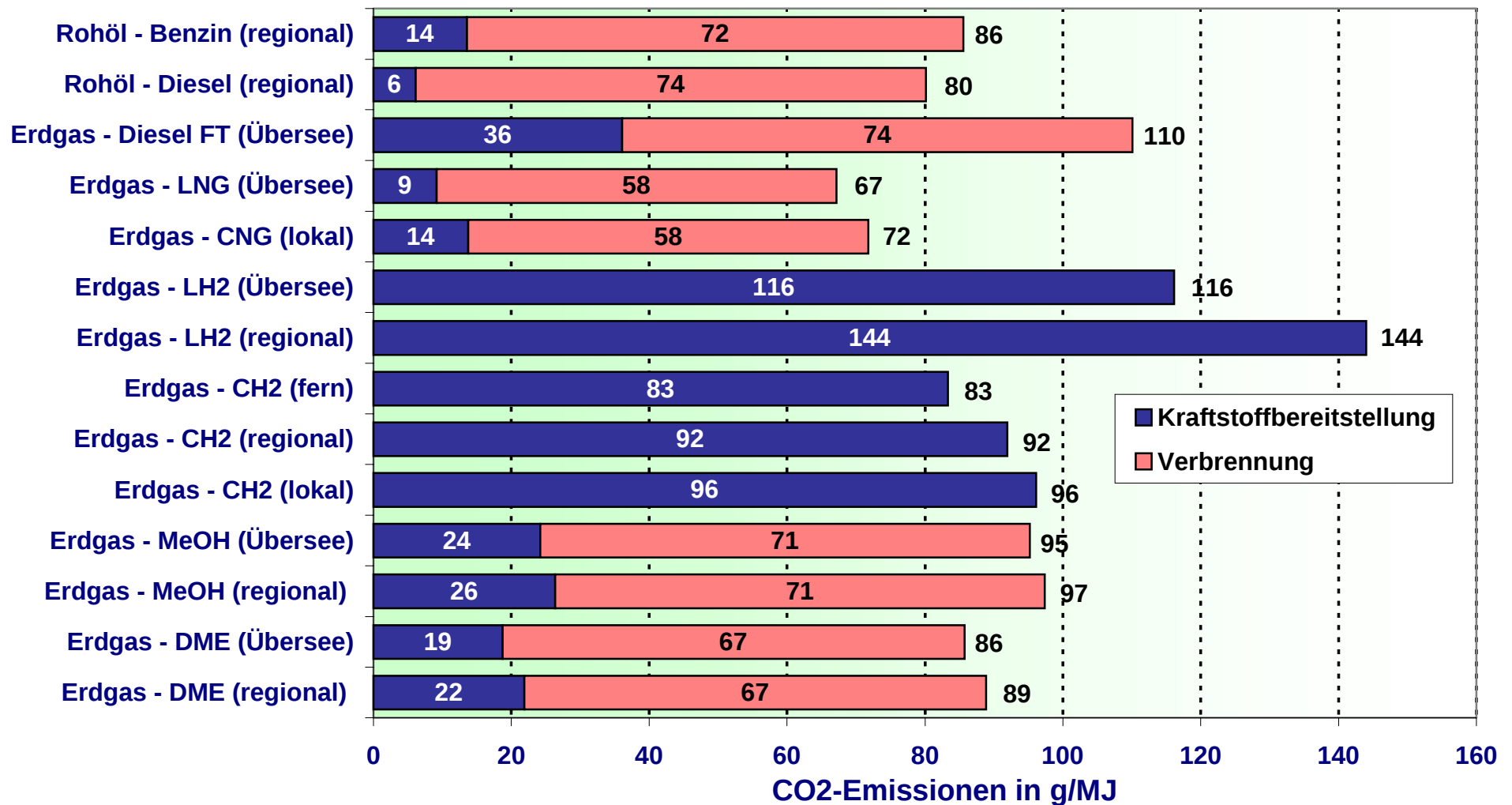
Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale

CO₂-Emissionen der Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung (I)





CO₂-Emissionen der Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung und Verbrennung





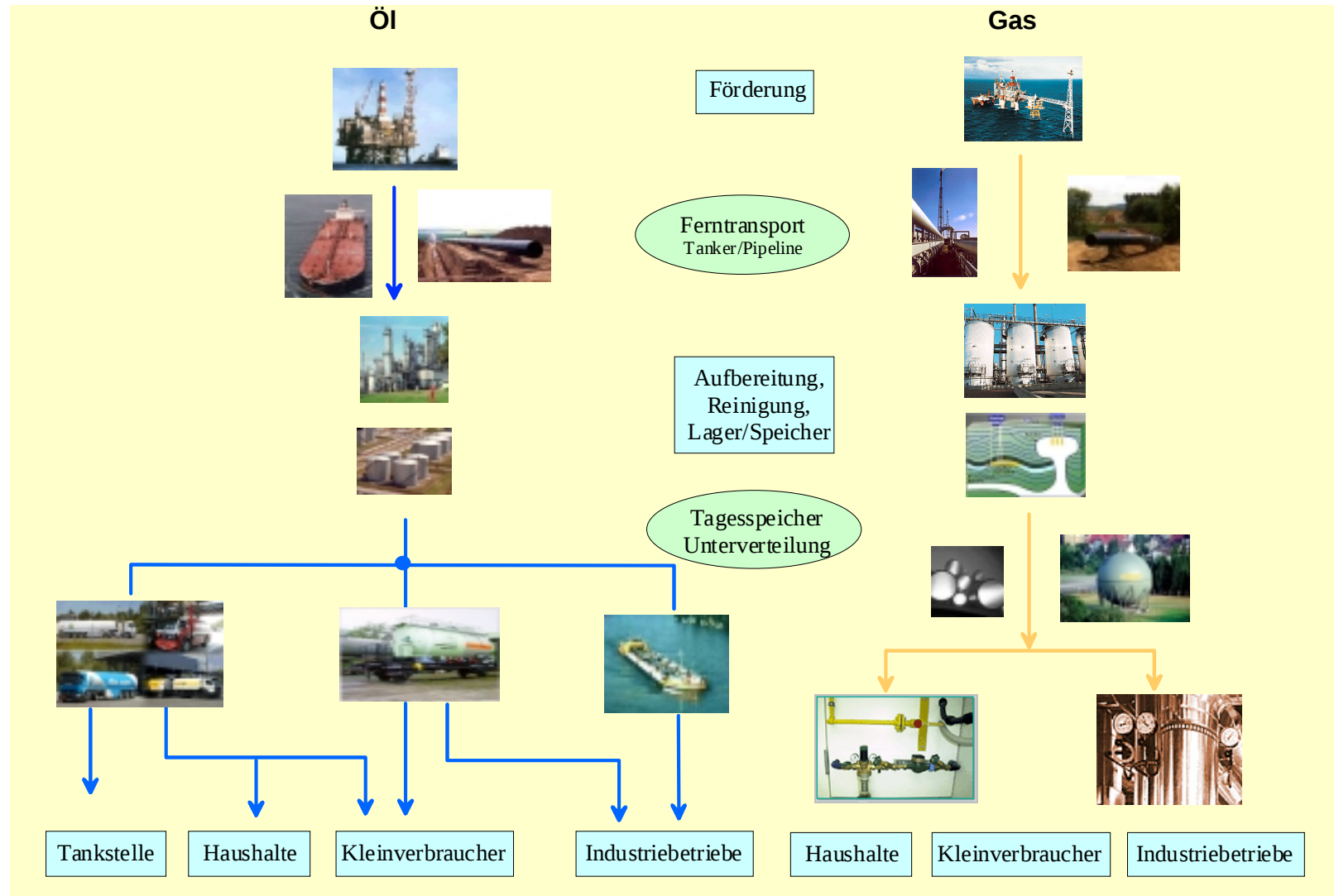
CO₂-Emissionen Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung (II)

- Vollständige Bilanzierung der Emissionen konkurrierender Kraftstoffpfade nur über die gesamte Energieumwandlungskette (inklusive Nutzungsphase) möglich
- CO₂-Emissionen niedrig für Bereitstellung von Methanol und FT-Diesel (24 – 36 g_{CO2} / MJ_{Kraftst.})
- Hohe CO₂-Emissionen für die Kohlewasserstoff-basierte H₂-Bereitstellung (83 – 144 g_{CO2} / MJ_{Kraftst.}); Fahrzeugbetrieb frei von CO₂
- Bereitstellung von Biodiesel und Ethanol heute etwa 50 g_{CO2}/MJ_{Kraftst.} (Nutzung im Fahrzeug CO₂-neutral) [NITSCH 2000]





Infrastruktur Kraftstoffe





Infrastruktur Mineralöltransport

Lagerung, Verteilung und Transport



Raffinerie- und Tanklagerstandorte innerhalb der bestehenden Verkehrsnetze (ohne Straßennetz)

-  Raffinerie mit atmosphärischer Destillation (1 Kästchen entspricht 1 Mio. Tonnen Jahresdurchsatz-Kapazität)
-  Tanklager
-  Rohölleitungen
-  Produktenleitungen
-  Schienennetz
-  Wasserstraßen

Quelle: Mineralwirtschaftsverband, „Mineralöl-Logistik“, April 1999





Infrastruktur Erdgastransport



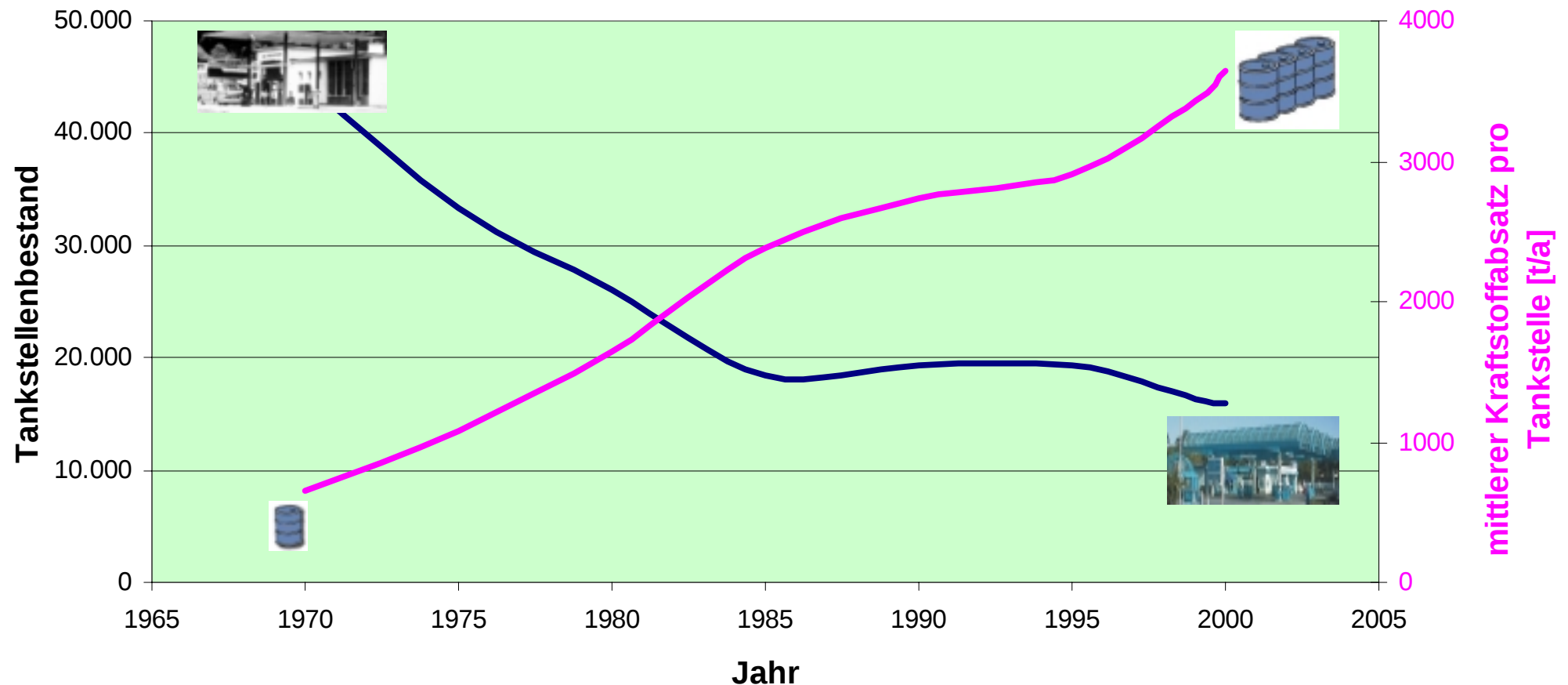
Struktur der Gasversorgung

-  Erdgasspeicher
-  Erdgasleitung in Betrieb
-  Erdgasleitung in Bau oder Planung

Quelle: Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. www.bgw.de



Tankstellenbestand und Kraftstoffabsatz in Deutschland





Investitionskosten von Komponenten der Infrastruktur

Infrastruktur	Mineralöl	Erdgas	Benzin/ Diesel	FT-Kraftstoff (Diesel)	Alkohol (MeOH)	Erdgas (CNG) (~ 200 bar)	Wasserstoff (CH ₂) (~ 250 bar)	Wasserstoff (LH ₂) (-252 °C)
Überseetanker	73,5 Mio US\$ (250.000 tdw)	172 Mio US\$ (135.000 m ³ LNG)		73,5 Mio US\$ (250.000 tdw)				92 Mio DM (15.000 m ³ LH ₂)
Ferntrans- portpipeline	~1 - 2 Mio DM/km	~1 - 2 Mio DM/km	k.A.	k.A.	k.A.		vergleichbar mit Erdgas bei Pipelinedruck	
Ortsnetz		150 - 600 DM/m					vergleichbar mit Erdgas bei Pipelinedruck	
LKW-Auflieger 27 Tonnen			~ 260.000 DM inclusive Sensorik	~ 260.000 DM inclusive Sensorik	~ 260.000 DM inclusive Sensorik	entfällt bei Kompression an Tankstelle	~ 450.000 DM (~ 4000 m ³)	~ 500.000 DM (~ 40 m ³)
Eisenbahn- kesselwagen			k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	wegen langer Fahrzeiten i.d. Regel unrentabel	
Zapfsäule			14.000 DM Benzin 12.000 DM Diesel	12.000 DM	13.000 DM	40.000 - 50.000 DM	~ 85.000 DM	~ 85.000 DM
Tankstelle			500.000 - 750.000 DM (Großtankstelle)	vergleichbar zu Benzin/Diesel	vergleichbar zu Benzin/Diesel	250.000 DM (mobile Kompakt anlage mit 2m ³ Speicher) 1.000.000 DM (mit Gasanschluß, Verdichter, 20m ³ Speicher, Zapfs.)	~ 1,2 Mio DM (Speicher ~ 5.000 Nm ³)	~ 550.000 DM (Speicher ~ 36 m ³)

k.A. = keine Angaben

¹⁾ US-Dollar, Stand Juli 2000 ²⁾ Kostenkalkulation nach „Euro-Quebec-Studie“



Kostensituation für neue Kraftstoffe (ohne Steuer)

Energieträger **heute** (D)

Energiepreis in US\$/GJ

(1 US\$/GJ $\cong$ 0,7 Pfg/kWh bei Kurs 2 DM/US\$)

Erdgas Grenzübergang (1-10/2000)

2,7 (10/2000: 3,4) [BAW]

Rohöl Grenzübergang (1-11/2000)

5,2 (11/2000: 6,5) [BAW]

Super-Benzin FOB (1/2001)

6 (6 für USA Tankstelle; 5 für Diesel)

RME

26 (inkl. Stilllegungsprämie) [DREIER 2000]

Import Steinkohle

1,1 - 1,4

Methanol Herstellung 2000

5 - 7 (Erdgas: **1,5-2,5** bei 2000t/d)

Methanol FOB 1/2001

12 (2000: 7; 1999: 5)

Auswahl: Energieträger **bis 2010**

Energiepreis in US\$/GJ

(1 US\$/GJ $\cong$ 0,7 Pfg/kWh bei Kurs 2 DM/US\$)

Methanol LURGI: Herstellung, 10kt/d

4 (Remote Erdgas: **4**) [LURGI 2000]

Methanol

10 (Basis Biomasse: **0,6**) [CFR 2000]

Komprimierter H₂ (an Tankstelle)

17 (**4** für Erdgas)

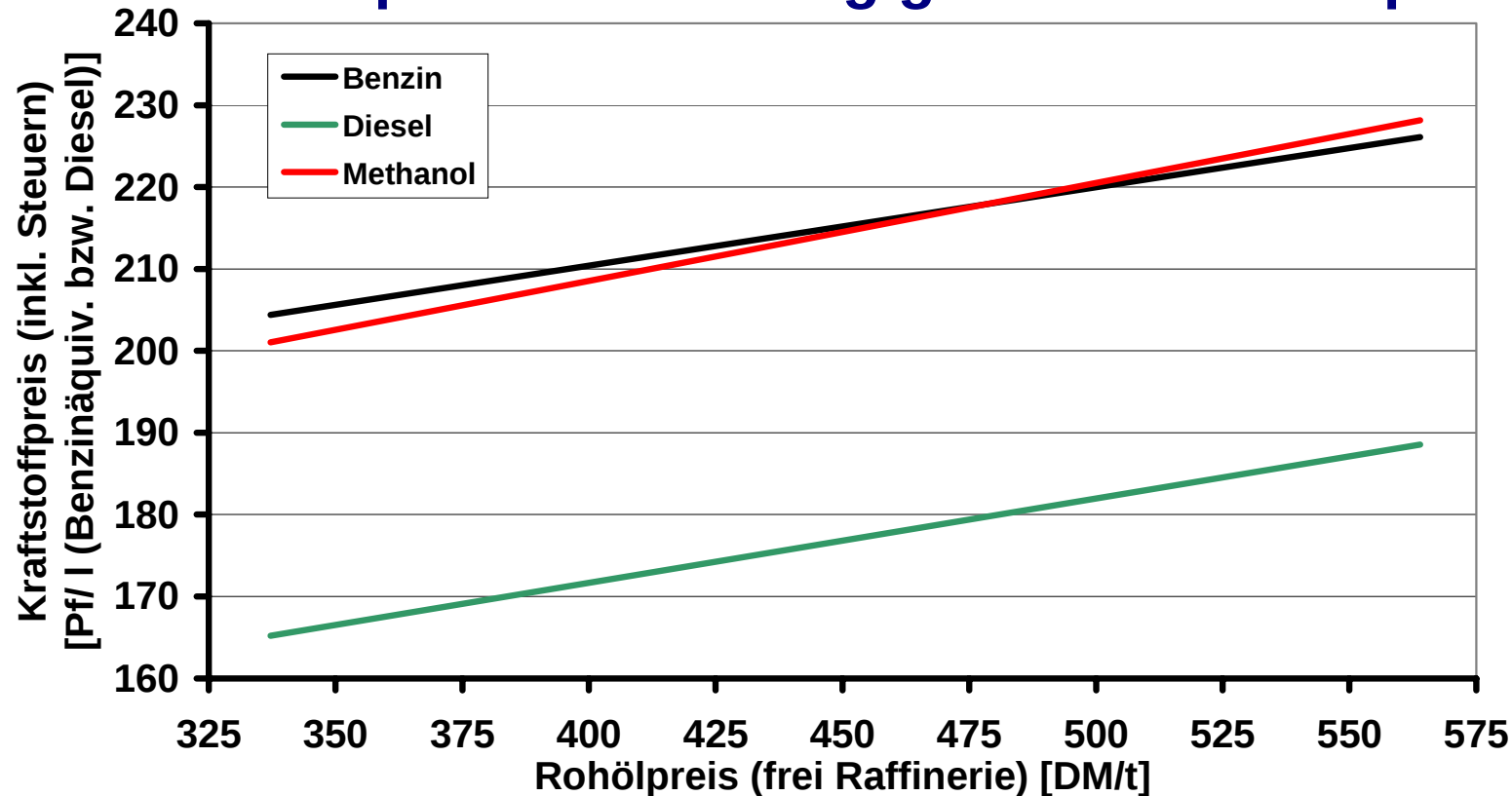
H₂ via Elektrolyse an Tankstelle

25 (bei 9 Pfg/kWh_{el} = \$12,5/GJ) [PU]





Kraftstoffpreise in Abhängigkeit vom Rohölpreis



Annahmen:

	Benzin	Diesel	Methanol
Mineralöl- \Ökosteuer\	98 Pf/l \ 30 Pf/l \	62 Pf/l \ 30 Pf/l \	73 Pf/l ¹⁾ \ 30 Pf/l ¹⁾ \
Mehrwertsteuer	16 %	16 %	16 %
Sonstiges (Bevorratungsabgabe, Margen)	11,9 Pf/l	11,9 Pf/l	15,9 Pf/l ¹⁾

¹⁾ energetisches Benzinäquiv.





Verfügbarkeit Biokraftstoffe (I)

landwirtschaftliche Stilllegungsflächen (Prämien!) in der EU

Überproduktion an Nahrungsmitteln in der EU
Druck auf die Erzeugerpreise

Substitutionspotenzial für Kraftstoffe des Straßenverkehrs bei Nutzung von 30 % der gesamten Ackerfläche in Deutschland (Fruchtfolge eingehalten):

- 3 % für Ethanol aus Zuckerrüben oder
- 6 % für Methanol aus Holz oder
- 2 % für RME aus Raps (Dieselersatz)

Bewertungskriterien für Biokraftstoffe

spezifischer Flächenbedarf und Energiebedarf beim Anbau von Biomasse

Quelle: KOSSMEHL 1995 - Dissertation TU Berlin





Verfügbarkeit Biokraftstoffe (II)

Nach DREIER (IfE Schriftenreihe Heft 42, TU München, 2000) lässt sich als technisches Potenzial das Zweifache des heutigen Weltprimärenergiebedarfs durch Biomasse decken:

Primärenergiebedarf: 355 EJ/a (Europa: 108 EJ/a)
davon 19 EJ/a traditionelle Brennstoffe
auf Basis Biomasse = etwa 5 %

Primäre Biomasse ¹: 623 EJ/a Energiepflanzen
83 EJ/a nachhaltige Forstwirtschaft

Sekundäre Biomasse ²: 21 EJ/a Restholz
16 EJ/a Ernterückstände
8 EJ/a Biogas

Bei der Realisierung des technischen Potentials müßten 2,2 Mrd. Hektar in landwirtschaftliche Fläche für den Energiepflanzenanbau umgewandelt werden; die globale Ackerfläche beträgt heute 1,4 Mrd. Hektar.

¹ Europa: 50 EJ/a, ² Europa: 7 EJ/a





Sicherheitstechnische Daten der Kraftstoffe

	Benzin	Diesel	Methanol	Methan	Wasserstoff
Dichteverhältnis zu Luft	3,2 - 4	7	1,1	0,55	0,07
Zündtemperatur (°C)	220	220	455	595	560
Zündgrenzen (Vol% in Luft)	0,6 - 8	0,6 - 6,5	16 - 44	5 - 15	4 - 76
Min. Zündenergie (mJ)	0,24	0,3	0,14	0,28	0,02
Diffusionskoeff. (cm ² /s)	0,05		0,12	0,16	0,61
Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit (m/s)	0,4	-	0,48	0,43	2,7
Flammpunkt (°C)	-20	55	11	-	-

	Benzin	Methanol	Wasserstoff
Gesundheitsgefahren	Kann Krebs erzeugen; Verschlucken kann Lungenschäden verursachen	Reizwirkung auf Augen, Haut und Atemwege; Verschlucken kann Blindheit, Tod hervorrufen	Inhalation kann Atembeschwerden und Bewußtlosigkeit hervorrufen
Umweltgefahren	Stark wassergefährdend (WGK 3)	Schwach wassergefährdend (WGK 1); biologisch abbaubar	-
Toxizität: Gewässer- verunreinigung ab mg/l	40	17000	-
MAK (ppm)	C ₆ H ₁₄ : 50	200	nicht festgelegt



Kraftstoffe: Bereitstellung , Kosten und Gefährdungspotenziale Zusammenfassung

- Die Bereitstellung neuer Kraftstoffe erfordert mit Ausnahme von CNG einen deutlich höheren Energieaufwand und ist mit deutlich höheren CO₂- Emissionen verbunden (Faktor 3-10).
- Die Kraftstoffketten differieren bezüglich Primärenergieaufwand und CO₂-Emissionen erheblich.
- Der zusätzlich Aufwand in der Infrastruktur und somit der Kosten differiert erheblich; von geringfügig höher bei Methanol bis zu einer Größenordnung bei Wasserstoff.
- Die Gefährdungspotenziale für neue Kraftstoffe sind anders aber nicht unbedingt höher einzuschätzen, erschweren aber deren Zulassung.



Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

- 1) Einleitung und allgemeiner Stand der Technik
- 2) Fahrzeuganalysen
- 3) Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale



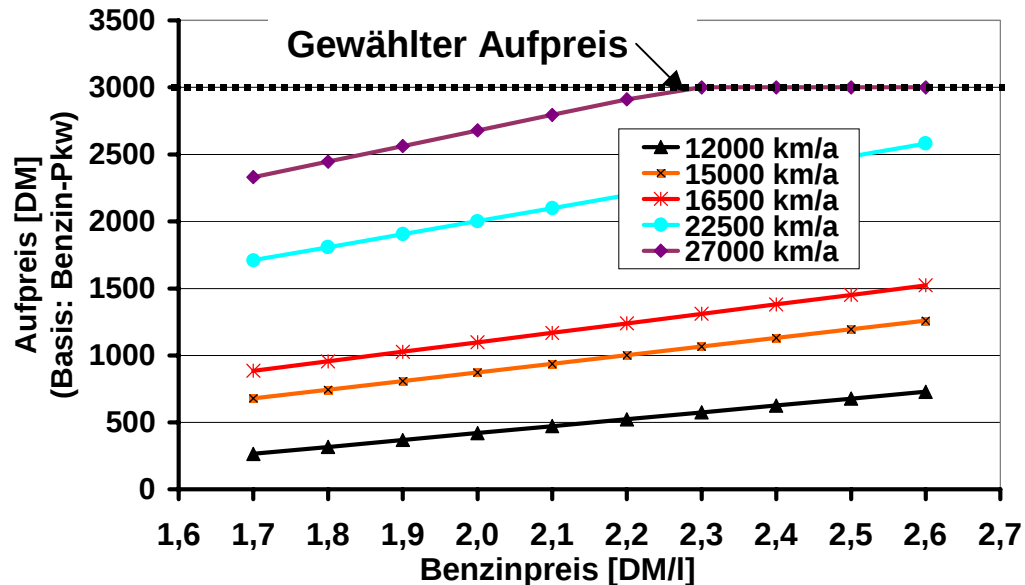
4) *Kostenanalysen*

- 5) Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen
- 6) Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

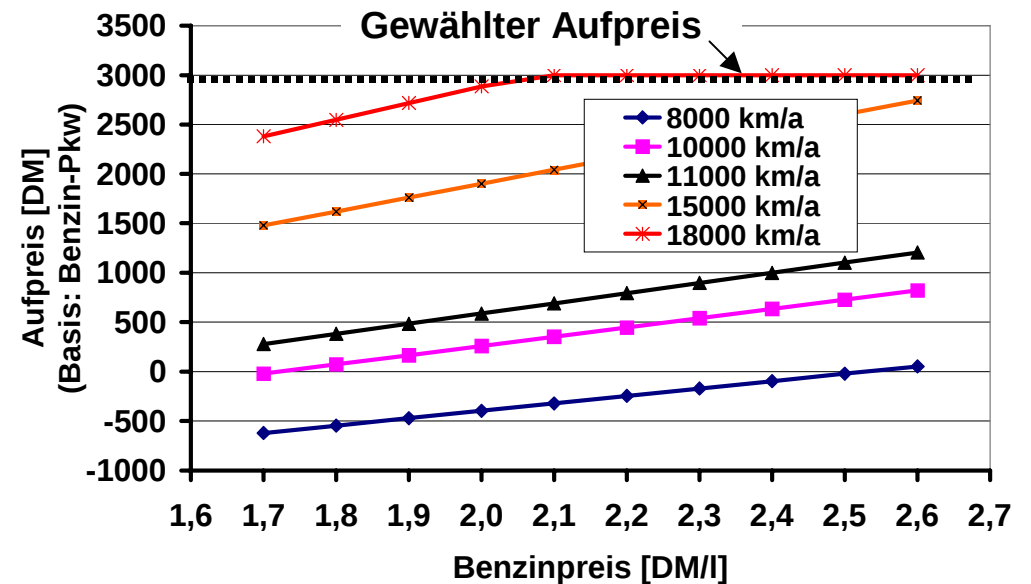


Anlegbarer Aufpreis für einen Diesel-Pkw mittlere Fahrzeugklasse

Private Nutzung



Kommerzielle Nutzung

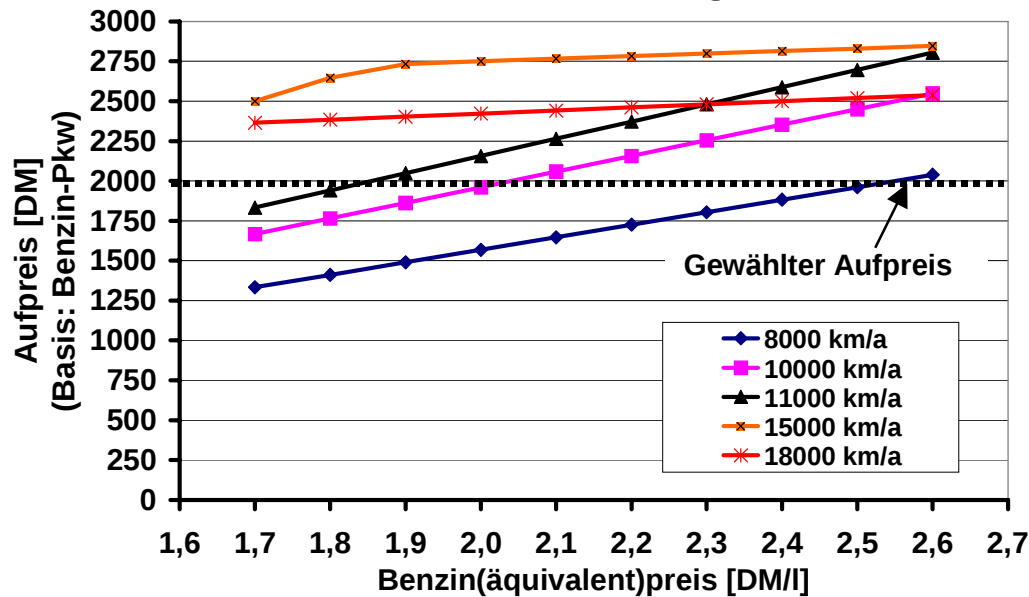


	Benzin	Diesel
Fahrzeugkaufpreis	39.000 DM	
Lebensdauer / Zins	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %
Verbrauch	7,5 l/100 km	6,0 l/100 km
Kraftstoffkosten	/	- 40 Pf/l zu Benzin
KFZ-Steuer	160	540

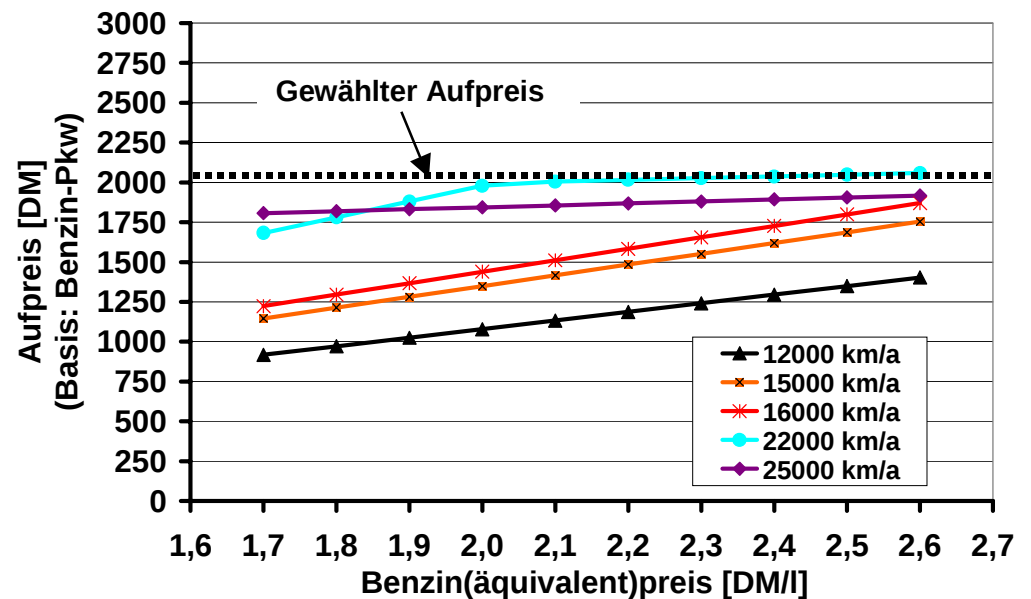


Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw kleine Fahrzeugklasse

Private Nutzung



Kommerzielle Nutzung



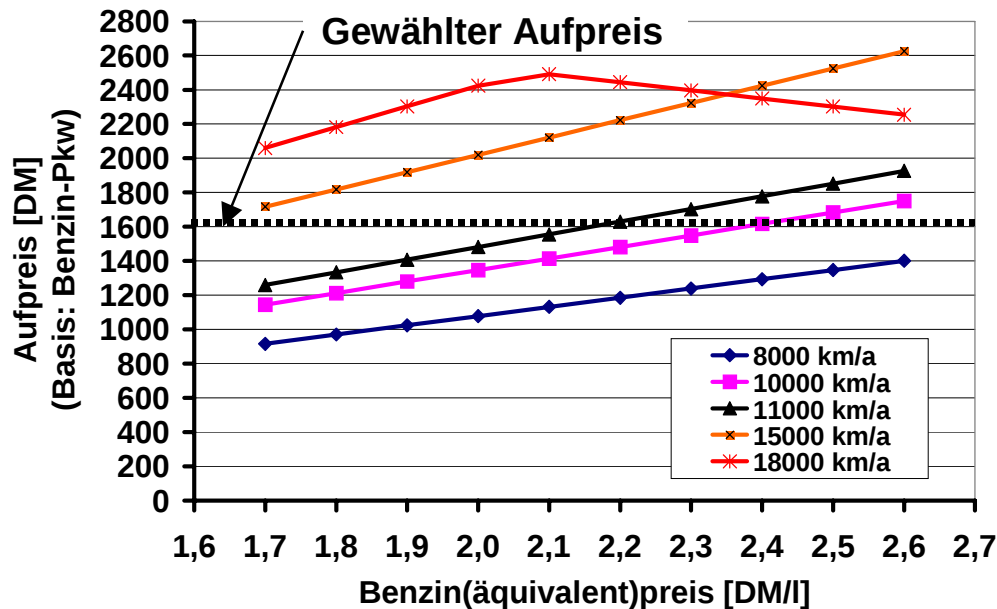
	Benzin	Diesel	Methanol
Fahrzeugkaufpreis	22.000 DM	24.000 DM	/
Lebensdauer / Zins	Privat:10 a / 5,5 % Kom. :4 a / 6,5 %	Privat:10 a / 5,5 % Kom. :4 a / 6,5 %	Privat:10 a / 5,5 % Kom. :4 a / 6,5 %
Verbrauch	5,2 l/100 km	4,1 l/100 km	4,0 l/100 km ¹⁾
Kraftstoffkosten	/	- 40 Pf/l zu Benzin	+/- 0 Pf/l zu Benzin ¹⁾
Fzg.-Steuer	120	420	120

¹⁾ energetisches Benzinäquiv.

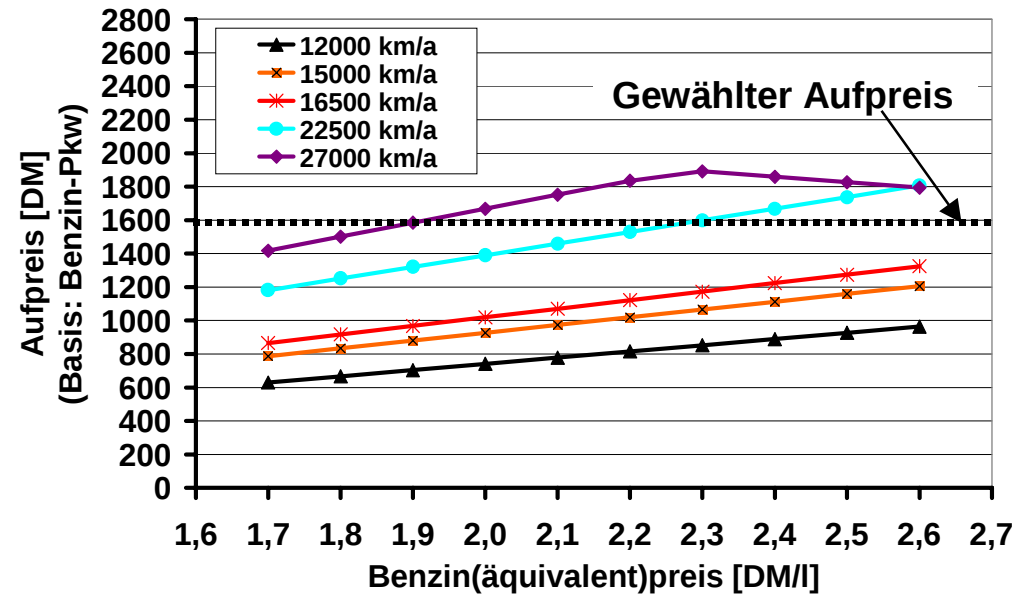


Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw mittlere Fahrzeugklasse

Private Nutzung



Kommerzielle Nutzung

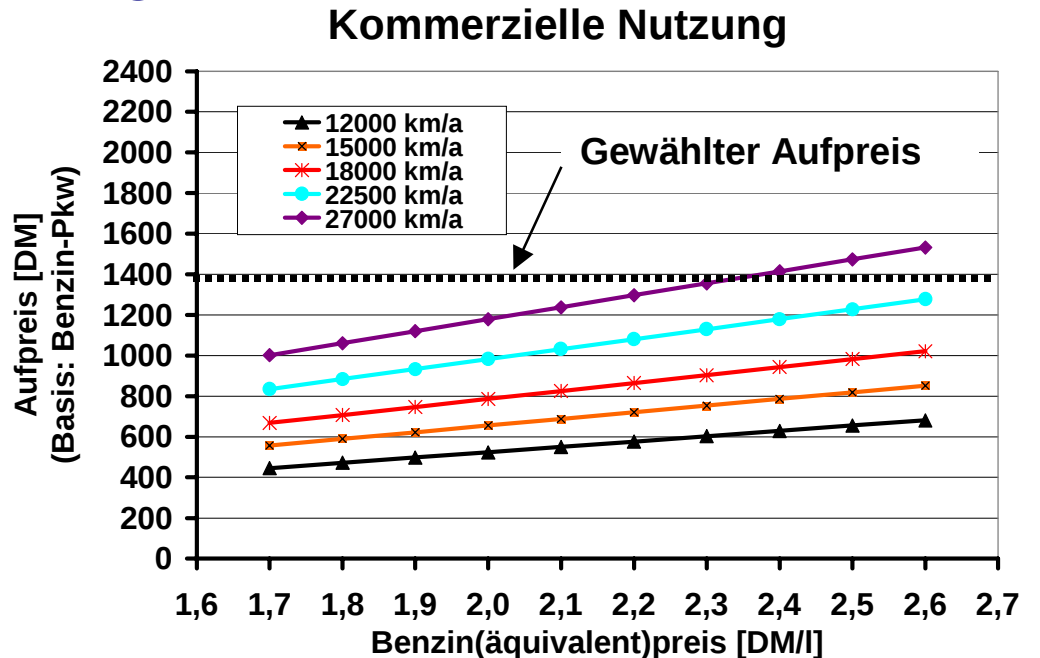
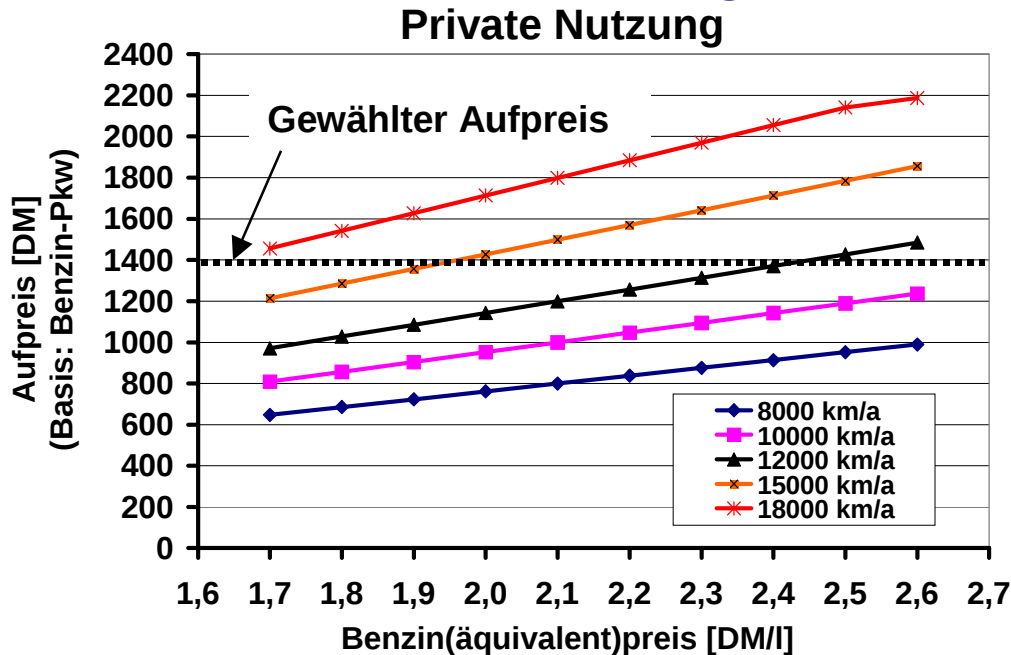


	Benzin	Diesel	Methanol
Fahrzeugkaufpreis	39.000 DM	42.000 DM	
Lebensdauer / Zins	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %
Verbrauch	5,6 l/100 km	4,4 l/100 km	4,8 l/100 km ¹⁾
Kraftstoffkosten	/	- 40 Pf/l zu Benzin	+/- 0 Pf/l zu Benzin ¹⁾
Fzg.-Steuer	160	540	160

¹⁾ energetisches
Benzinäquiv.



Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw große Fahrzeugklasse

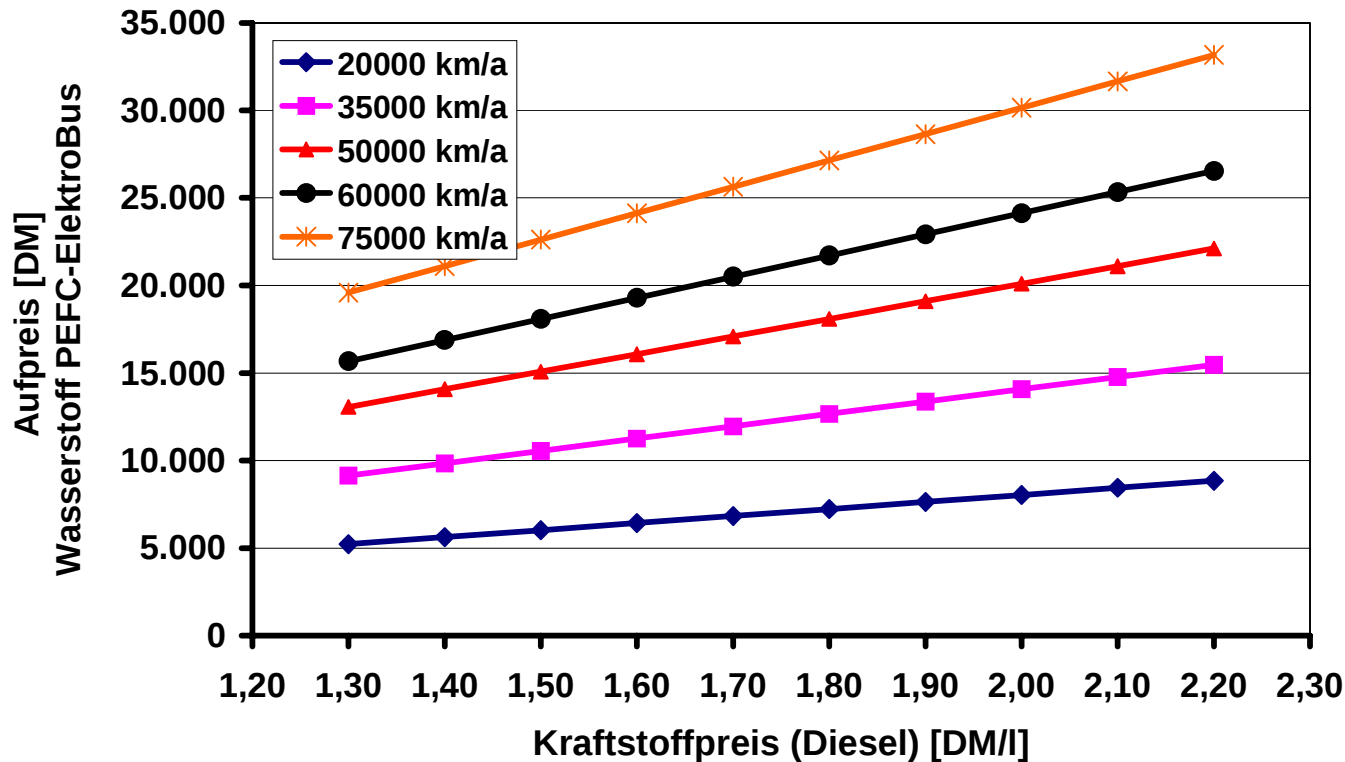


	Benzin	Diesel	Methanol
Fahrzeugkaufpreis	65.000 DM	69.500 DM	
Lebensdauer / Zins	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %
Verbrauch	7,5 l/100 km	6,0 l/100 km	6,9 l/100 km ¹⁾
Kraftstoffkosten	/	- 40 Pf/l zu Benzin	+/- 0 Pf/l zu Benzin ¹⁾
Fzg.-Steuer	250	810	250

¹⁾ energetisches
Benzinäquiv.



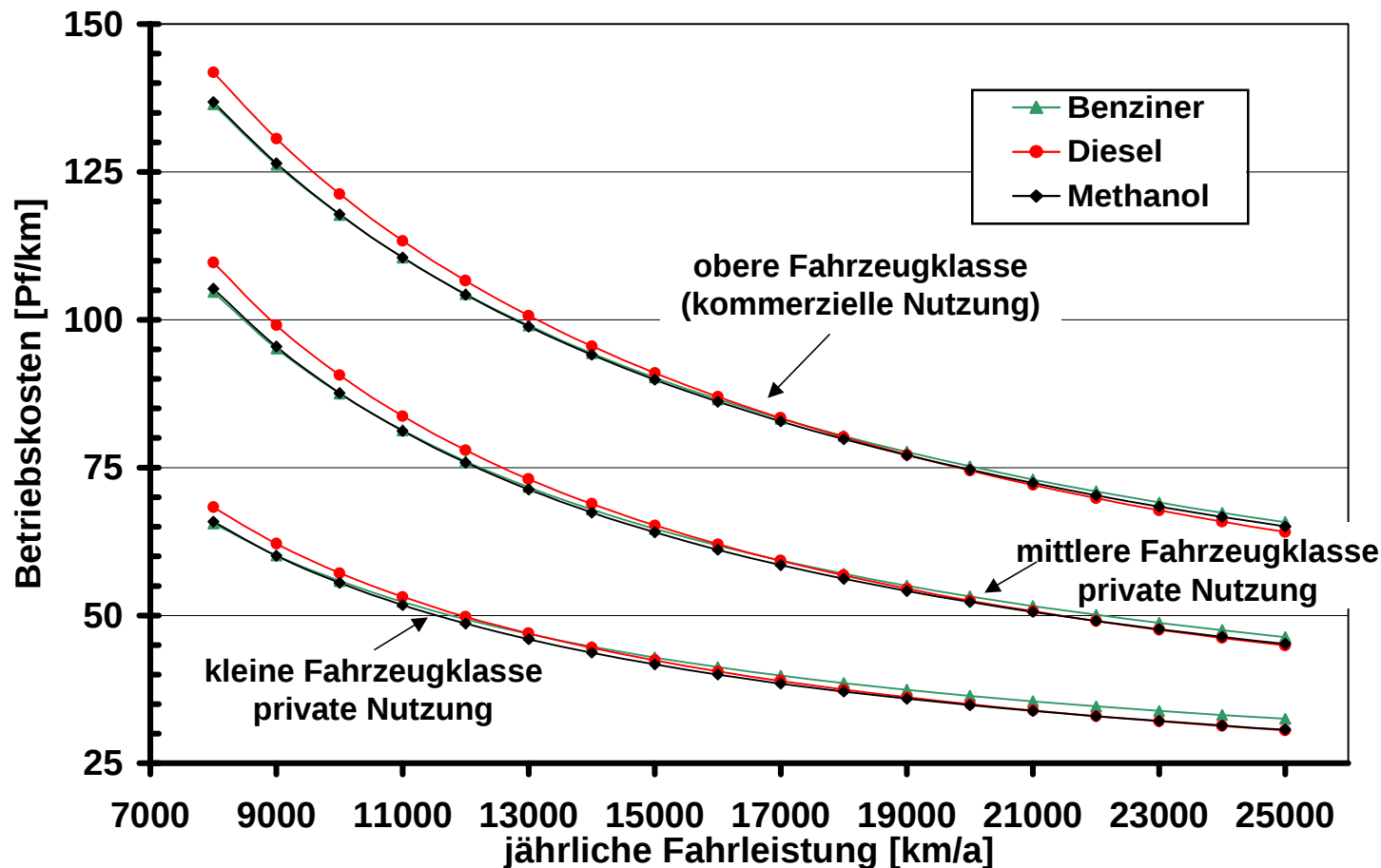
Anlegbarer Aufpreis für einen CH₂ PEFC-Elektro-Bus



	Diesel	Wasserstoff
Fahrzeugkaufpreis	350.000 DM	
Lebensdauer / Zins	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %
Verbrauch	31 l/100 km	27,9 l/100 km ¹⁾
Kraftstoffkosten	Energetische Preisgleichheit Diesel - CH ₂	



Betriebskostenvergleich



Kraftstoffpreise [DM/l]

Benzin	2,30
Diesel	1,90
Methanol	2,30 (Benzinäquiv.)

Fahrzeugpreise [DM]

	klein	mittel	groß
Benzin	22.000	39.000	65.000
Diesel	24.000	42.000	69.500
Methanol	24.000	40.600	66.400

Kapitalunabhängige Fixkosten

[DM/a]

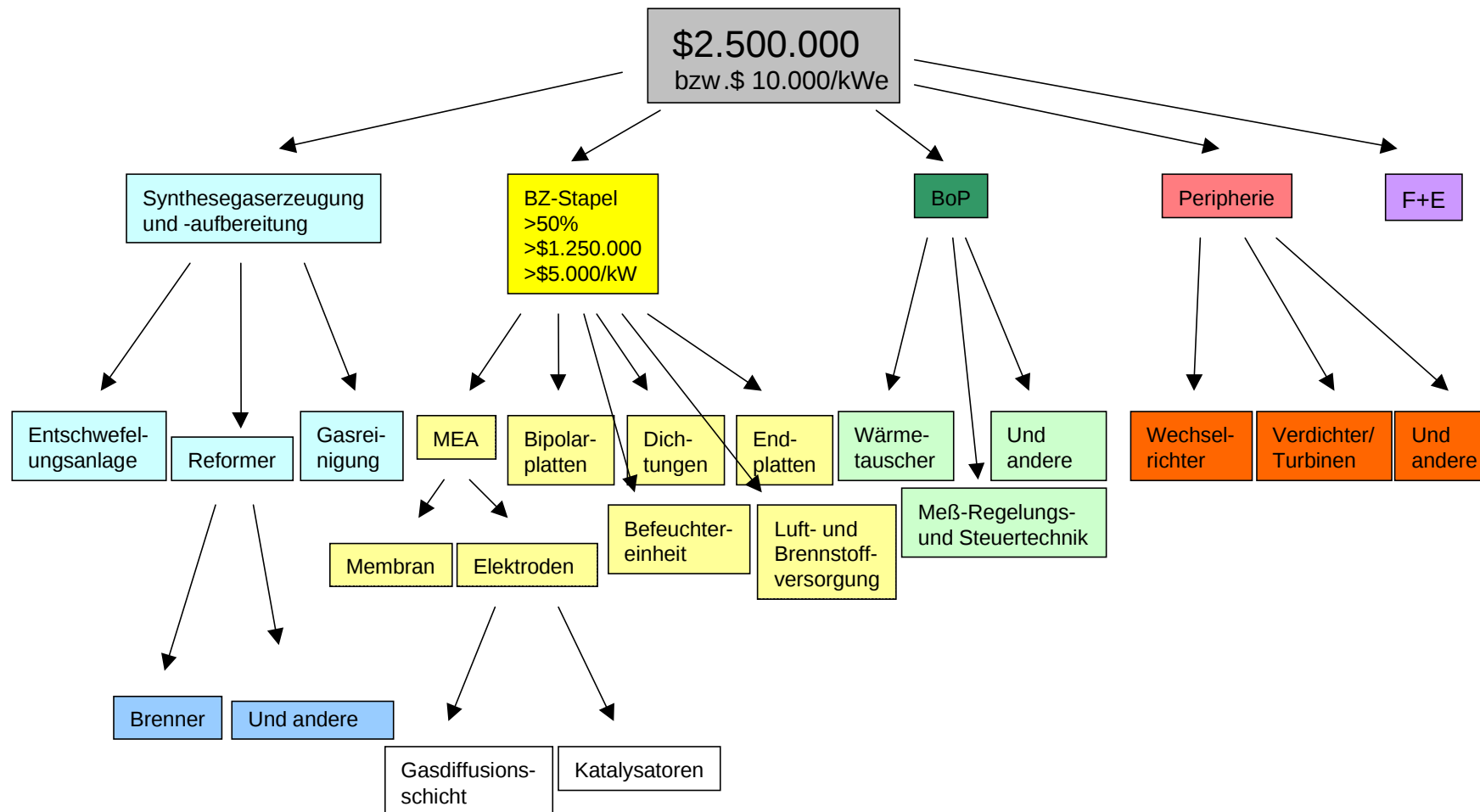
	klein	mittel	groß
Benzin u. MeOH	1120	1960	3050
Diesel	1420	2340	3610

variable Kosten (ohne Kraftstoff) [Pf/km]

	klein	mittel	groß
Alle Antriebe	5	6	7

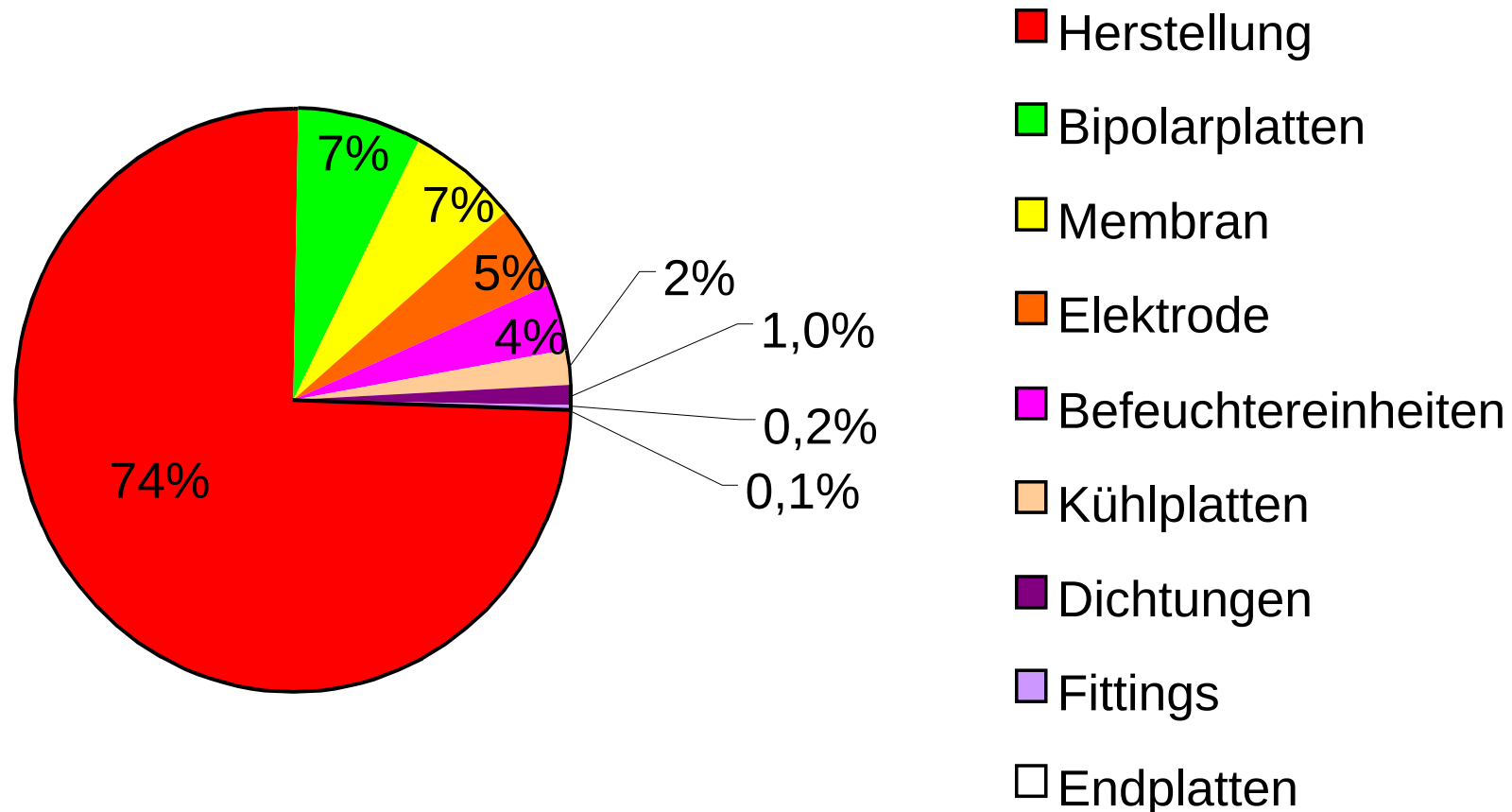


Beispiel für momentane Kostenstruktur: Stationäre Anwendung, PEFC-BHKW 250 kW_e



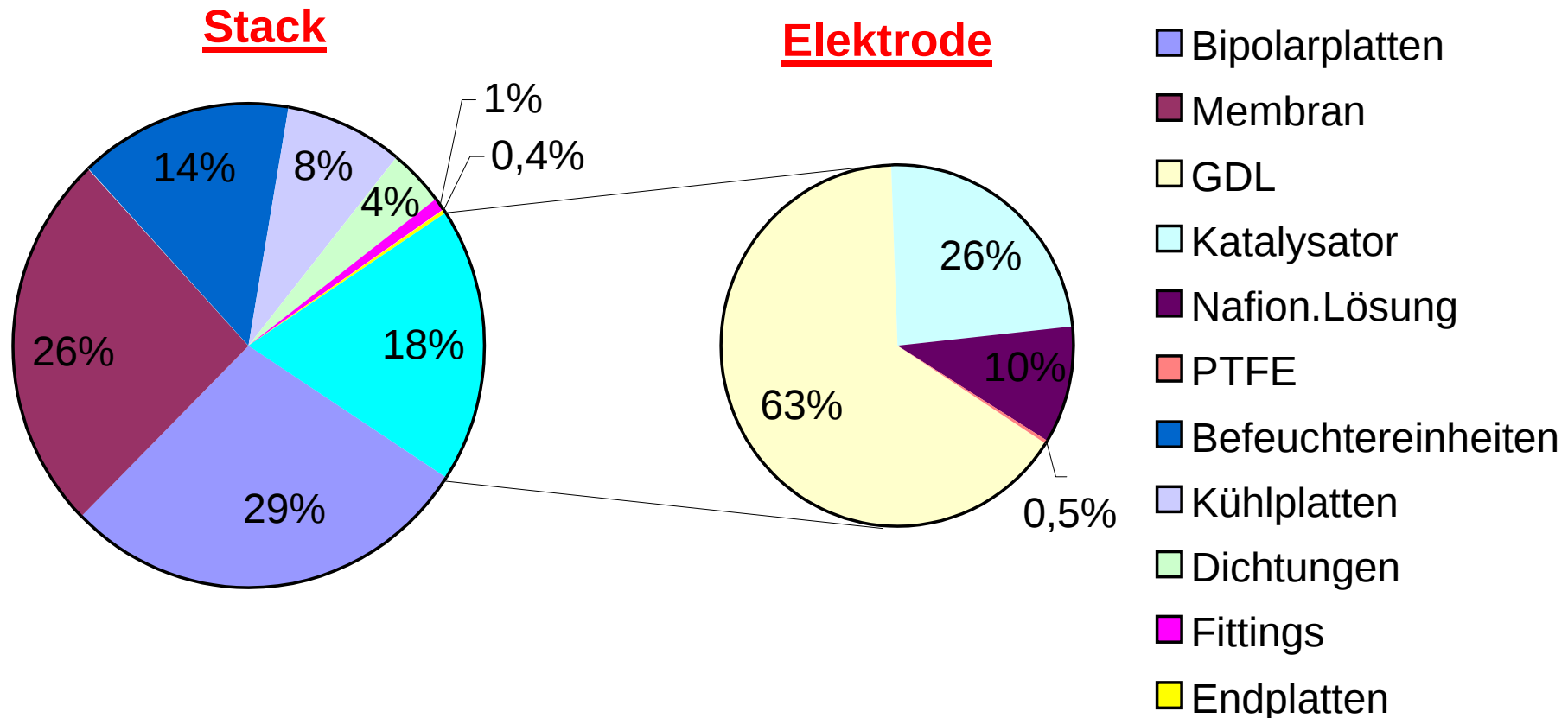


Heutige Kostenverteilung PEFC-Stack





Heutige Kostenverteilung reine Materialkosten (PEFC-Stack)





Kostenanalysen: Zusammenfassung

- Je höher die Leistungsanforderungen an Pkw's werden desto geringer fällt ein möglicher anlegbarer Aufpreis von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Benzin-Pkw's aus (Preisniveau über dem der Diesel-Pkw in der kleinen Klasse, bei etwa gleichen Preisen wie ein Benzin-Pkw in der großen Klasse).
- Differenziert nach Endenergieträgern muss die Mineralölsteuer angepasst werden (Für Methanol Annäherung an Dieselkraftstoff; für CH₂ verzicht auf Mineralölsteuer).
- Identifikation großer Kostensenkungspotenziale beim Herstellungsprozess des Stacks; Erwartung wesentlicher Kostenreduktionen durch die großtechnische Seriefertigung



Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

- 1) Einleitung und allgemeiner Stand der Technik
- 2) Fahrzeuganalysen
- 3) Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale
- 4) Kostenanalysen
-  5) ***Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen***
- 6) Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen



Energieumwandlungsketten für Pkw – NEFZ-Fahrzyklus

	Benzin Rohöl VM	Diesel Rohöl VM	FT-D Erdgas VM	CNG Erdgas VM	CH ₂ Erdgas BZ	IMFC Erdgas BZ	DMFC Erdgas BZ	FT-D Erdgas BZ	Strom Mix Bat
E_{Pkw} in MJ/100km	153	132	132	145	91	125	111	136	51
m_{Pkw} in kg	1 064	1 062	1 062	1 064	1 164	1 257	1 202	1 251	k.A.
η_{Pkw} in %	22	25	25	23	39	30	31	27	59
η_{KK} in %	84	92	62	81	64	64	64	62	32
E_{EUK} in MJ/100km	182	144	213	180	141	194	172	219	160
η_{EUK} in %	18	23	16	19	25	19	20	17	19
CO ₂ in kg/100km	12,8	10,6	14,5	10,4	8,3	11,8	10,5	15,0	10,0
	Reg.	Reg.	Fern	Lokal	Reg.	Fern	Fern	Fern	Reg.

Bat: E-Antrieb mit Batterie

BZ: E-Antrieb mit Brennstoffzelle (PEFC)

CH₂: Druck-Wasserstoff

CNG: Druck-Erdgas

DMFC: Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
(ohne Reformier)

EUK: Energieumwandlungskette
Pkw + Kraftstoff

FT-D: Fischer-Tropsch Diesel

Fern: Erzeugung des Endenergieträgers
am Bohrloch (z.B. Übersee)

IMFC: Indirekte Methanol Brennstoffzelle
(mit Reformier)

KK: Kraftstoffkette

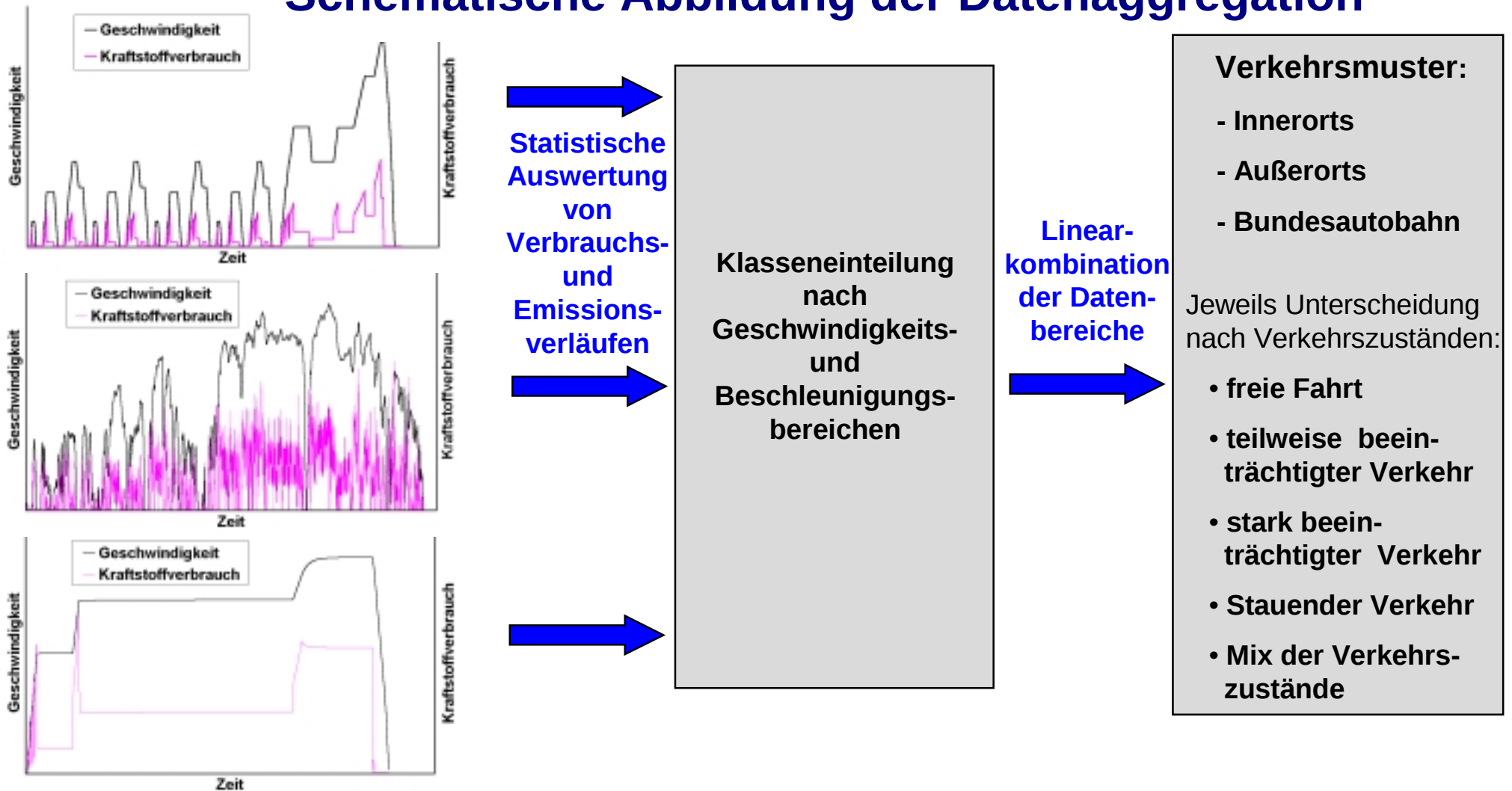
Lokal: Lokale Erzeugung des
Endenergieträgers

Reg.: Regionale Erzeugung des
Endenergieträgers

VM: Verbrennungsmotor



Aufbereitung der Simulationsdaten – Schematische Abbildung der Datenaggregation



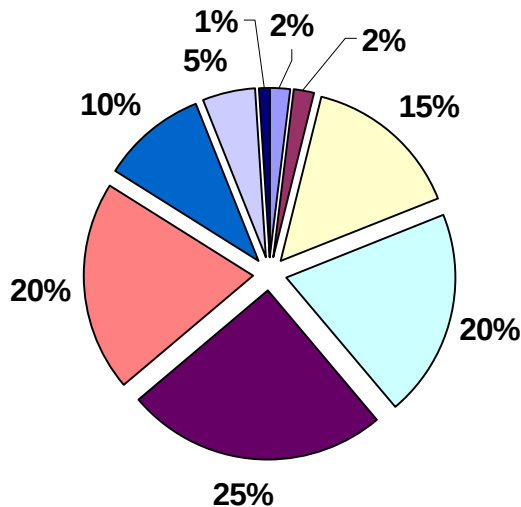


Definition *IKARUS*-Verkehrsmuster

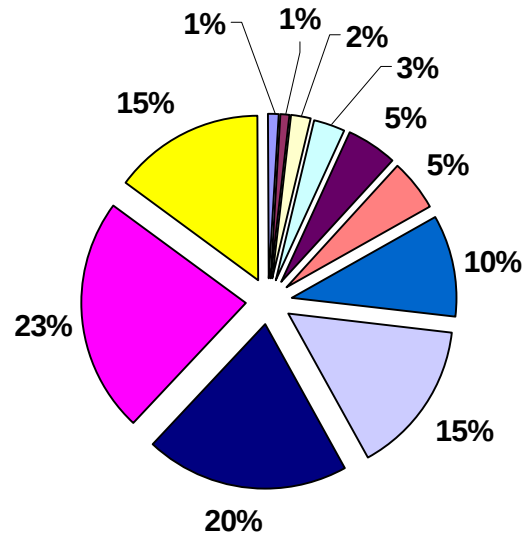
Geschwindigkeits-
bereiche



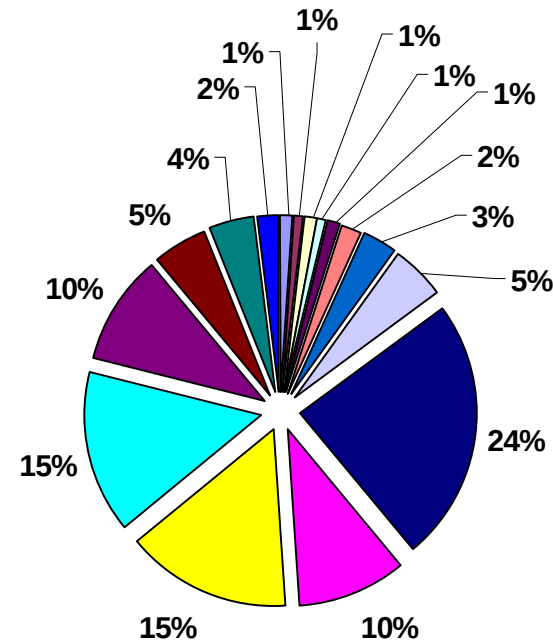
Verkehrsmuster *IO*



Verkehrsmuster *AO*



Verkehrsmuster *BAB*



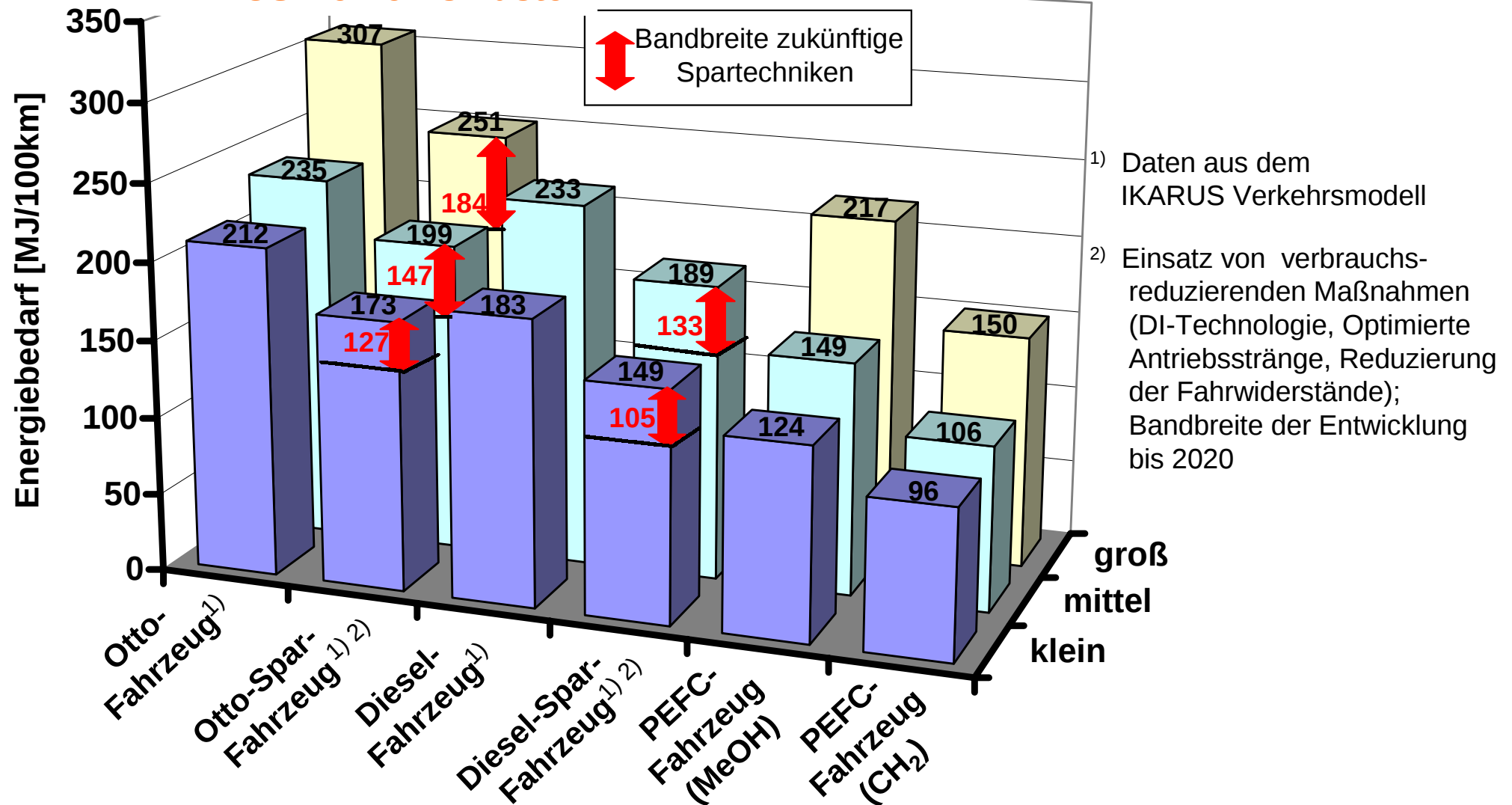
Gewichtung der Straßenarten im Nah- und Fernverkehr für PKW aller Klassen

Nahverkehr (Nachfrage 2005: 465 Mrd. Pkm)		Fernverkehr (Nachfrage 2005: 350,1 Mrd. Pkm)	
Straßenart	Anteil Gesamtfahrleistung [%]	Straßenart	Anteil Gesamtfahrleistung [%]
IO	53	IO	3
AO	41	AO	37
BAB	6	BAB	60



Spezifischer Energiebedarf (Fahrzeugbetrieb)

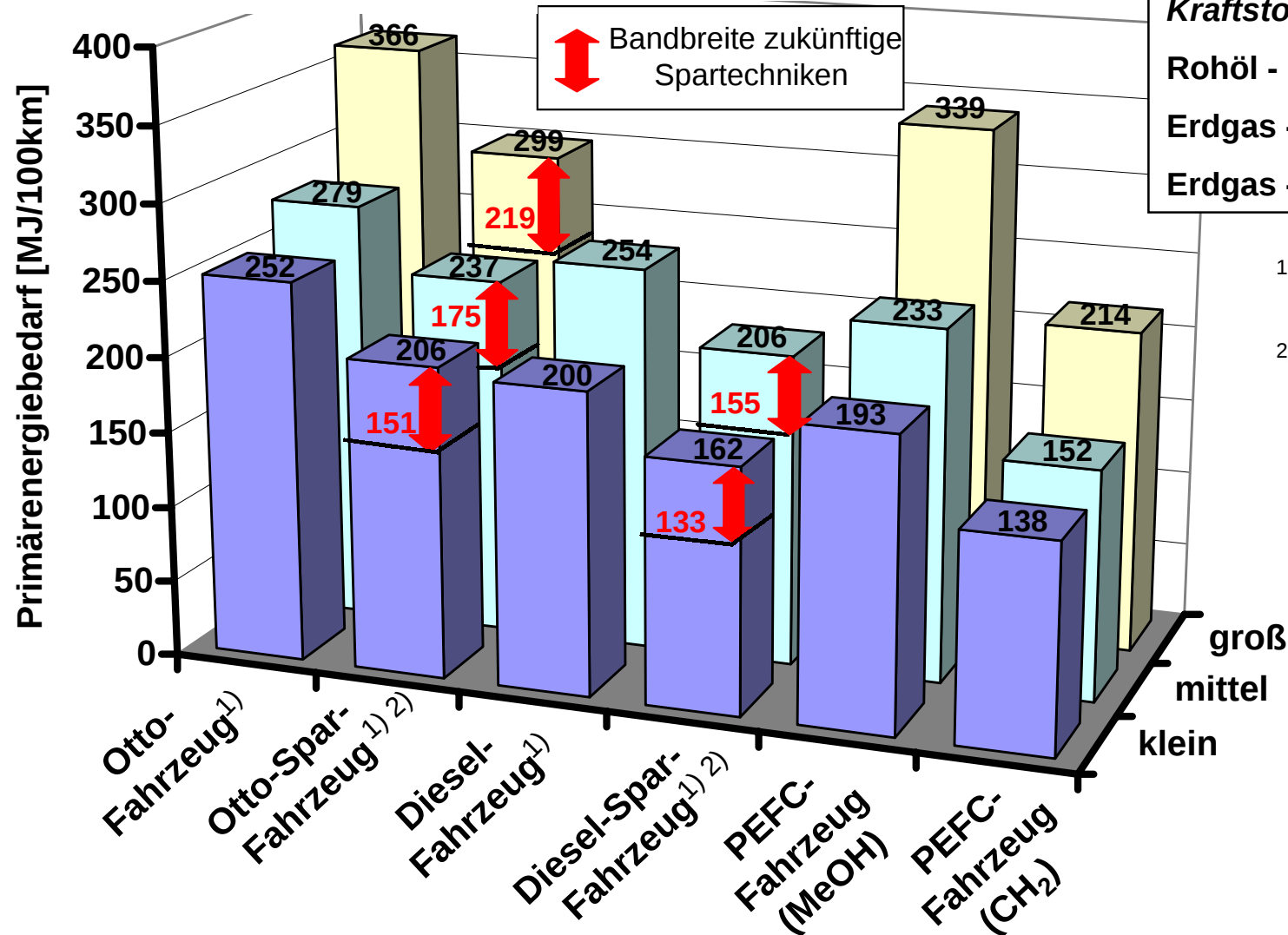
IKARUS-Verkehrsmuster





Spezifischer Primärenergiebedarf (Gesamt-EUK)

IKARUS-Verkehrsmuster

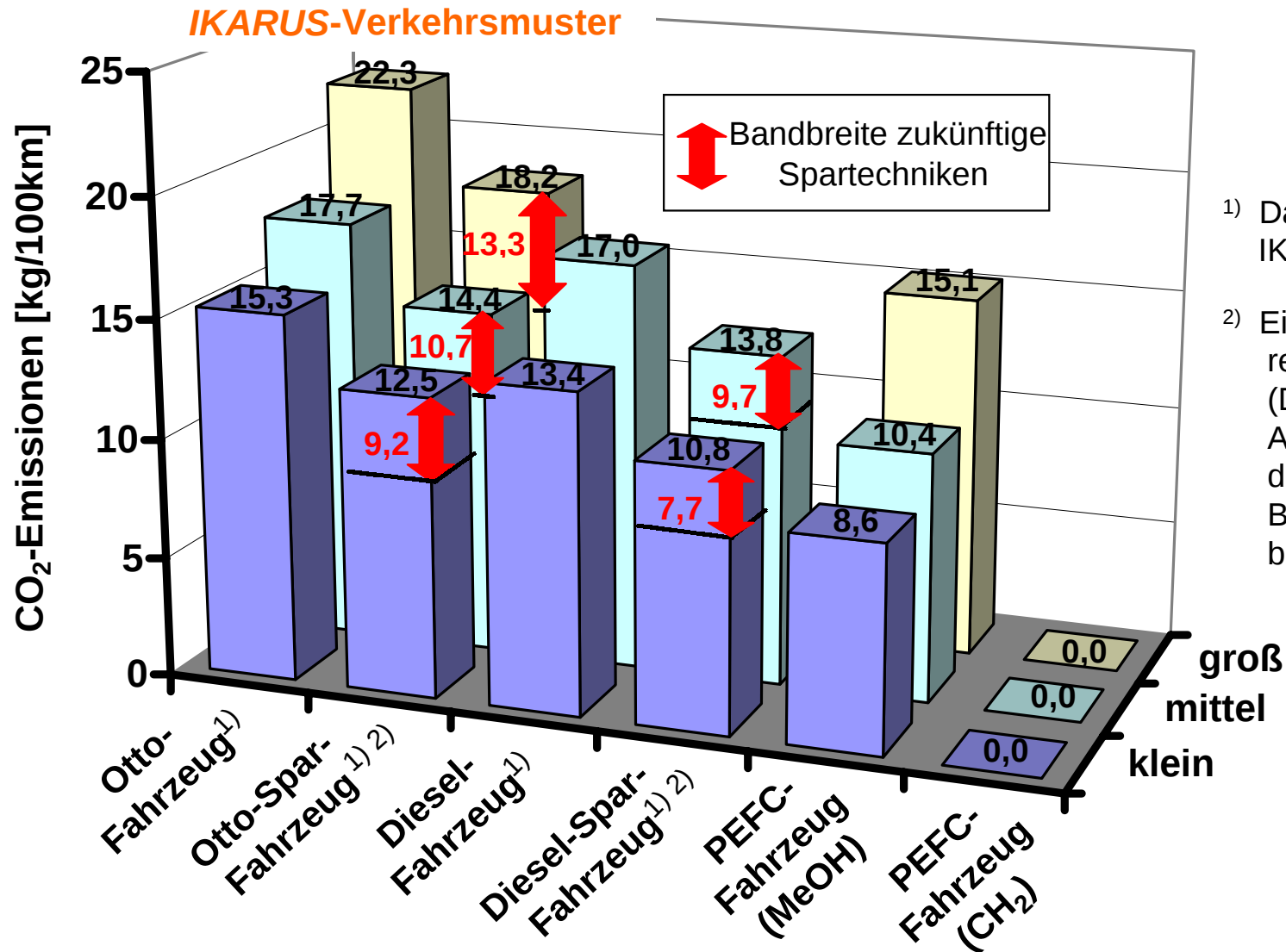


- 1) Daten aus dem IKARUS Verkehrsmodell
- 2) Einsatz von verbrauchs-reduzierenden Maßnahmen (DI-Technologie, Optimierte Antriebsstränge, Reduzierung der Fahrwiderstände); Bandbreite der Entwicklung bis 2020



Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen

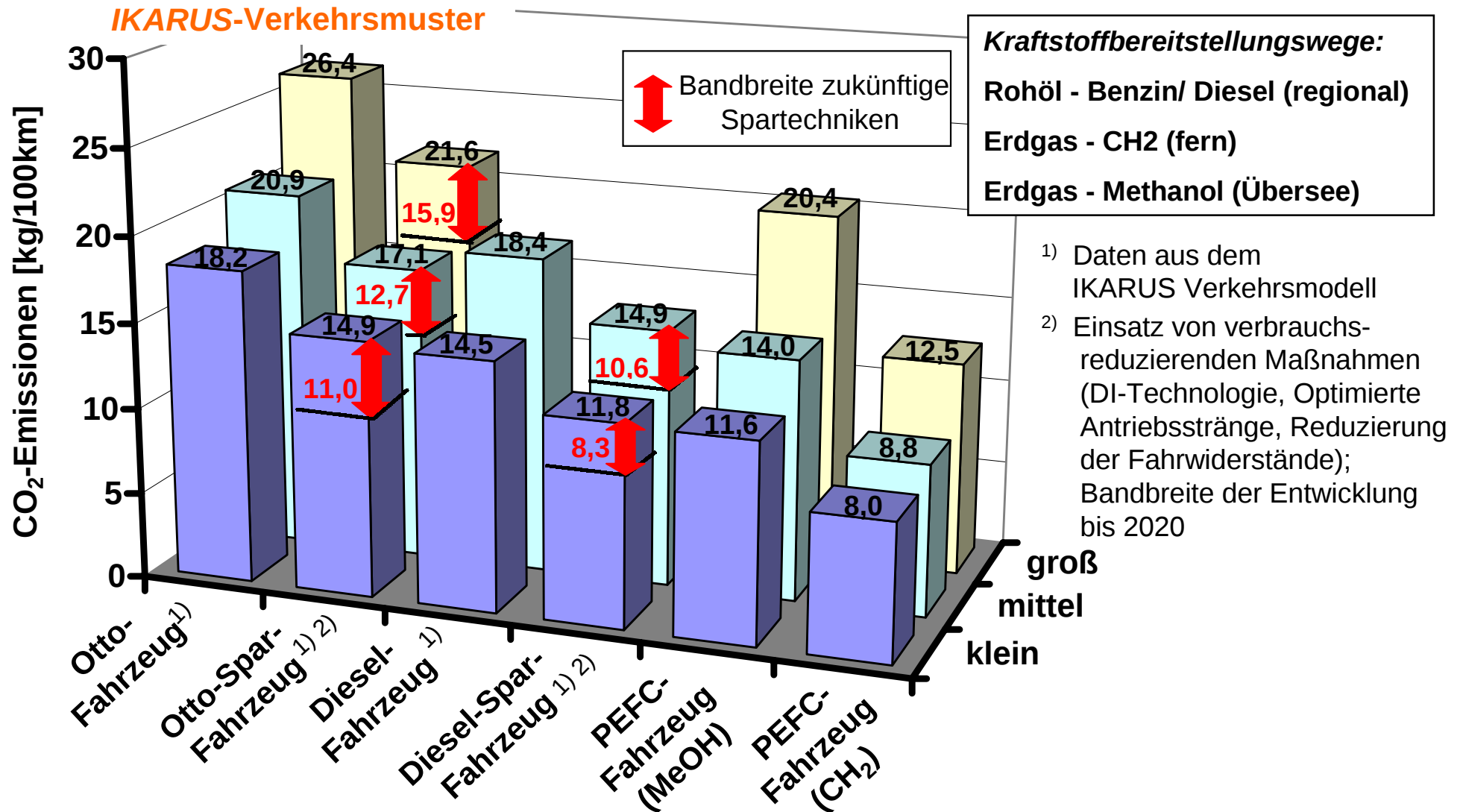
Spezifische CO₂-Emissionen (Fahrzeugbetrieb)



- 1) Daten aus dem IKARUS Verkehrsmodell
- 2) Einsatz von verbrauchs-reduzierenden Maßnahmen (DI-Technologie, Optimierte Antriebsstränge, Reduzierung der Fahrwiderstände); Bandbreite der Entwicklung bis 2020

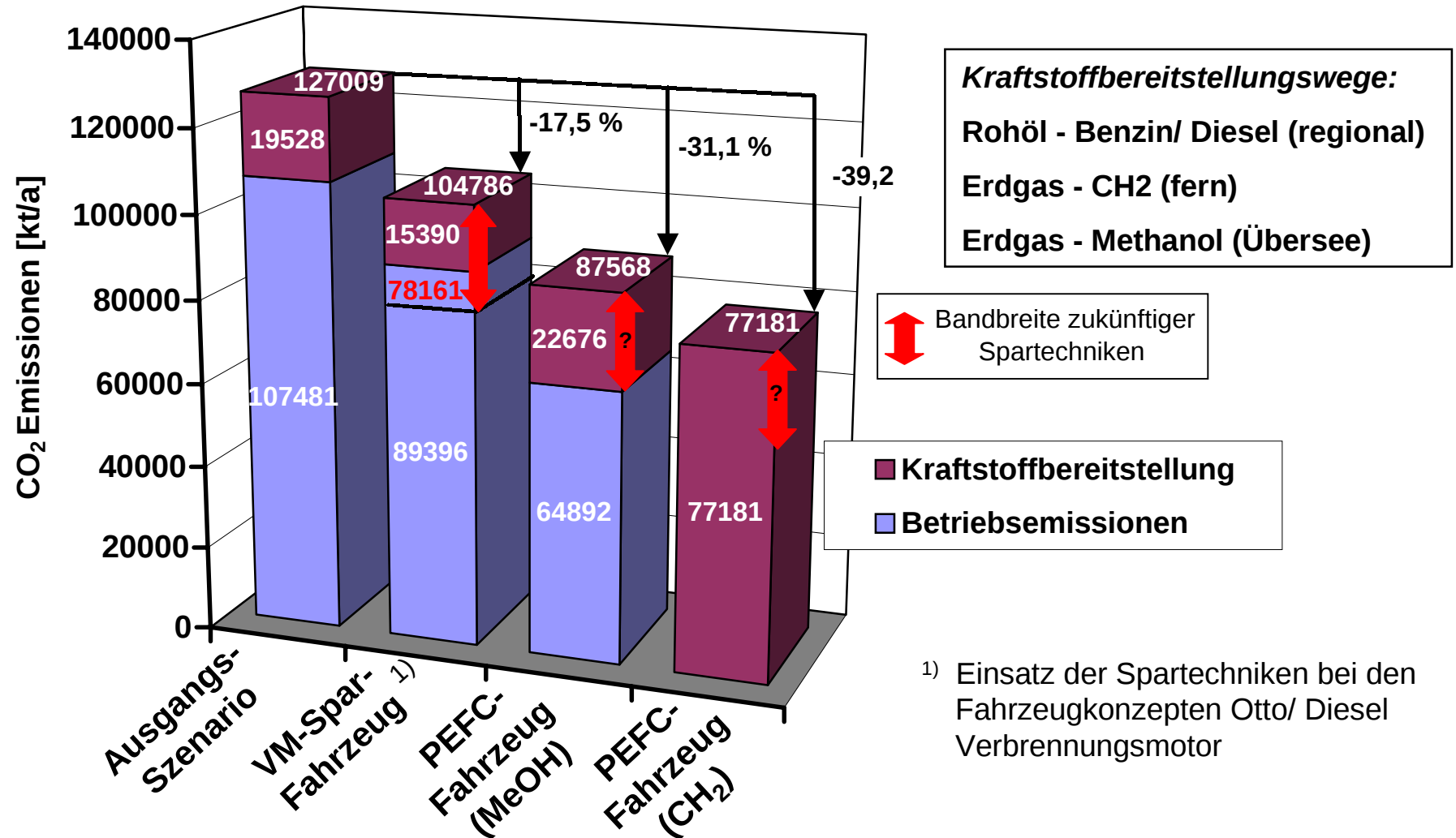


Spezifische CO₂-Emissionen (Gesamt-EUK)



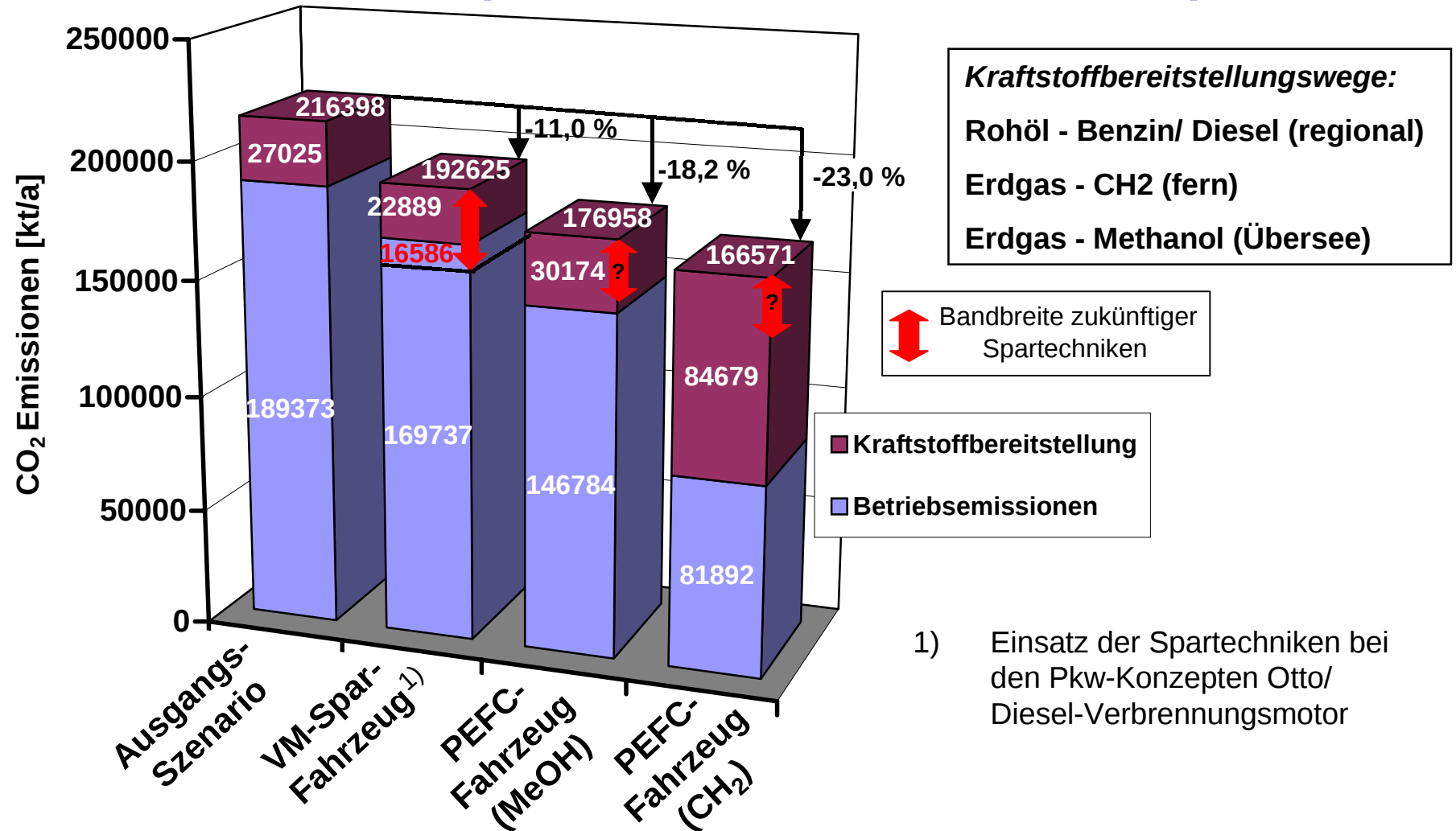


Abschätzung der maximalen CO₂-Einsparpotenziale im Pkw-Verkehr





Abschätzung der maximalen CO₂-Einsparpotenziale im Gesamt-Verkehr (Personen- und Güterverkehr)





Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen: Zusammenfassung

- Vergleichende Bilanzierungen konkurrierender Kraftstoff- und Fahrzeugsysteme sind nur über die gesamte Energieumwandlungskette möglich.
- Der Einsatz von Brennstoffzellen in Elektrofahrzeugen lässt ein CO₂-Einsparungspotenzial erkennen (Differenzierung nach Fahrzeugklassen und Kraftstoffbereitstellungspfaden notwendig).
- Zukünftige verbrauchsreduzierende Techniken bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor besitzen ein ähnliches CO₂-Minderungspotenzial im Vergleich zu PEFC-Elektrofahrzeugen; es sind jedoch Nachteile bei den limitierten Emissionen zu erwarten.
- Deutliche CO₂-Minderungen sind erst bei einer regenerativen Bereitstellung des Kraftstoffs zu erwarten (unabhängig vom Antriebsstrang).
- Bei einem zu erwartenden begrenzten Angebot an regenerativen Kraftstoffen ist deren effiziente Nutzung durch verbrauchsarme Fahrzeuge anzustreben; dies ist mit Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen möglich.



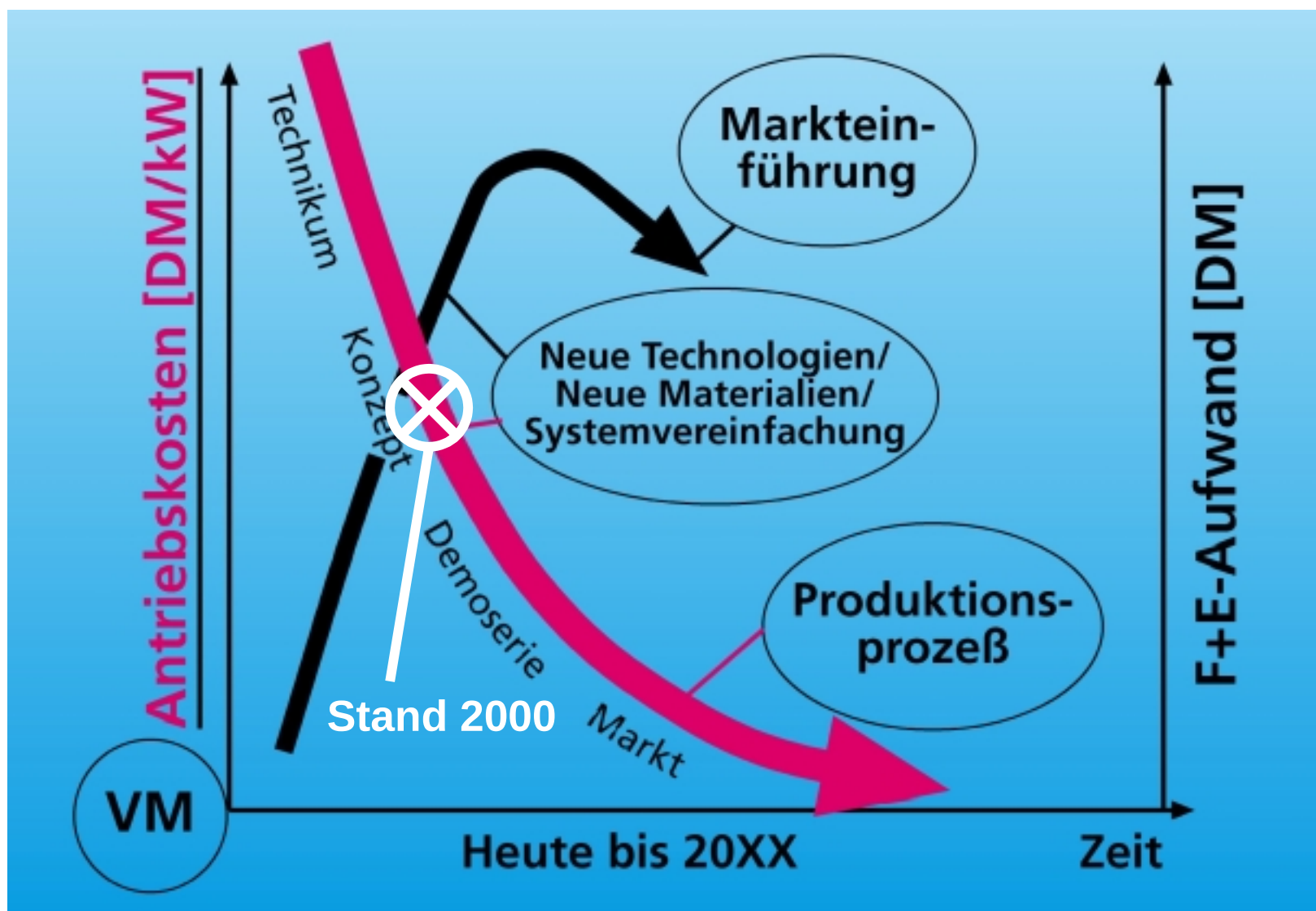
Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

- 1) Einleitung und allgemeiner Stand der Technik
- 2) Fahrzeuganalysen
- 3) Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale
- 4) Kostenanalysen
- 5) Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen

 6) *Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen*



Vom Technikum zum Markt





Kraftstoffe und Brennstoffzellen-Elektroantriebe

- **Wasserstoff wie Methanol oder synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe werden mittelfristig aus Erdgas für VM- und BZ-Elektroantriebe hergestellt**
- **Wasserstoff**
 - Speichertechnik muß entwickelt werden
 - Sicherheitstechnik muß entwickelt werden
 - Antriebe mit BZ-H₂ effizienter als BZ-MeOH und erst recht als VM-Antriebe
 - Neue Erzeugungskapazitäten und Infrastrukturen erfordert sehr große Investitionen;
=> langfristige Ziel: regenerativ
- **Methanol (MeOH), Benzin/Diesel (synthetisch)**
 - Speicherung und Verteilung einfach
 - Brennstoffzellenfahrzeug komplexer und schwerer
 - Neue Anlagenkapazitäten müssen aufgebaut werden, Biomasseinsatz möglich
 - CO₂-Bilanz ungünstiger als bei gasförmigem Wasserstoff (Basis Erdgas)
- **Individueller Kundenanreiz zum Kauf eines Brennstoffzellen-Kfz ist gering, da es nur wenig neuen Kundennutzen bringt. Daher steht ein Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug als Substitutionsprodukt unter Kostendruck**



Handlungsstrategien für den Einsatz von Brennstoffzellen (I)

- **Brennstoffzellen für mobile Anwendungen fördern:**
 - *Auf Grund internationaler Aktionen*
Motiv: EU Emissions-Standards,
CARB-ZEV-Regeln für Kalifornien (für Kfz-Hersteller)
 - *Auf Grund nationaler Umweltentlastung*
Motiv: Reduktion lokaler Emissionen in Innenstädten und Smoggebieten,
Klimagasreduktion bei weiterer Verbrauchsreduktion
- **Technikentwicklung mittelfristig fördern; insbesondere zur Kostensenkung und Gewichtsreduktion der Systeme:**
neue Techniken, neue Materialien, Systemvereinfachungen
- **Einbezug der kleinen und mittlere Unternehmen (KMU) in die Technikentwicklung**
- **Reformerentwicklungen für die verschiedenen Antriebskonzepte mit Brennstoffzellen in Forschung & Entwicklung begleiten:**
im Übergang zur marktreifen Integration von H₂ auf erneuerbarer Basis



Handlungsstrategien für den Einsatz von Brennstoffzellen (II)

- **Neue Wertschöpfungsstrukturen und Berufsbilder identifizieren**
- **Demonstrationsprojekte fördern**
 - H₂-betriebene Busse und MeOH-Pkw als Nischenlösungen mit Türöffnerfunktion
 - Akzeptanz in der Gesellschaft fördern
- **BZ-Systeme zur An-Bord Strombereitstellung von VM-Kfz fördern**
- **Kraftstoffstrategien auf EU-Basis weiterentwickeln:**

Potenzial-, Verfahrensanalysen für Kraftstoffe auf fossiler Basis:

 - Kostenentwicklungen für zukünftige Kraftstoffe analysieren;
 - regionale Entscheidungen treffen für neue Infrastrukturen
- **Neue Kraftstoffe zunehmend auf erneuerbarer Basis einführen:**
 - primäre Biomassen (Energiepflanzen, Nachhaltige Forstwirtschaft) und
 - sekundäre Biomassen (Restholz, Ernterückstände, Biogas);



Handlungsstrategien für den Einsatz von Brennstoffzellen (III)

- **Verbrennungsmotor- ebenso wie für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge:**
Für neue Kraftstoffe EU-weite Abstimmung bezüglich Kraftstoffspezifikationen und Zulassungsanforderungen (Sicherheit, Infrastruktur) bewirken
- **Förderung von Methanol auf Erdgas- und Biomassebasis:**
Brennstoffzellen-Kfz (auch DMFC) zeitlich früh und flächendeckend einsetzen zur Flottenerfahrung und als Brückenfunktion für spätere Kraftstoffstrategien
- **Netzwerke schaffen zur Optimierung einer effektiven Marktentscheidung:**
Technikentwicklung, Systemanalysen, Markteinführungsstrategien
- **Politische Instrumente auf dem Weg zur Marktpenetration einsetzen:**
Steuern kraftstoff- bzw. antriebsorientiert, Technikförderung, Infrastrukturanforderungen stützen



Brennstoffzellensysteme für mobile Anwendungen

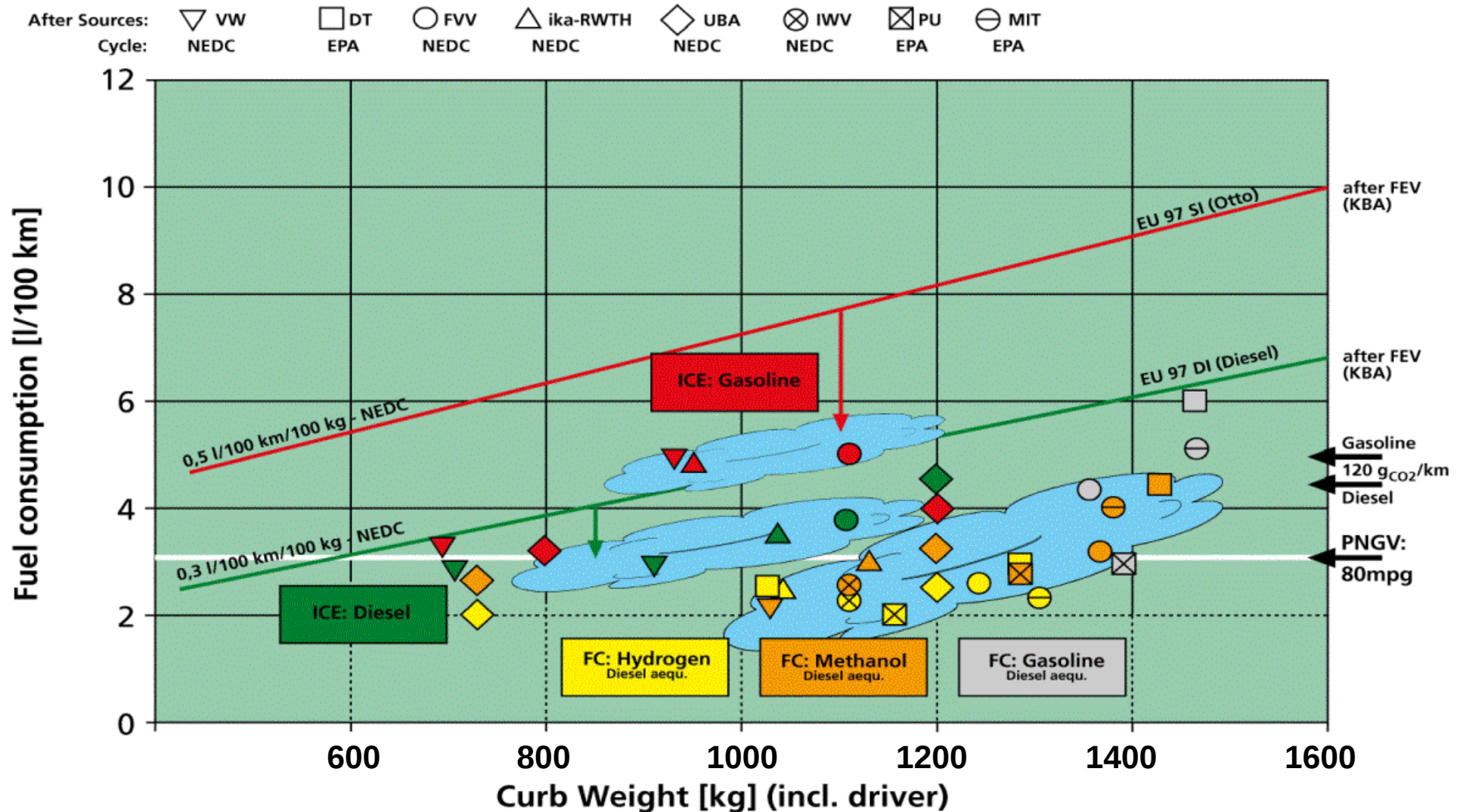
- 1) Einleitung und allgemeiner Stand der Technik
- 2) Fahrzeuganalysen
- 3) Kraftstoffe: Bereitstellung, Kosten und Gefährdungspotenziale
- 4) Kostenanalysen
- 5) Energieumwandlungsketten und Verkehrsbilanzen
- 6) Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen



Anhang und Folien Erläuterungen



Studienvergleich: Pkw Energiebedarf als Funktion des Gewichts





Übersicht: Kraftstoffe und Speichersystemdaten

Kraftstoff [Fahrzeugantrieb (Klassifikation)]	Kraftstoff- dichte (Normzustand) kg / m ³	Energiedichte			spez. Verbrauch [exempl. Fahrzeuge]		Tank- werkstoff	Tank- volumen Liter	Pkw- Reichweite km	Tank- gewicht leer [kg]	Invest- kosten Tank DM / Tank
		MJ / kg	kWh / kg	kWh / l	Liter / 100km	MJ / 100km					
Benzin [VM-Pkw (klein)]	750 (flüssig)	43,2	12,01	9,01	6,7	217	Kunststoff	55	786	~ 7	~ 200
Diesel [VM-Pkw (klein)]	831 (flüssig)	42,7	11,87	9,86	5,1	181	Kunststoff	55	917	~ 7	~ 200
Methanol [PEFC-Elektro-Pkw (klein)]	796 (flüssig)	21,5	5,98	4,76	8	137	Kunststoff	55	688	~ 7	~ 200
Erdgas H (CNG 200 bar) [VM-Pkw (mittel)]	154 (gasf.)	47	13,14	2,02	~ 6 kg	282	Stahl Al / GFK	~ 80 ~ 85	~ 205 ~ 220	~ 100 ~ 30	~ 1000 k.A.
Wasserstoff (CH₂ bei 200 bar) [PEFC-Elektro-Pkw (klein)]	17,8 (gasf.)	120	33,3	0,59	0,8 kg	96	Al / GFK	~ 85	~ 190	30	k.A.
Wasserstoff (LH₂ bei -252 °C) [VM-Pkw (groß)]	71 (flüssig)	120	33,3	2,37	~ 38	324	Carbonfaser Verbund mit Isolation	~ 140	~ 350	~ 150	Ziel: 3.000 - 5.000



Auswahl weiterer Literatur zum Einsatz von Brennstoffzellen in mobilen Anwendungen:

ADL (1996): Energy Efficiency and Emissions of Transportation Fuel Chains. Arthur D. Little, Inc. (Acom Park: Cambridge, Mass.)

ADL (2000): PEM Fuel Technology – the Best Option for Fuel Cell Powered Vehicles?. Vortrag von R. STOBART, F-Cells Infrastructure Conference, 25th-26th July 2000 in London, Veranstalter: IQPC

ADL (2000): Cost Analysis of Fuel Cell System for Transportation, Arthur de Little, ref. 49739

ANDRIAN (2001): Verfahrensanalyse eines Direkt-Methanol-Brennstoffzellensystems für mobile Anwendungen, Berichte des Forschungszentrums Jülich GmbH, Jülich, Jül-3869, 2001

ADL (1998): www.adl.com “Gas-to Liquids Concersion” (1998)

ANL (1999): Autor WANG, M. Q., A Full Fuel Cycle Analysis of Energy and Emissions impacts of Transportation Fuels – Production from Natural Gas, ANL/ESD-40, www.anl.gov, Argonne National Laboratory Argonne (USA),

DIETRICH/AMSTUTZ/SCHÄFER (1998): Low Greenhouse Gas Emission Automobiles – Technology and Costs (ETH: Zürich; MIT: Cambridge)

DREIER, Th./ WAGNER, U. (2000/2001): Perspektiven einer Wasserstoffwirtschaft, BWK Bd 52 (2000) Nr. 12 S. 41-46, Bd 53 (2001) Nr. 3, S. 47-54 und Nr. 6, S. 59-66

EDEL: Mannesmann Pilotentwicklung, Fuel Supply Systems - Methanol, in IEA 2001, Herausgeber FZ Jülich, Energietechnik Nr. 13

ETSU (1999): SPFC Bus Design Studies, ETSU for the Department of Trade and Industry, Contractor: Johnson Matthey, prepared by Potter, I./ Reinkingh, J., ETSU F/02/00134/REP, London

FCTAP (1998): Status and Prospects of Fuel Cells as Automobile Engines. Bericht des Fuel Cell Technical Advisory Panel for the State of California Air Resources Board, prepared by Kalhammer, F.R. et al., Sacramento, CA, July 1998.

GM (2001): Well-to Wheel Energy Use and Greehouse Gas Emissions of advanced Fuel Vehicle Systems, General Motors Corporation (Argonne Natiuonale Laboratory, BP Amoco, ExxonMobil and Shell, www.anl.gov

GOSSEN/GRAHL (1999): Gossen, F., Grahl, M.; Vergleich von Brennstoffzellen- und weiteren zukünftigen Antrieben hinsichtlich Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit; 8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik; Aachen; Oktober 4-6, 1999

GRAHL/ERDMANN (2000): Competitiveness and Economic Impacts of Fuel Cell Electric Vehicles on the Future German Market. Contribution for HYFORUM 2000, Munich, Sept. 11-15, 2000

GRAHL; M.K. (2001): Ökonomische Systemanalyse zum Antrieb von Personenkraftwagen mit Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen unter Verwendung neuer Kraftstoffe, dissertation.de Verlag im Internet

GRUBE/HÖHLEIN/MENZER/STOLTEN (2000): Neue Herausforderungen im Straßenverkehr: Brennstoffzellen-Antriebe für Pkw. EUROFORUM Fachkonferenz, Jan. 20-21, 2000

GRUBE/HÖHLEIN/MENZER/STOLTEN (2001): Vergleich von Energieumwandlungsketten – Optionen und Herausforderungen von Brennstoffzellen-Fahrzeugen. AVL Int. Congress, Graz, 6.-7. September 2001



- HÖHLEIN/COLSMAN/MAGIN (1994): Methanol – ein neuer Energieträger für den Verkehr: Methanol-Markt und Methanol-Herstellung, in IKARUS – ein Entwicklungsvorhaben des Forschungszentrum Jülich GmbH im Auftrag des BMFT Nr. 4-11, Forschungszentrum Jülich ZB
- HÖHLEIN et al. (1999): Critical Assessment of Power Trains with Fuel-Cell Systems and Different Fuels. Sixth Grove Fuel Cell Symposium, London, September 13-16, 1999
- HÖHLEIN/GRUBE/STOLTEN (2001): Energieketten – Wege der Kraftstoffbereitstellung; Vortragsmanuskript, VDA Technischer Kongress, Bad Homburg, 26.-27. März
- HÖHLEIN/GARCHE/JÖRISSEN/STOLTEN (2001): Brennstoffzellen im internationalen Vergleich – Bedeutung und Kompetenzen, Konferenz f-cell Die Brennstoffzelle – Forum für Produzenten und Anwender, Stuttgart 15./16.10.2001
- IEA 2001: Implementing Agreement 026 "Fuel Cells" für International Energy Agency, Annex X: "Fuel Cell Systems for Transportation" (1997-1999). Herausgeber B. Höhle, FZJ Jülich in Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik / Energy Technology, Volume 13, ISSN 1433-5522, ISBN 3-89336-275-4
- IEA (1999): Automotive Fuels for the Future, IEAAFIS, OECD/IEA Paris, ISBN: 92-64-16960-1
- ISENBERG 2001: Isenberg, G., Methanol und Biomasse, Vortrag auf der Konferenz E-World 2001 am 14.02.2001 in Essen
- ISENBERG/EDINGER/EBNER (2001): renewable Energies for Climate Benign Fuel production – Powering Fuel Cell Vehicles, DaimlerChrysler AG, Germany, Mai 2001
- KVAERNER (2000): Strategies for low cost methanol production, EPTC 2000, prepared by T. Gamlin, Prague, Czech Republic, June 20-30, 2000
- LAMM (1999): PEM-BZ-Systeme für den mobilen Einsatz. Haus der Technik, Fachveranstaltung, Essen, März 1999
- MENZER/HÖHLEIN (1997): Verfahrensanalyse der Stromerzeugung für Fahrzeugantriebe mit Methanol als Energieträger und Brennstoffzellen als Energieumwandlungssystem. Berichte des Forschungszentrums Jülich, JÜL-3445
- MENZER/HÖHLEIN (1999): Verfahrensanalyse von Brennstoffzellensystemen zur Stromerzeugung für Elektroantriebe in Fahrzeugen bei Nutzung unterschiedlicher Kraftstoffe. Berichte des Forschungszentrums Jülich, JÜL-3666
- MENZER/GRUBE/HÖHLEIN/STOLTEN (2001): Brennstoffzellen in alternativen Antriebskonzepten, in Herausgeber J.-Fr. Hake et al. „Energie und Mobilität“, FZJ Jülich in Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik / Energy Technology, Volume 18, ISSN 1433-5522, ISBN 3-89336-291-6
- METHANEX (2001): Methanol for Fuel Cell Vehicles, Vortrag in Düsseldorf, am 14.2.2001, siehe auch Konferenz „Energy World“ in Essen 2001
- PATYK, HÖPFNER (2000): Ökologischer Vergleich von Kraftfahrzeugen mit verschiedenen Antriebsenergien unter besonderer Berücksichtigung der Brennstoffzelle, ifeu Heidelberg; siehe: "TAB-Arbeitsbericht No. 67, OERTEL/FLEISCHER, TA-Projekt Brennstoffzellen-Technologie Endbericht, Büro für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages", buero@tab.fzk.de
- PEHNT, M. (2001): Die Bedeutung alternativer Antriebe und Kraftstoffe:
Sechs Thesen (DLR Stuttgart), IIR Deutschland Konferenz, Düsseldorf, Juni 2001
- PEHNT, M. (2001): Ökologische Nachhaltigkeitspotentiale von Verkehrsmitteln und Kraftstoffen, DLR Stuttgart, Juni 2001



SCHWEIMER (1996/1999): Life Cycle Inventory, VDI Berichte 1307 (1996); Sachbilanz des 3-Liter-Lupo, VDI-Berichte 1505 (1999) (Düsseldorf, Germany: VDI-Verlag)

STOBERT (2000): Pem Fuel Technology – the Best Option for Fuel Cell Powered Vehicles?, IQPC Conference, London, July 25-26, 2000

TAB (2001): Systemvergleich: Einsatz von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen. Studie für Büro für Technikfolgen-Abschätzung, Deutscher Bundestag, Verantwortlicher Autor: B. Höhle, Forschungszentrum Jülich (IWV-3) in Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik / Energy Technology

THOMAS/LOMAX/KUHN (1998/2000): Integrated Analysis of Hydrogen Passenger Vehicle Transportation Pathways/Fuel options for the fuel cell vehicle Directed Technologies, Inc., Arlington, Virginia, Int. Journal of Hydrogen Energy 25 (2000) 551-567

WANG M. (2000): Full Fuel-Cycle Greenhouse Gas Emission Impacts of Transportation Fuels Produced from Natural Gas, SAE Paper 2000-01-1505

WANG M. Q./HUANG H.-S. (1999): A Full Fuel Cycle Analysis of Energy and Emissions Impacts of transportation Fuels Produced from Natural Gas, Argonne National Laboratory (Chicago USA), ANL/ESD-40

WANG M., et al. (2001): Transportation Fuels Infrastructure, Argonne National Laboratory, IIR Conference, Cologne, March 2001



Folienerläuterungen

Limitierte Emissionen: Standards und PEFC-Elektrofahrzeuge

Emissions-Standards	CO mg/km	NO _x mg/km	NMOG mg/km	PM 10 mg/km
Europa				
EURO 2005 OK/DK	1000 / 500	80 / 250	100 / 50 ⁴⁾ (KW)	- / 25
Kalifornien ¹⁾				
ULEV 120.000 M	1312	43	34	6
SULEV 120.000 M (= <i>Near Zero</i> : Nissan (Benzin) Ford, Honda (CNG), FC MeOH, Hybrid-Antriebe)	625	12	6	6
ZEV (Batterie, H ₂ -BZ)	0	0	0	0
Methanol-PEFC-Elektrofahzeug (Methanolreformer, Katalyt Konverter, Brennstoffzelle, Elektromotor (Technikum) ^{2) 3)})	1 ± 0,2	0,13 ± 0,025	1 ± 0,2	0

¹⁾Kalifornische Standards nach ARB-Vorschlag vom Dez. 1997; ²⁾Quelle bezüglich Emissionen:

[RIEDEL 1996]; ³⁾entsprechend 1,0 - 1,4 MJ/km;

⁴⁾Summe VOC + NO_x = 300 mg/km;

CO = Kohlenmonoxid; NMOG flüchtige organische Gase ohne Methan; NO_x Stickoxide; PM10 Partikel (10µm³); KW Kohlenwasserstoffe

Folie 11

Das Bild zeigt neben den europäischen Emissionsstandards für Benzin (OK)- und Diesel (DK)-betriebene Pkw im europäischen Fahrzyklus für 2005 die kalifornischen Emissionsstandards für Pkw im US-Fahrzyklus und die zu erwartenden limitierten Emissionen für Methanol-betriebene Brennstoffzellen Pkw nach Technikumsergebnissen des FZJ.

Die neue kalifornische Gesetzgebung (Stand: Dezember 2000) legt fest, dass ab 2003 10 % aller verkauften Pkw eines Herstellers ZEV (*Zero Emission Vehicle*)-Pkw sein müssen. 2 % müssen wirkliche ZEV sein, wie H₂-Brennstoffzellen-Elektro-Pkw oder Batterie-Elektro-Pkw, 2 % PZEV (*Partial Zero Emission Vehicle*; z.B. Hybridfahrzeuge) und 6 % solche Pkw's, die den SULEV-Emissionsstandard oder auch *Near-Zero* genannt (siehe Bild) erfüllen (z.B.: Pkw mit Erdgas- oder Benzin-Verbrennungsmotor oder mit Methanol-Brennstoffzellenantrieb). Zur Kategorie der ZEV zählen auch sogenannte *Credits*, die man für verschiedene fortschrittliche Antriebseigenschaften erzielen kann wie zum Beispiel für Hybridantriebe mit einer Batteriekapazität für mindestens 60 Meilen Reichweite oder überhaupt für die Verwendung von neuen Energieträgern wie Methanol oder Wasserstoff insbesondere regenerativ erzeugtem Wasserstoff.



Auswahl: Brennstoffzellen-Systeme für Traktion

- **PEFC**-Niedertemperatur-Systeme kommen heute für die Traktion vorrangig bei Straßen- oder Schienenfahrzeugen in Betracht.
- **AFC**-Niedertemperatur-Systeme setzen den Betrieb mit reinem Sauerstoff und Wasserstoff voraus; Sauerstoffspeicherung bzw. Luftzerlegung erschwert die mobile Anwendung.
- **PAFC**-Niedertemperatur-Systeme haben nach allen vorliegenden Erfahrungen ein zu niedriges Kostensenkungspotenzial und einen für mobile Anwendungen nicht geeigneten flüssigen Elektrolyten.
- **MCFC**-Hochtemperatur-Systeme werden u.a. wegen des geschmolzenen Elektrolyten keine Anwendung für die Traktion finden.
- **SOFC**-Hochtemperatur-Systeme haben bei geringerem Brenngaserzeugungsaufwand einen höheren elektrischen Wirkungsgrad. Gegen SOFC-Systeme sprechen: aufwendigere Anfahrprozeduren, hohe Standverluste, aufwendige Isolierung, Empfindlichkeit gegenüber Erschütterungen; APU-Anwendungen sind in der Diskussion.

Folie 12

Die verschiedenen Brennstoffzellen-Typen lassen sich nach ihrer Betriebstemperatur oder auch nach dem verwendeten Elektrolyten einordnen. Bei der Betriebstemperatur unterscheidet man zwischen den Niedertemperatur- ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), Mitteltemperatur- (bis ca. $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) und den Hochtemperatur-Brennstoffzellen ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Niedertemperatur-Brennstoffzellen arbeiten bei Betriebstemperaturen von $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dazu zählen die schon lange in der Anwendung befindliche alkalische Brennstoffzelle (AFC, Alkaline Fuel Cell), für die nur reiner Wasserstoff als Brenngas geeignet ist (Wasserstoffionen-leitender Elektrolyt: z.B. Kalilauge) und die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell), für die reiner Wasserstoff oder wasserstoffreiche Synthesegase ($\text{CO} < 10\text{ ppm}$) als Brenngase in Frage kommen. Der Wasserstoffionen-leitende Elektrolyt besteht aus einem sulphonierten Polymer. Die PEFC hat bei der Entwicklung von Fahrzeugantrieben einen hohen Entwicklungsstand erreicht [TAB 2001].

Die am weitesten entwickelte Brennstoffzelle - und somit der kommerziellen Nutzung am nächsten - ist die phosphorsaure Brennstoffzelle (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell), für die wasserstoffreiche Synthesegase auf der Basis von Erdgas oder auch Biogasen als Brenngas geeignet sind. Die Betriebstemperatur liegt bei knapp $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Wasserstoffionen-leitende Elektrolyt besteht aus Phosphorsäure.

Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) arbeitet bei einer Temperatur von ca. $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sie kann neben Wasserstoff auch Kohlenmonoxid elektrochemisch in Strom umwandeln. Der Sauerstoffionen-leitende Elektrolyt besteht aus einer Mischung aus Lithium und Calcium Karbonat.

Die Festelektrolyt-Brennstoffzelle (SOFC, Solid Oxid Fuel Cell) arbeitet bei hohen Temperaturen von ca. $800 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Sauerstoffionen-leitende Elektrolyt besteht aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid, einem keramischen Material. Als Brenngas kann sowohl Wasserstoff, als auch wasserstoffreiches (CO -haltiges) Synthesegas eingesetzt werden.

Literatur:

[TAB 2001]: Systemvergleich: Einsatz von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen. Studie für Büro für Technikfolgen-Abschätzung, Deutscher Bundestag, Verantwortlicher Autor: B. Höhle, Forschungszentrum Jülich (IWV-3) in Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik; 2001



Vergleich von Antriebskonzepten (H_2 , CH_3OH , C_8H_{18})

Verfahrensführung abhängig vom Kraftstoff

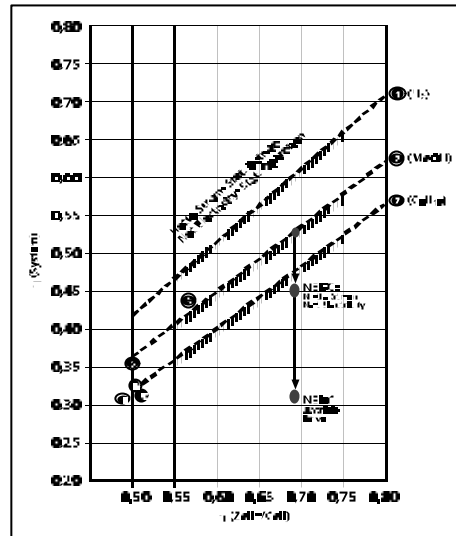
Verfahrensanalyse Netto-Stromerzeugung

- BZ-System ohne Elektroantrieb
- Keine Lastabhängigkeiten

Dynamische Antriebssimulation

- Betriebsverhalten im NEFZ
- Beschreibung bisher nur für Pkw mit Hilfe von Betriebskennfeldern und Übergangsfunktionen

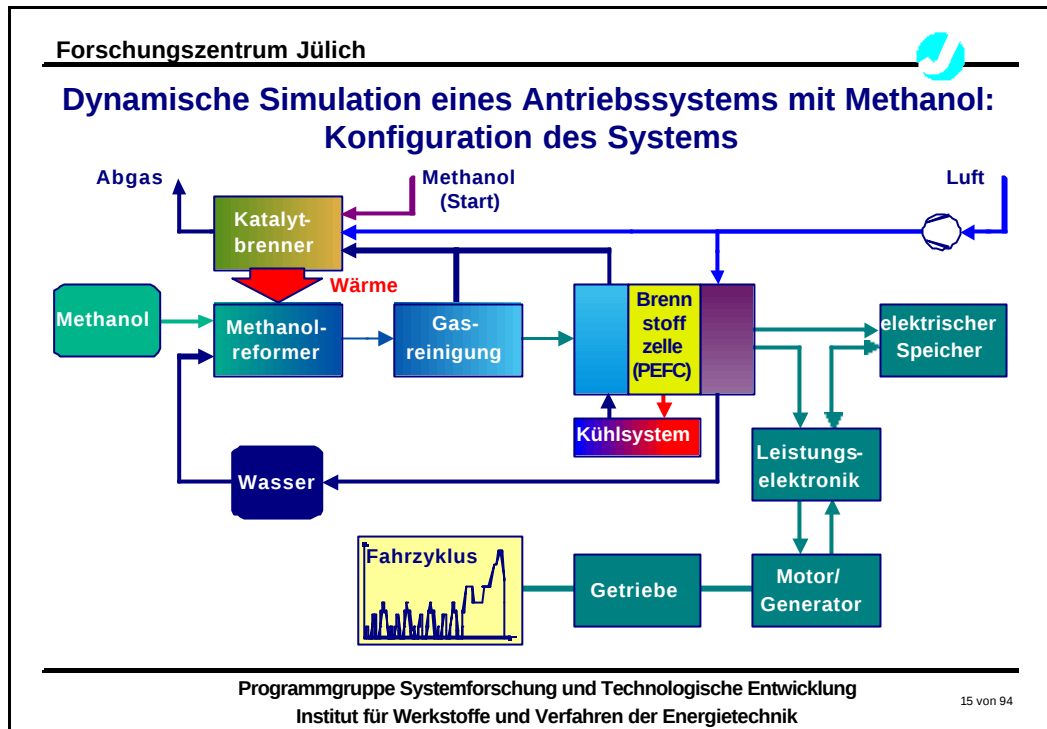
- 1 – MENZER/HÖHLEIN (1999): Wasserstoff
- 2 – MENZER/HÖHLEIN (1999): Methanol: HSR / Membran
- 3 – LAMM (1999): Methanol: HSR / Membran
- 4 – ETSU (1999): Methanol: HSR / Shift / PROX
- 5 – ETSU (1999): Methanol: HSR / Membran
- 6 – ETSU (1999) - Methanol: ATR
- 7 – MENZER/HÖHLEIN (1999) Benzin: ATR
- 8 – LAMM (1999): Benzin: ATR



Folie 13

Mit Hilfe der stationären Verfahrensanalyse können in Abhängigkeit vom Kraftstoff (Wasserstoff- H_2 , Methanol- $MeOH$, Benzin- C_8H_8) Verfahren untersucht und die theoretischen Wirkungsgrad-Potenziale der Strombereitstellung (Nettostromerzeugung) ermittelt werden. Die Systemdefinition umfasst die Auswahl und Verknüpfung der verfahrenstechnischen Komponenten, sowie Annahmen zu deren Betriebsverhalten (z. B. Verdichterwirkungsgrad, Brennstoffzellen-Wirkungsgrad). Die anschließende Optimierung der Stoff- und Energieflüsse führt im Ergebnis zum Systemwirkungsgrad an definierten Betriebspunkten in Abhängigkeit vom Zellenwirkungsgrad.

In Ergänzung dazu, allerdings in geringerer verfahrenstechnischer Tiefe, lässt sich mit einer dynamischen Antriebssimulation das Verhalten eines gesamten Antriebssystems (Brennstoffzellen-System und Elektroantrieb) in einem definierten Fahrzyklus untersuchen. Experimentell ermittelte Kennfelder relevanter Baugruppen und Übergangsfunktionen bilden die Basis solcher Berechnungen. Eine konkrete Auslegung des Fahrzeugs erfolgt für die Parameter, die für die jeweils aktuelle Leistungsbestimmung am Rad notwendig sind (z. B. Fahrzeuggewicht, Widerstandsbeiwerte). Im Bild wurde exemplarisch dargestellt eine dynamische Analyse für den $MeOH$ -Brennstoffzellenantrieb mit der Nettostromerzeugung (45 %; siehe Punkt „NEDC Nettostrom“) und dem Antriebswirkungsgrad (31 %; siehe „NEDC Antrieb“) im europäischen Fahrzyklus bei einem Brennstoffzellenwirkungsgrad von 69 % im Mittel des Fahrzyklus.



Folie 14

Das Modell des Elektroantriebs (längsdynamisches Fahrzeugmodell, Motor/ Generator, Getriebe) errechnet für jeden Zeitschritt der Simulation den Bedarf an elektrischer Nettoleistung. Diese wird gedeckt durch das Brennstoffzellen-System bzw. Kurzzeit-Energiespeicher zur Verbesserung der Dynamik der Strombereitstellung.

Das Brennstoffzellen-System umfasst die Brenngaserzeugung bestehend aus Methanol-Dampfreformer, Katalytbrenner zur Wärmebereitstellung sowie einer Edelmetall-Membran zur Gasreinigung und das Brennstoffzellen-Subsystem inklusive der Nebenaggregate. Das Modell der Brenngaserzeugung stützt sich dabei auf weitreichende Erfahrungen des FZJ auf diesem Gebiet und bezieht Kennlinien aus experimentellen Untersuchungen und Übergangsfunktionen ein. Das Betriebsverhalten des Brennstoffzellenstacks wird mittels Kennlinien aus der Literatur abgebildet. Kathodenluftkompressor, Kühlmittelpumpe ebenso wie die Einspritzpumpen für Methanol und Wasser gehen als Nebenaggregate in die Berechnungen ein. Sonstige Nebenverbraucher werden mit einer konstanten Leistungsaufnahme von 400 W berücksichtigt.

Der Kurzzeit-Energiespeicher wird hier als elektrisches Speichersystem ausgeführt und mit Energie aus dem Brennstoffzellen-System und bei Bremsvorgängen aus dem Motor/Generator versorgt.

Zur Ansteuerung des Gaserzeugungssystems werden in einer für dieses Antriebskonzept entwickelten Betriebsstrategie die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Ladezustand des Speichers verarbeitet.

Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Weiterentwicklung auf dem Gebiet der Fahrzeug- und Antriebstechnik werden im Rahmen einer Bandbreitendefinition „fortschrittliche“ und „konservative“ Annahmen getroffen. Die Ergebnisse werden als Mittelwerte dargestellt.



Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Methodik

● Fahrzeug und Fahrzyklus

- Methanol-Dampfreformer, Gastrenn-Membran und PEFC-Brennstoffzelle, elektrischer Speicher als Kurzzeit-Energiespeicher
- Fahrzyklus: Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ), Teilzyklen Stadt (ECE) und Überland (EUDC)

● Datengrundlage

- Kennlinien und Kennfeldern (Elektromotor, Brennstoffzelle, Reformer)
- Übergangsfunktionen (Reformer, Gastrenn-Membran)
- experimentelle Ergebnisse des FZJ (Brenngaserzeugung)

● Auslegung/Definition

- Leistungsklassifizierung entsprechend heutiger Pkw
(Höchstgeschwindigkeit: 170 km/h, 0 auf 100 km/h in 15 s)
- Bandbreite für ausgewählte Parameter (z.B. Leergewicht, Widerstandsbeiwerte, spezifisches Antriebsgewicht, Wirkungsgrad der Brennstoffzelle)

Folie 15

Fortschrittliche und konservative Annahmen für Fahrzeugparameter bei der Simulation eines Brennstoffzellen-Antriebssystems mit Methanol-Dampfreformer, Gasreinigung mit Membran, PEFC-Brennstoffzelle und elektrischem Speichersystem.

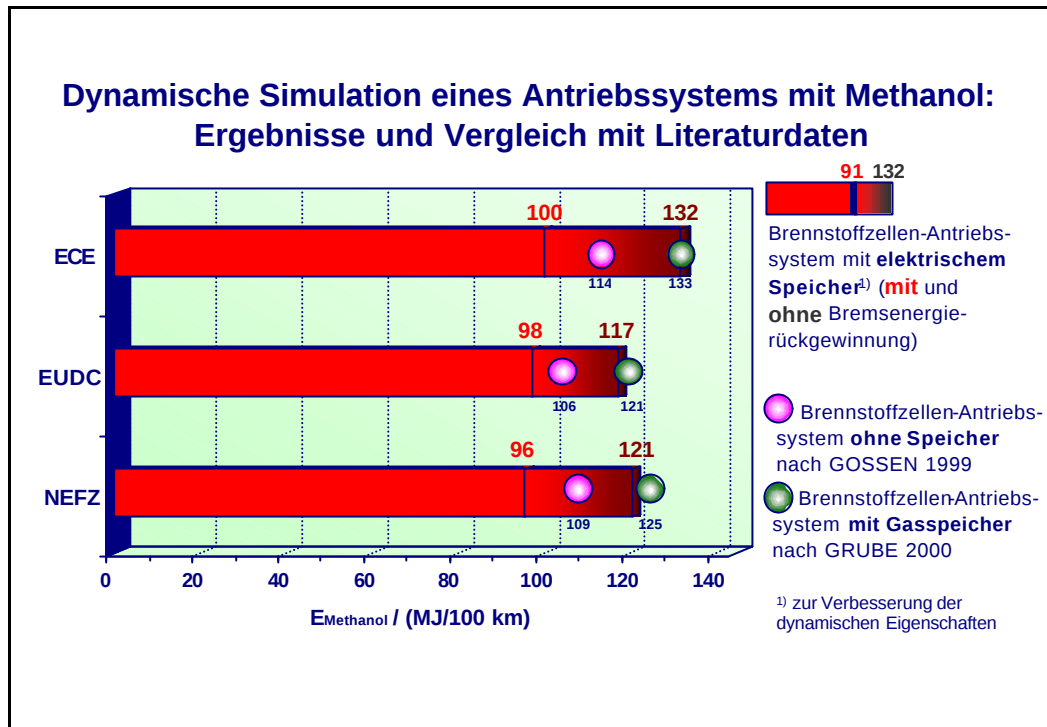
Parameter	fortschrittlich	konservativ
Beschleunigung: 0 auf 100 km/h in s	15	15
Höchstgeschwindigkeit in km/h	170	170
Reichweite in km	500	500
Querspanntfläche in m ²	2	2
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0,30	0,32
Rollwiderstandsbeiwert f_R	$f(c_{R0}, c_{R1}, c_{R2})^{1)}$	$f(c_{R0}, c_{R1}, c_{R2})^{1)}$
Basisgewicht in kg ²⁾	750	800
Spezifisches Antriebsgewicht in kg/kW _{Rad} ³⁾	7	9
Nettoantriebsleistung in kW _{Rad} ⁴⁾	57	62
Stack-Bruttolleistung in kW _{el}	80	100
Stack-Wirkungsgrad (Kennlinie, siehe Anhang)	WAIDHAS 1997	LAMM 1998
Fahrzeuggesamtgewicht in kg	1244	1458

¹⁾ Faktoren zur geschwindigkeitsabhängigen Beschreibung des Rollwiderstandes

²⁾ ohne Antrieb, Tank und Fahrer

³⁾ Antriebsstranggewicht Reformersystem, Brennstoffzellensystem, Elektromotor, Leistungselektronik und Tanksystems (leer) bezogen auf die maximale mechanische Leistung am Rad

⁴⁾ zum Erreichen einer Beschleunigung von 0 auf 100 km/h in 15 s beziehungsweise einer Höchstgeschwindigkeit von 170 km/h



Folie 16

Basis der Abbildung ist das Balkendiagramm mit Mittelwerten aus den Simulationsrechnungen entsprechend „fortschrittlichen“ und „konservativen“ Annahmen. Der jeweils größere Wert (grau markiert) bezeichnet den Energiebedarf in den Fahrzyklen ohne Bremsenergie-Rückgewinnung. Bei Nutzung der gesamten Bremsenergie, ergeben sich die (rot markierten) kleineren Werte.

Zusätzlich sind Daten aus der Literatur eingefügt worden, denen ebenfalls Simulationsrechnungen zugrunde liegen. Die jeweiligen Antriebskonfigurationen unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Speichertechnik und der Leistungsklassifizierung der Antriebssysteme. In [GRUBE 2000] sind vergleichbare Fahrzeugparameter gewählt worden. Als Energiespeicher zur Verbesserung der Dynamik wird jedoch ein Gasspeicher zwischen Gastrennmembran und Brennstoffzelle verwendet. Eine Bremsenergie-Rückgewinnung ist damit nicht möglich. Den Simulationsrechnungen nach [GOSSEN 2001] liegt die gleiche Fahrzeugklasse (Kompaktklasse) jedoch andere Fahrzeugparameter und Gewichtsdefinitionen (z.B. Fahrzeuggesamtgewicht: 1142 kg) zugrunde. Auf einen aktiven Kurzzeit-Energiespeicher wird verzichtet (Annahme: das Brennstoffzellensystem in Verbindung mit der Wasserstofferzeugungseinheit verfügt über eine ausreichende Dynamik). Für das Antriebskonzept mit elektrischem Speicher und Bremsenergie-Rückgewinnung werden in den verschiedenen Fahrzyklen annähernd gleiche Werte für den Energiebedarf je 100 km erzielt. Ohne Bremsenergie-Rückgewinnung stellen sich vergleichbare Werte zu [GRUBE 2000] ein.

Literatur:

[GOSSEN 2001] Gossen, F.; *Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu weiterentwickelten konventionell angetriebenen Fahrzeugen*; Dissertation RWTH Aachen in Schriftenreihe Automobiltechnik; ika RWTH Aachen; 2001

[GRUBE 2000] Grube, Th.; *Neue Herausforderungen im Straßenverkehr: Brennstoffzellen-Antriebe für Pkw*; EUROFORUM Fachkonferenz; Jan. 20-21; 2000



Dynamische Simulation eines Antriebssystems mit Methanol: Energie- und Leistungsmanagement

● Elektrischer Kurzzeit-Energiespeicher

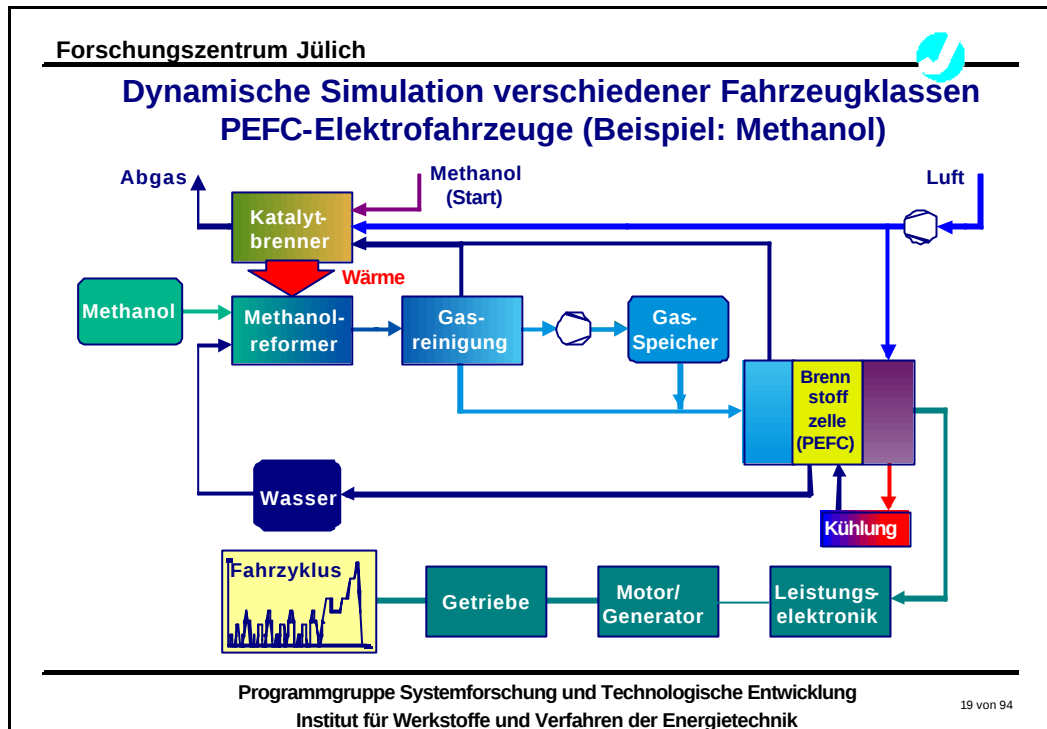
- Verbesserung der dynamischen Eigenschaften der Strombereitstellung
- Möglichkeit der Rückspeisung von Energie bei Bremsvorgängen durch Motor/Generator (Bremsenergie-Rückgewinnung)
- Kaltstartverhalten des Systems nicht berücksichtigt

● Ergebnisse als Mittelwerte aus der Bandbreitendefinition

- Reduzierung des Energiebedarfs in den Fahrzyklen durch Bremsenergie-Rückgewinnung um 16 % bis 24 %
- im Stadtzyklus (ECE) größtes Potential zur Verringerung des Energiebedarfs durch Bremsenergie-Rückgewinnung (häufige Bremsvorgänge)

Folie 17

Die Energiezwischenspeicherung dient in den hier vorgestellten Betrachtungen nur der Verbesserung der Dynamik der Strombereitstellung. Aufgrund des bisher nicht ausreichend geklärten Kaltstartverhaltens von Brennstoffzellen-Systemen mit Brenngaserzeugung kann eine zusätzliche Aufgabe des Energiespeichers in der Bereitstellung von Brenngas für die Brennstoffzelle beziehungsweise von elektrischer Energie für den Elektroantrieb während des Startvorgangs der Brenngaserzeugung bestehen.



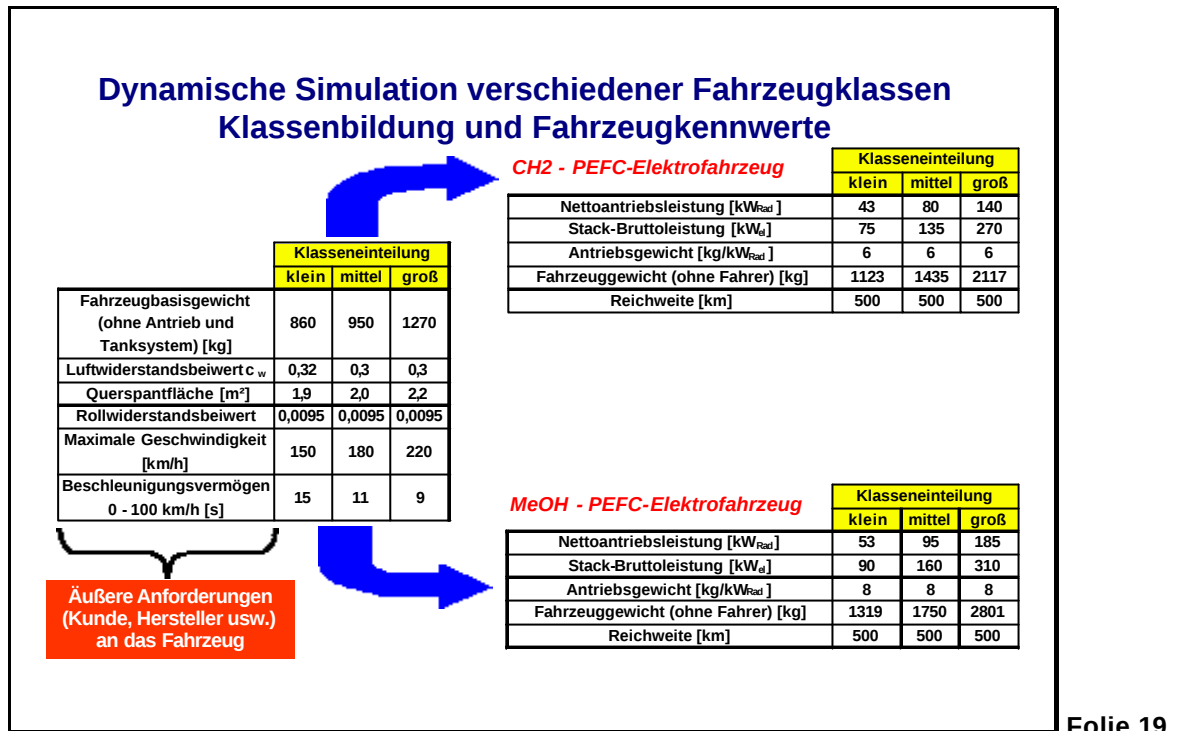
Folie 18

Für die nachfolgende dynamische Simulation von PEFC-Elektrofahrzeugen verschiedener Fahrzeuggrößen wurde das abgebildete Antriebssystem unterstellt. Das Modell des Elektroantriebs (längsdynamisches Fahrzeugmodell, Motor/ Generator, Getriebe) errechnet für jeden Zeitschritt der Simulation den Bedarf an elektrischer Nettoleistung. Diese wird gedeckt durch das Brennstoffzellen-System bzw. den Gas-Zwischenspeicher zur Verbesserung der Dynamik der Strombereitstellung.

Das Brennstoffzellen-System umfasst die Brenngaserzeugung bestehend aus Methanol-Dampfreformer, Katalytbrenner zur Wärmebereitstellung, Edelmetall-Membran zur Gasreinigung sowie einem Gas-Zwischenspeicher zur Dynamikverbesserung und das Brennstoffzellen-Subsystem inklusive der Nebenaggregate. Das Modell der Brenngaserzeugung stützt sich dabei auf weitreichende Erfahrungen des FZJ auf diesem Gebiet und bezieht Kennlinien aus experimentellen Untersuchungen und Übergangsfunktionen ein. Das Betriebsverhalten des Brennstoffzellenstacks wird mittels Kennlinien aus der Literatur abgebildet. Kathodenluftkompressor, Kühlmittelpumpe ebenso wie die Einspritzpumpen für Methanol und Wasser gehen als Nebenaggregate in die Berechnungen ein. Sonstige Nebenverbraucher werden mit einer konstanten Leistungsaufnahme von 400 W berücksichtigt.

Zur Ansteuerung des Gaserzeugungssystems werden in einer für dieses Antriebskonzept entwickelten Betriebsstrategie die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Ladezustand des Speichers verarbeitet.

Das Brennstoffzellenfahrzeug mit komprimiertem Wasserstoff (CH_2) wurde als Spezialfall des Methanolreformer-Fahrzeugs betrachtet und in der Simulation durch die Substitution des Gaserzeugungs- und Reinigungssystems durch ein Druckspeichersystem für Wasserstoff nachgebildet. Kennlinien und Kennfelder der übrigen Komponenten (Brennstoffzelle und Elektromotor) bleiben unverändert. Auf eine explizite Beschreibung dieses Antriebssystems wurde verzichtet.



Folie 19

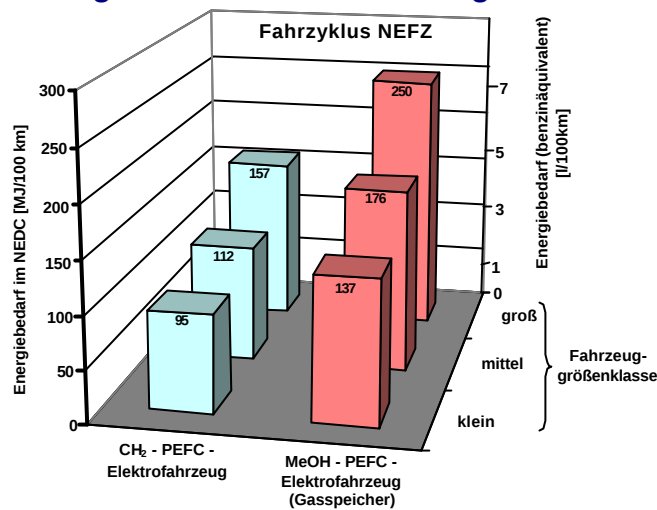
Bei der Einführung von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen in den bestehenden Fahrzeugmarkt müssen sich diese Fahrzeuge dem Wettbewerb mit konventionellen Fahrzeugen stellen. Von der Kundenseite werden Anforderungen gestellt, die aus Ansprüchen an herkömmlichen Verbrennungsmotor-Fahrzeugen abgeleitet werden. Hierbei stellt sich neben der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit auch die Frage des Einsatzzweckes und somit der Fahrzeuggröße und den geforderten Fahrleistungen.

In der vorliegenden Studie wurde die Klassifizierung der Fahrzeuge nach den Fahrleistungskriterien Beschleunigung und Höchstgeschwindigkeit und den äußeren Fahrzeugparametern Basisgewicht (Gewicht ohne Antrieb, Tank und Fahrer), Querschnittsfläche und Luftwiderstandsbeiwert vorgenommen. Dabei erfolgte die Einteilung der Fahrzeuge nach Größenklassen in Anlehnung an die Struktur der Technikdatenbank des IKARUS Teilmodells Verkehr (Instrumente für Klimagasreduktionsstrategien; Auftraggeber: BMBF). Es wurde eine Dreiteilung in eine kleine, mittlere und große Fahrzeugklasse vorgenommen. Die notwendige maximale Leistung des Elektromotors und damit des Brennstoffzellensystems ergibt sich aus dem geforderten maximalen Beschleunigungsvermögen und aus der Höchstgeschwindigkeit. Über ein pro kW_{Rad} konstant angenommenes Leistungsgewicht des Antriebsstrangs (inklusive Tanksystem und/ oder Reformersystem) ergibt sich das gesamte Antriebsstrang- bzw. Fahrzeuggewicht.

Der Austausch von unterschiedlichen Antriebssträngen wird hier in den verschiedenen Fahrzeugklassen nicht durch ein vorab festgelegtes konstantes Mehrgewicht berücksichtigt, vielmehr wird das Fahrzeug-Mehrgewicht aus den gewählten Fahrleistungs- und Fahrzeugkennwerten als Folgegröße errechnet, was wiederum zu deutlich größeren Leistungsdifferenzen zwischen den Fahrzeugklassen führt.



Dynamische Simulation verschiedener Fahrzeugklassen: Energiebedarf in den Fahrzeugklassen



Folie 21

Die längsdynamische Simulationsrechnungen von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen wurden im NEFZ (Neuen Europäischen Fahrzyklus) durchgeführt. Den längsdynamischen Simulationsrechnungen der CH₂ bzw. Methanol-PEFC-Elektrofahrzeuge liegen folgende Annahmen zu den Daten der äußeren Fahrzeugparameter und Antriebstrangenngößen zu Grunde:

Rollwiderstandsbeiwert f_R

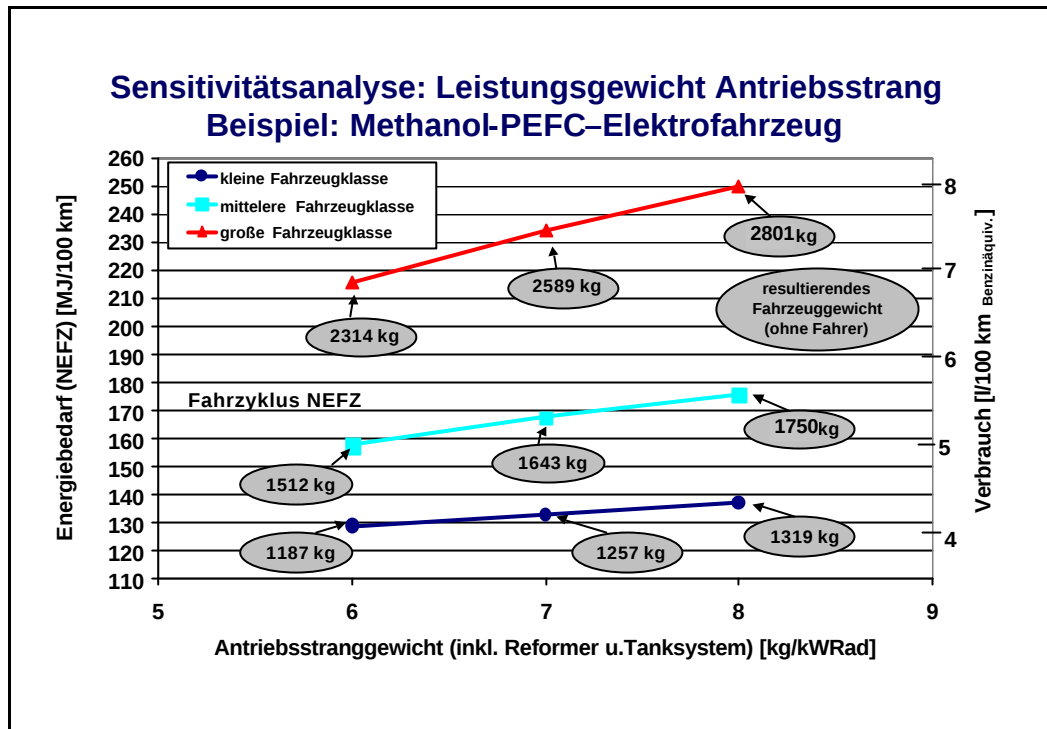
Annahme konstant über alle Fahrzeuggrößen

CH₂-Fahrzeug

Fahrzeugklasse	<u>klein</u>	<u>mittel</u>	<u>groß</u>
Fahrzeuggewicht (o. Fahrer) [kg]	1123	1435	2117
$c_w * A$ [m ²]	0,608	0,6	0,66
Nettoantriebsleist. [kW _{Rad}]	43	80	140
Stack-Bruttolleistung [kW _{el}]	75	135	270

Methanol-Fahrzeug

Fahrzeugklasse	<u>klein</u>	<u>mittel</u>	<u>groß</u>
Fahrzeuggewicht (o. Fahrer) [kg]	1319	1750	2801
$c_w * A$ [m ²]	0,608	0,6	0,66
Nettoantriebsleist. [kW _{Rad}]	53	95	185
Stack-Bruttolleistung [kW _{el}]	90	160	310



Folie 22

Die Grundlage dieser Sensitivitätsrechnung bildet das längsdynamische Simulationsmodell des PEFC-Elektrofahrzeugs mit Methanoldampfpreformierung und Gaszwischen-speicherung. Die notwendige Leistung am Rad und somit auch des Elektromotors, des Brennstoffzellensystems und des Methanolreformers wurden durch Skalierung der Kennfelder so angepasst, dass die geforderten maximalen Beschleunigungen und Höchstgeschwindigkeiten in den einzelnen Fahrzeugklassen erreicht wurden.

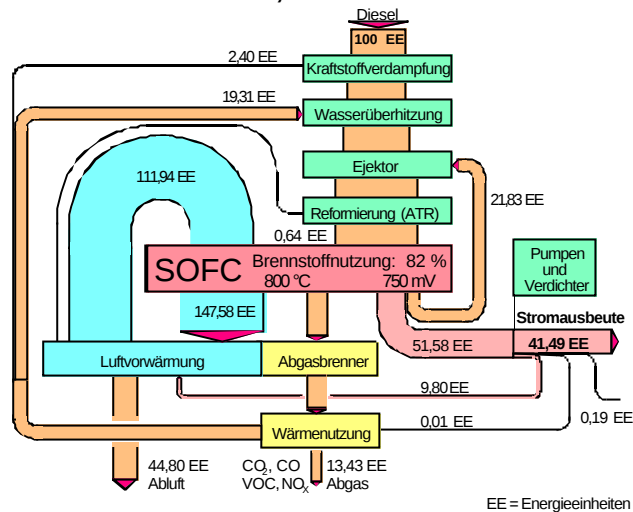
Die alleinige Variation des leistungsspezifischen Antriebstranggewichts zeigt den Einfluss auf das Fahrzeuggewicht und somit auch auf den Energieverbrauch im Fahrzyklus. Durch schrittweise Senkung des Antriebstranggewichts von 8 auf 6 kg/kW_{Rad} in der kleinen bzw. mittleren bzw. großen Fahrzeugklasse kann das Fahrzeuggewicht um -10 % bzw. -14 % bzw. -18 % auf 1187 kg bzw. 1512 kg bzw. 2314 kg gesenkt werden. Die einhergehende Kraftstoffeinsparung im Neuen Europäischen Fahrzyklus beträgt -6 % bzw. -10 % bzw. -14 %.

Für Bilanzierungen der Energieumwandlungsketten wird das Methanol-PEFC-Elektrofahrzeug mit einem Antriebstranggewicht von 8 kg/kW_{Rad} für alle Fahrzeugklassen als Referenz angenommen.



SOFC-System für eine APU (Auxiliary Power Unit)

Kraftstoff: Diesel; beheizter Reformer



Folie 25

Randbedingungen der Modellrechnung sowie wichtige Kenndaten von Teilsystemen:

Zelle: 800 °C; 750 mV; 1050 hPa

Brennstoffnutzung: 82 %

Luftzahl: 6,2

Reformer: 640 °C (adiabat)

Diesel-Referenz: Gemisch C_{12,95}H_{24,38}

Verdichterwirkungsgrad: 0,6

Ablufttemperatur: 280 °C

Abgastemperatur: 65 °C nach Wasserkondensation

Abluft und Abgas können zu Heizzwecken genutzt werden.

Der gezeigte Wirkungsgrad, gilt für ein System mit autothermem Steamreformer (ATR).

Ein System mit BSR (beheiztem Reformer) ist ebenfalls möglich. Dort liegt das Potential jedoch bei 44%. Beides gilt auch für Benzin. ATR scheint leichter handhabbar.



Vergleich: Brennstoffzellen-APU vs. Verbrennungsmotor/ Generator

Wirkungsgradvorteil

BZ-APU

(= Verbrauchsvorteil)



groß



vorhanden

Verbraucher, Einsatzort

in nicht in Fahrt befindlichen Fahrzeugen und als Stromversorger (Notstromaggregat)

für fahrende Fahrzeuge mit hohem Strombedarf für Nebenaggregate (wobei Bedarf durch einen Kurbelwellengenerator nicht mehr gedeckt werden kann)

Folie 26

Beispielrechnungen zum Kraftstoffverbrauch der Stromerzeugung im normalen Fahrbetrieb:

Stromerzeugungsart	Kraftstoffverbrauch der Stromerzeugung [l/kWh _e]
Benzin-VM+Lichtmaschine	0,325
Diesel-VM+Lichtmaschine	0,266
PEFC+ATR (Benzin)	0,303
SOFC+ATR (Benzin)	0,273
PEFC+ATR (Diesel)	0,286
SOFC+ATR (Diesel)	0,244

Beispielrechnungen zum Energieverbrauch stationärer dezentraler Stromerzeugung im kleinen Leistungsbereich (Not-Stromerzeugung):

Stromerzeugungsart	Kraftstoffverbrauch der Stromerzeugung [l/kWh _e]
Benzin-VM+Generator	0,451
Diesel-VM+Generator	0,368
PEFC+ATR (Benzin)	0,303
SOFC+ATR (Benzin)	0,273
PEFC+ATR (Diesel)	0,286
SOFC+ATR (Diesel)	0,244

Es werden ausschließlich fortschrittliche Systeme betrachtet, in den bereits eine Entkopplung von Antriebsmotor und Verbrauchern im Gesamtsystem (des Fahrzeugs) stattgefunden hat. Nebenaggregate werden elektrisch betrieben.

Beim fahrenden Fahrzeug begünstigt der sogenannte Differenzenwirkungsgrad, bei dem die Basisverluste des Motors nicht mehr berücksichtigt werden müssen, den Wirkungsgrad der Stromerzeugung.



Busse und Bahnen (II)

Vorteile BZ- und Elektro-Antrieb vs. Diesel-Antrieb

BZ-Antrieb (H₂) Regelung einfacher optimierbar
keine / geringe lokale Emissionen (Abgas, Lärm)
niedrige Betriebstemperatur
höherer Wirkungsgrad
geringere Vibrationen

Bus-Antrieb mit *fortgeschrittenem elektrischen Antriebsstrang**
(Batterie u. Hybrid)**

Emissionsreduktion
Kraftstoffeinsparung
Synergien bezüglich zunehmender Elektrifizierung
in Fahrzeugen (Komfort, MechaTronik)
Erfahrungen*: 15a, 70 Busse, > 5 Mio. km

*) Proton Motor Fuel Cell GmbH

**) Hybrid: Dieselmotor+Kompakt-Generator / Schwungradspeicher / Supercap / Oberleitung / Batterie / Brennstoffzelle

Folie 28

Literatur (Folie 27 und 28):

*Kroemer, J.; Die PEM-Brennstoffzelle als Schlüsselement für zukünftige Antriebssysteme; IIR
Deutschland GmbH Fachkonferenz Brennstoffzellen-Antrieb;
Frankfurt/Main; 20. November 2000*

*Moritz, M.; Der Einsatz von Brennstoffzellen in Schienenfahrzeugen
EUROFORUM-Konferenz Brennstoffzellen für mobile Anwendungen;
Stuttgart; 20.-21.01.2000*



Kriterien und Anforderungen: Traktion für die Schiene

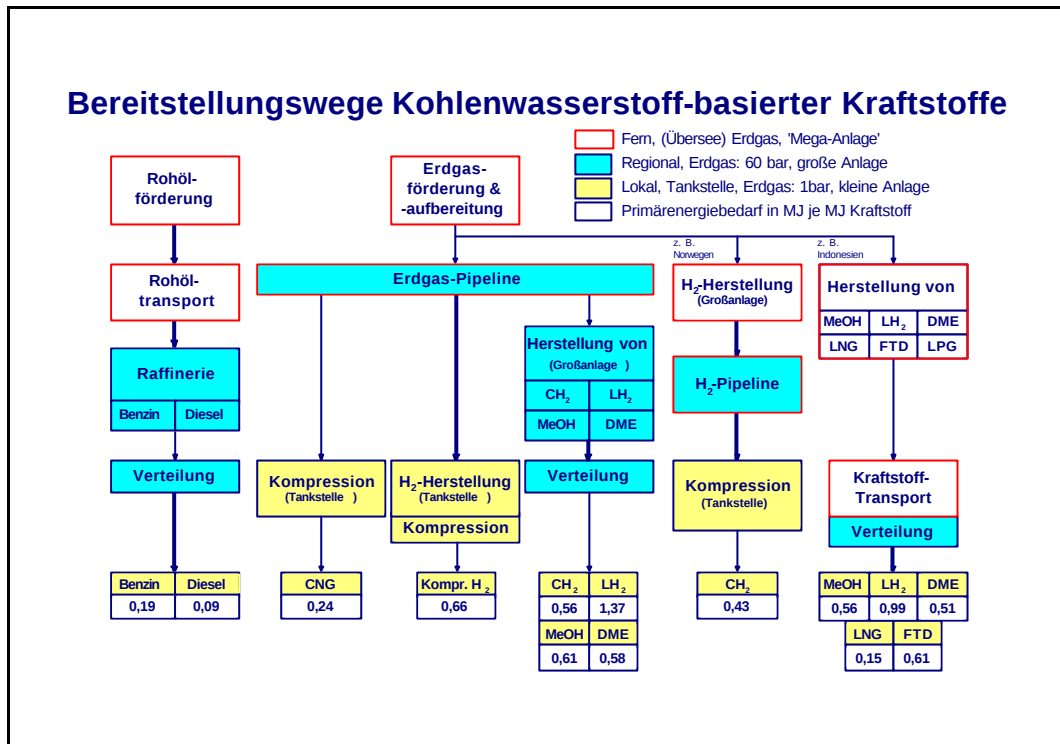
Anlagenleistung:	250 kW _e bis 6 MW _e (250 kW _e -Module)
Kraftstoff:	H ₂ , Methanol, andere flüssige Energieträger
Betriebsart:	Dauerbetrieb mit stark wechselnder Last
Lastfolgeverhalten:	hohe Leistungsänderungsgeschwindigkeit
Jahresnutzungsdauer:	1.000 bis 2.000 h
Stromart:	Gleichstrom
Spannung:	Gleichspannung (450 V bis 2 kV, Zwischenspannungsebenen)

Folie 30

Literatur:

Kroemer, J.; *Die PEM-Brennstoffzelle als Schlüsselement für zukünftige Antriebssysteme*; IIR Deutschland GmbH Fachkonferenz Brennstoffzellen-Antrieb; Frankfurt/Main; 20. November 2000

Moritz, M. *Der Einsatz von Brennstoffzellen in Schienenfahrzeugen*
EUROFORUM-Konferenz Brennstoffzellen für mobile Anwendungen
Stuttgart; 20.-21.01.2000



Folie 34

Kraftstoffbereitstellung vom Bohrloch bis zur Tankstelle (Well to Wheel)

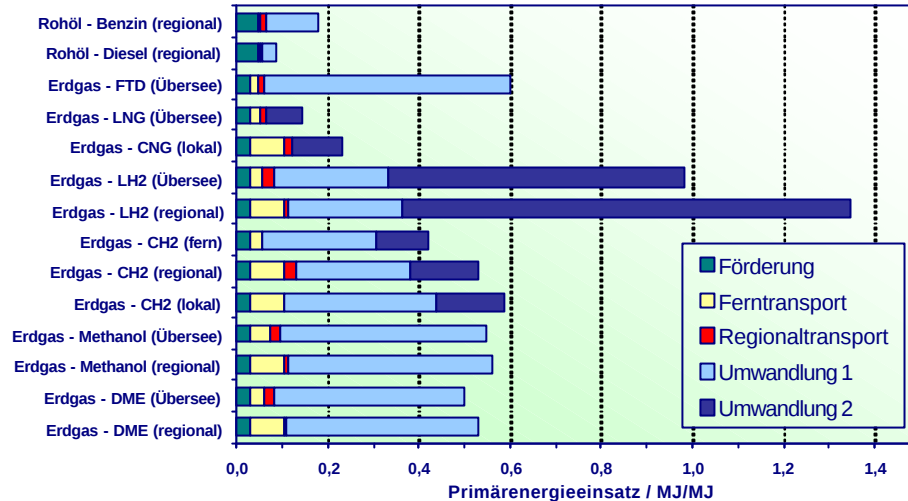
Ausgehend von den Primärenergieträgern Rohöl und Erdgas werden verschiedene Bereitstellungswege für Kraftstoffe entwickelt. Den Endenergieträgern an der Tankstelle wird summarisch der mit dem Kraftstoffketten-Bilanzierungsmodell KRAKE ermittelte Primärenergieaufwand in MJ/MJ zugeordnet.

Insbesondere für Erdgas-basierte Kraftstoffe ergeben sich Möglichkeiten, die Herstellung der Sekundärenergieträger auf verschiedenen „Ebenen“ darzustellen. So kann Druck-Wasserstoff beispielsweise am Erdgas-Bohrloch („fern“), in einer zentralen Großanlage („regional“, z.B. in Deutschland) oder auch an der Tankstelle („lokal“) hergestellt werden. Der Energieträger-Ferntransport kann dementsprechend mittels Erdgas-Pipeline (60 bar) oder Wasserstoff-Pipeline (80 bar) erfolgen. Regional produzierter Druck-Wasserstoff wird mittels Lkw zur Tankstelle transportiert. Der Ferntransport „fern“ erzeugter flüssiger Kraftstoffe (z.B. Methanol, FTD) kann mit Tankschiffen organisiert werden; als Transportmittel für die Verteilung (Überseehafen – Tankstelle) wurde der Lkw unterstellt.

Bei der Bereitstellung von Wasserstoff als Flüssig- oder Druck-Wasserstoff wurde berücksichtigt, dass der zur Kompression/Verflüssigung benötigte Strom in den „globalen“ Varianten mit einem anderen Strombereitstellungswirkungsgrad (Annahme: 50 %) erzeugt werden könnte als „regional“ bzw. „lokal“ in Deutschland hergestellter Druck- oder Flüssig-Wasserstoff (ca. 33 %).



Zusätzlicher Primärenergieeinsatz für die Kohlenwasserstoff-basierte Bereitstellung von 1 MJ Kraftstoffenergieinhalt (I)



Folie 35

Entsprechend der Abbildung „Bereitstellungswege Kohlenwasserstoff-basierter Kraftstoffe“ wird grafisch dargestellt, welche Anteile die einzelnen Bereiche der Kraftstoffbereitstellung am zusätzlichen Primärenergieaufwand haben.

Unterschieden wird dabei nach:

Förderung	Energieaufwand zur Erschließung, Förderung und Aufbereitung der Primärenergieträger an der Quelle
Ferntransport	Energieaufwand für den Ferntransport der Primär- bzw. Sekundärenergieträger mit Pipeline oder Tankschiff
Regionaltransport	Regionale Verteilung der Primär- bzw. Sekundärenergieträger mit Pipeline oder Lkw
Umwandlung 1	Herstellung des Sekundärenergieträgers
Umwandlung 2	Konditionierung des Sekundärenergieträgers (Kompression bzw. Verflüssigung)

Die Kategorien „fern“, „regional“ und „lokal“ bezeichnen den Ort der Sekundärenergieträgerherstellung:

„fern“	am Bohrloch
„regional“	zentrale Großanlagen z.B. in Deutschland
„lokal“	kleine, dezentrale Anlagen an der Tankstelle



Zusätzlicher Primärenergieeinsatz für die Kohlenwasserstoff-basierte Bereitstellung von 1 MJ Kraftstoffenergieinhalt (II)

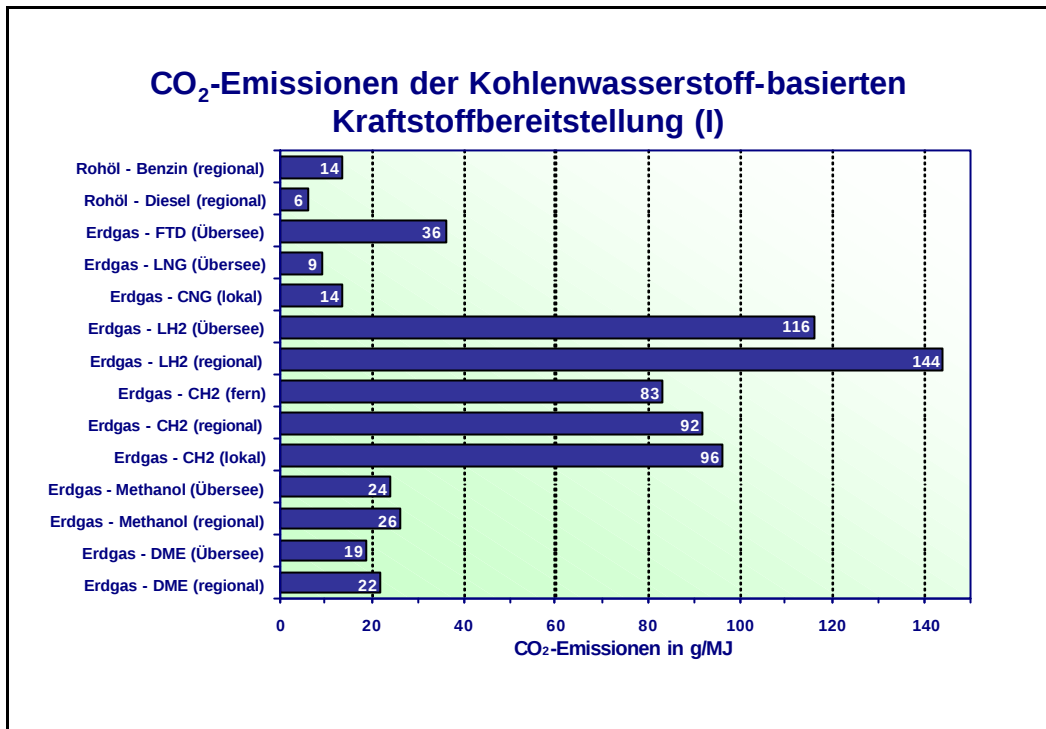
- **Niedrigster Primärenergieeinsatz für die Bereitstellungspfade Benzin und Diesel ($0,1 - 0,2 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$)**
- **Primärenergiebedarf der CNG- bzw. LNG-Bereitstellungskette auf niedrigem Niveau**
- **Primärenergieeinsatz zur Bereitstellung von Methanol, DME und FT-Diesel im gleichen Bereich ($0,5 - 0,6 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$)**
- **Bereitstellung von flüssigem Wasserstoff (LH_2) mit hohem Bedarf an Primärenergie ($1,0 - 1,4 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$)**
- **Bedarf an fossiler Primärenergieträger für die Bereitstellung von Biodiesel heute etwa $0,35-0,4 \text{ MJ}_{\text{Prim.}} / \text{MJ}_{\text{Kraftst.}}$ [NITSCH 2000]**

Folie 36

Die Aussage zur Bereitstellung von Biodiesel entstammt nicht den Kenntnissen der vorliegenden Studie, sondern der Literatur.

Literatur:

[NITSCH 2000] NITSCH, J.; *Alternative Fahrzeugantriebe – gestern, heute, morgen;*
IIR Deutschland GmbH Fachkonferenz Brennstoffzellen-Antrieb;
Frankfurt/Main; 20. November 2000

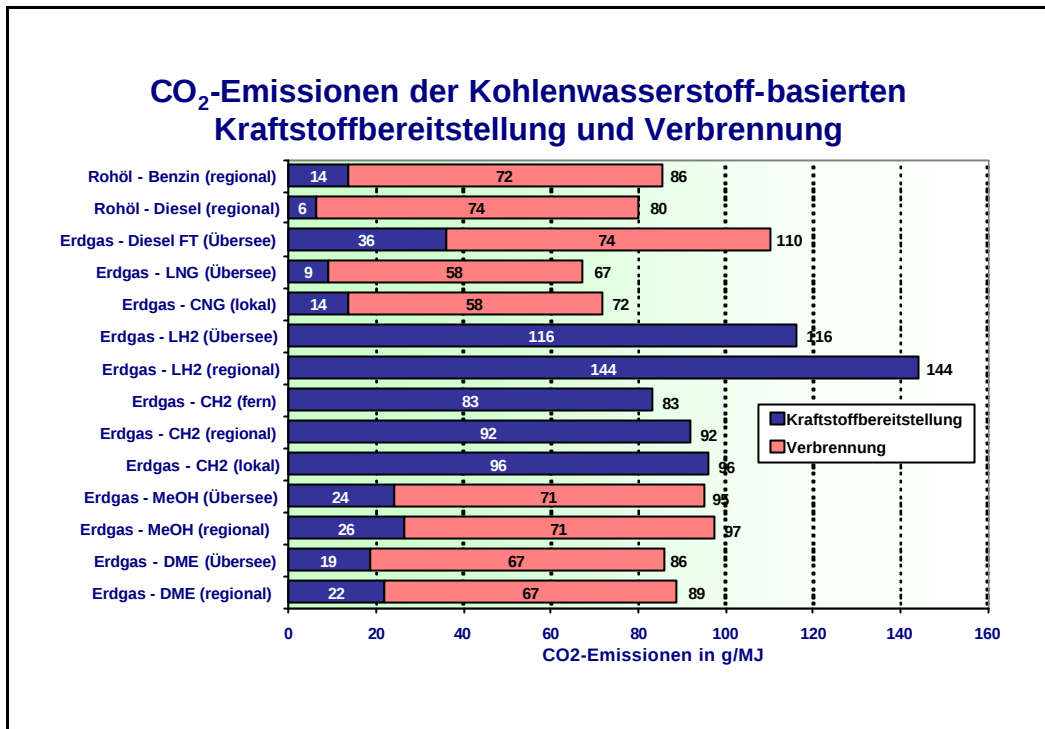


Folie 37

Entsprechend der Folie 31 „Bereitstellungswege Kohlenwasserstoff-basierter Kraftstoffe“ werden Werte für die CO₂-Emissionen grafisch dargestellt. Die Kategorien „fern“, „regional“ und „lokal“ richten sich nach dem Ort der Sekundärenergieträgerherstellung:

- „fern“ am Bohrloch
- „regional“ zentrale Großanlagen z.B. in Deutschland
- „lokal“ kleine, dezentrale Anlagen an der Tankstelle

Bei der Nutzung von Flüssig- oder Druck-Wasserstoff im Fahrzeug fallen im Unterschied zu kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen keine weiteren CO₂-Emissionen an.



Folie 38

Entsprechend der Folie 31 „Bereitstellungswege Kohlenwasserstoff-basierter Kraftstoffe“ werden Werte für die CO₂-Emissionen der Kraftstoffbereitstellung und der Verbrennung grafisch dargestellt. Die Kategorien „fern“, „regional“ und „lokal“ richten sich nach dem Ort der Sekundärenergieträgerherstellung:

- „fern“ am Bohrloch
- „regional“ zentrale Großanlagen z.B. in Deutschland
- „lokal“ kleine, dezentrale Anlagen an der Tankstelle

Für die Verbrennung der Kraftstoffe im Fahrzeug wurde eine vollständige stöchiometrische Umwandlung unterstellt. Im Unterschied zu den kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen fallen beim Wasserstoff keine weiteren CO₂-Emissionen bei der Umwandlung im Fahrzeug an.



CO₂-Emissionen Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung (II)

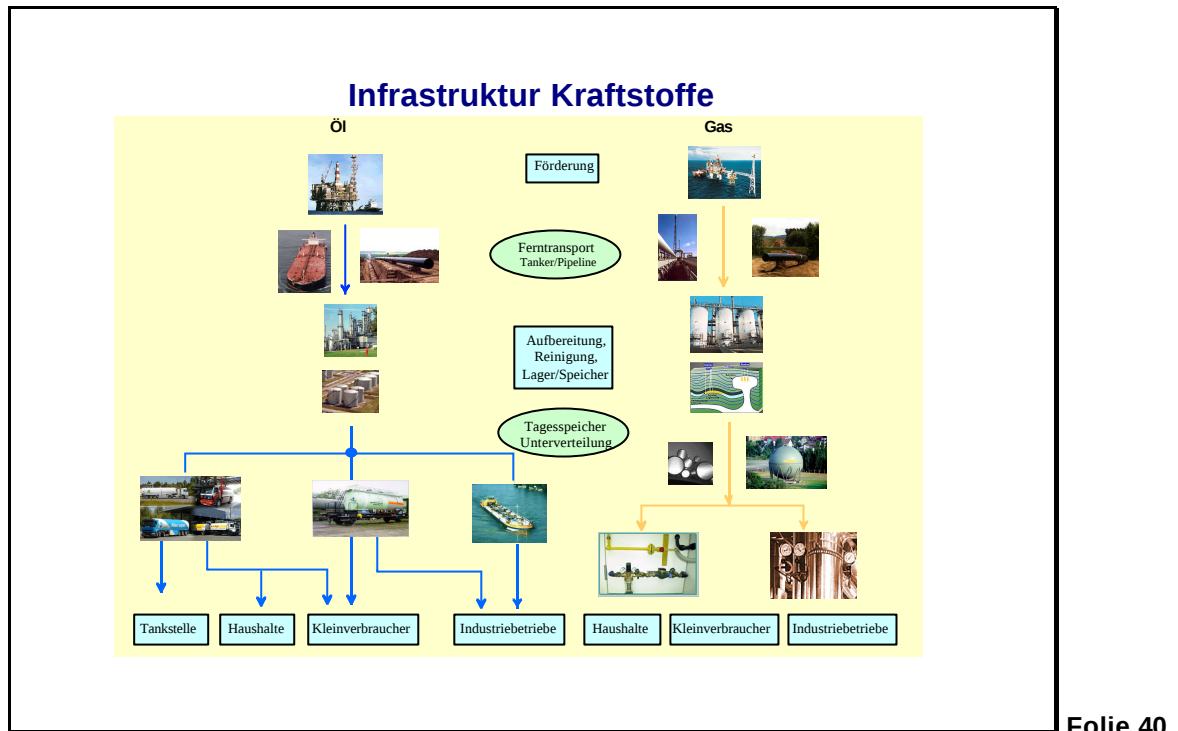
- Vollständige Bilanzierung der Emissionen konkurrierender Kraftstoffpfade nur über die gesamte Energieumwandlungskette (inklusive Nutzungsphase) möglich
- CO₂-Emissionen niedrig für Bereitstellung von Methanol und FT-Diesel (24 – 36 g_{CO₂} / MJ_{Kraftst.})
- Hohe CO₂-Emissionen für die Kohlewasserstoff-basierte H₂-Bereitstellung (83 – 144 g_{CO₂} / MJ_{Kraftst.}); Fahrzeugbetrieb frei von CO₂
- Bereitstellung von Biodiesel und Ethanol heute etwa 50 g_{CO₂}/MJ_{Kraftst.} (Nutzung im Fahrzeug CO₂-neutral) [NITSCH 2000]

Folie 39

Die Aussage zur Bereitstellung von Biodiesel entstammt nicht den Kenntnissen der vorliegenden Studie, sondern der Literatur.

Literatur:

[NITSCH 2000] NITSCH, J.; *Alternative Fahrzeugantriebe – gestern, heute, morgen;*
IIR Deutschland GmbH Fachkonferenz Brennstoffzellen-Antrieb;
Frankfurt/Main; 20. November 2000



Zu einem überwiegenden Anteil werden Rohöl und Erdgas nicht in der Nähe von Verarbeitungs- oder Verbrauchszentren gefördert, so dass sie i.d.R. über sehr weite Entfernungen transportiert werden müssen. Die Größenordnung der zu transportierenden Mengen (der Jahresverbrauch von Rohöl liegt bei etwa 3462 Millionen Tonnen, der von Erdgas bei etwa 222 Billionen Kubikmetern) wie auch die Produkteigenschaften schränken die Vielfalt der Transportmittel deutlich ein. Für den Punkt-zu-Punkt-Ferntransport von Rohöl werden Pipeline sowie Tankschiffe und für den Transport von Erdgas üblicherweise nur Fernleitungen genutzt. Beim Rohöl bedeutet "Punkt-zu-Punkt" die Verbindung zwischen Fördergebiet und Raffinerie, während beim Erdgas Regional- oder Ortsgasversorgungsunternehmen als Abnehmer zu sehen sind.

Die Unterverteilung der Energieträger ist davon geprägt, dass z.T. geringe Produktmengen über eine große Fläche verteilt werden, wobei die Nachfrage auch diskontinuierlich erfolgt, weshalb Speichersysteme üblich sind. Flüssige Mineralölprodukte werden entsprechend dem Vorhandensein verfügbarer Verkehrswege bei größeren Mengen, etwa zur Belieferung von Großtanklagern und Großverbrauchern, mit Binnentankschiffen oder Eisenbahnkesselwagen (selten mit Produktenpipeline) und bei geringeren Mengen, wie für Tankstellen, mit Tanklastkraftwagen verteilt.

Für Erdgas gilt das nicht, es wird üblicherweise bis zum Endverbraucher über ein Leitungssystem geliefert, das in der Unterverteilung allerdings in deutlich geringeren Leitungsquerschnitten ausgeführt und auf einem niedrigeren Druckniveau betrieben wird.

{Ferngasleitungen: Leitungsquerschnitt bis zu 1400 mm, Betriebsdruck bis 100 bar.

Gasverteilungsleitungen: Leitungsquerschnitte von bis zu 1200 mm bei Hochdruckleitungen (> 1 bar), von 50 bis 150 mm bei Mitteldruckleitungen (1 bar bis 100 mbar), von 80 bis 300 mm bei Niederdruckleitungen (bis 100 mbar), Hausanschlussleitungen Durchmesser 30 bis 65 mm (20 mbar)}



Infrastruktur Mineralöltransport

Lagerung, Verteilung und Transport

Raffinerie- und Tanklagerstandorte innerhalb der bestehenden Verkehrsnetze (ohne Straßennetz)



Quelle: Mineralwirtschaftsverband, „Mineralöl-Logistik“, April 1999

Folie 41

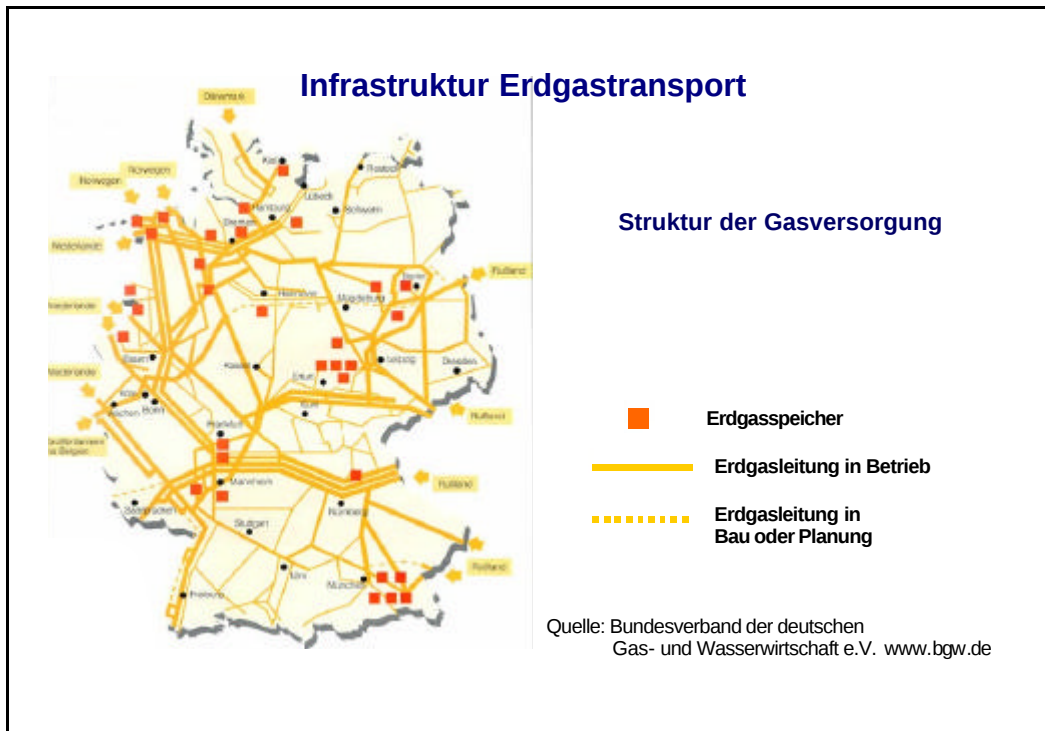
Wichtige Elemente der in die Fläche gehenden Mineralölinfrastruktur sind Großtanklager, Verkehrswege und Transportsysteme.

Die Belieferung der raffinierfernen Lager erfolgt wegen der großen Mengen entsprechend den verfügbaren Verkehrswegen mit Eisenbahnkesselwagen-Ganzzügen oder mit Binnen-Tankschiffen, selten per Produktenpipeline.

Für die Versorgung des flächendeckenden Tankstellennetzes eignen sich besonders Straßentankwagen, die zum einen sehr flexibel und zum anderen auch bei Liefermengen von 30 Tonnen und weniger wirtschaftlich einsetzbar sind.

Die mittlere Transportentfernung liegt für Tanklastzüge im Nahbereich bei 40 – 60 Kilometern und im Fernbereich bei 150 – 180 Kilometern.

Zur Belieferung der Tankstellen sind bundesweit täglich etwa 1.500 LKW im Einsatz.



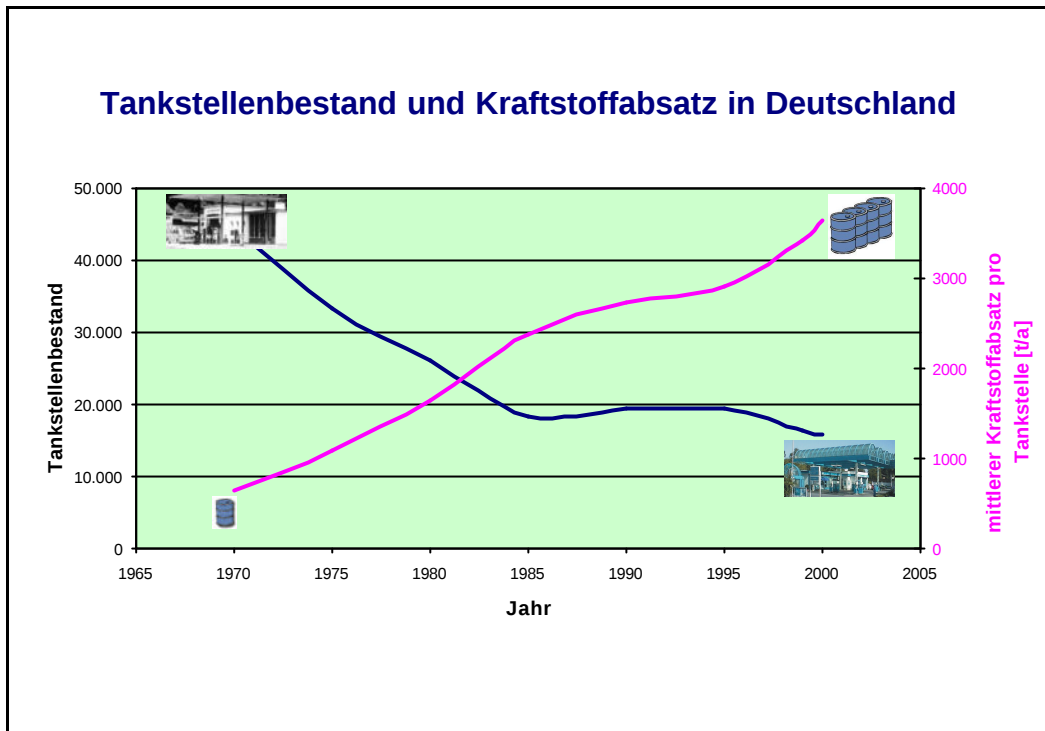
Folie 42

Die Gasversorgungsnetz der Bundesrepublik Deutschland besteht aus einem Netzwerk von Ferngasleitungen, Speichern und Regional- bzw. Ortsgasnetzen, über die der Gasimport sowie die Gasverteilung an die regionalen Versorger erfolgt. Sie beliefern die Endkunden.

Erschöpfte Gaslagerstätten sowie Kavernen dienen als Saisonspeicher, um jahreszeitliche Schwankungen des Gasverbrauchs ausgleichen zu können. Örtliche Gasversorger nutzen üblicherweise oberirdische Speicher (Kugelspeicher oder Gasometer) als Puffer.

Das bundesdeutsche Gasnetz hat inklusive der Niederdruckleitungen, über die mehrheitlich die Haushalte versorgt werden, eine Gesamtlänge von etwa 360.000 km.

Ferntransportleitungen werden auf einem Druckniveau von bis zu 100 bar betrieben, zum Verteilungsnetz gehörende Hochdruckleitungen bei Betriebsdrücken von mehr als 1 bar, Mitteldruckleitungen zwischen 100 mbar und 1 bar und Leitungen des Niederdrucknetzes bei maximal 100 mbar.



Folie 43

Der Bestandsrückgang bei den bundesdeutschen Tankstellen wurde zu Beginn der 70er Jahre durch die Umwandlung der früher üblichen Bedienungs- in Selbstbedienungstankstellen eingeleitet. Im Zuge der Neuorientierung wurden unrentable wie auch nicht erweiterbare Stationen stillgelegt. Als wichtiger Grund für diese Entscheidungen der Tankstellengesellschaften, der bei steigenden Fahrzeugzulassungszahlen und damit bei einem potentiellen Kundenzuwachs, zunächst nicht zu erwarten war, galt das Bemühen um bzw. der Zwang zur Reduktion von Kosten. Der Rückgang der Tankstellenzahlen einerseits und die Zunahme von Fahrzeugen andererseits führte zu einer Zunahme des mittleren Kraftstoffabsatzes pro Tankstelle.

Das Schließen von nicht vergrößerbaren Tankstellen spiegelt heute die veränderte Marktkonzeption der Mineralölgesellschaften wieder. Der Bau von bzw. der Ausbau zu größeren Stationen ermöglicht eine wirtschaftlichere Nutzung der Investitionen. Ziel ist es, mehrere tausend Kundenkontakte pro Tag zu erreichen, was nur bei einer Ausweitung des Geschäftsfeldes über den Verkauf von Kraftstoff hinaus gelingen kann. Die Betreibergesellschaften sehen die Möglichkeit und in Anbetracht gesellschaftlicher Gewohnheitsveränderungen die Notwendigkeit, ihr artnahes Dienstleistungsangebot um eigentlich für sie untypische aber nachgefragte Dienstleistungen zu ergänzen. Darunter sind der Verkauf von Verbrauchsgütern des täglichen Lebens zu verstehen, wie Zeitungen, Zeitschriften, Tabakwaren, Getränke, Süßwaren, Lebensmittelkonserven, Fertiggerichte, Brötchen, Molkereiprodukte, bis hin zu Kommunikationsgeräten, Freizeitartikeln u.a. mehr. Bemerkenswert ist, dass inzwischen mit diesen artfremden Leistungen ein erheblicher Anteil am Gesamtumsatz erwirtschaftet wird, der in Einzelfällen bereits bis zu 70 % ausmacht.

Im Jahr 1999 lag der Endenergieverbrauch des Straßenverkehrs bei ca. 30 Mio. t Vergaserkraftstoff und ca. 26 Mio. t Dieselmotorkraftstoff (Verkehr in Zahlen, 2000).



Kostensituation für neue Kraftstoffe (ohne Steuer)	
Energieträger heute (D)	Energiepreis in US\$/GJ (1 US\$/GJ $\approx$ 0,7 Pfg/kWh bei Kurs 2 DM/US\$)
Erdgas Grenzübergang (1-10/2000)	2,7 (10/2000: 3,4) [BAW]
Rohöl Grenzübergang (1-11/2000)	5,2 (11/2000: 6,5) [BAW]
Super-Benzin FOB (1/2001)	6 (6 für USA Tankstelle; 5 für Diesel)
RME	26 (inkl. Stilllegungsprämie) [DREIER 2000]
Import Steinkohle	1,1 - 1,4
Methanol Herstellung 2000	5 - 7 (Erdgas: 1,5-2,5 bei 2000t/d)
Methanol FOB 1/2001	12 (2000: 7; 1999: 5)
Auswahl: Energieträger bis 2010	Energiepreis in US\$/GJ (1 US\$/GJ $\approx$ 0,7 Pfg/kWh bei Kurs 2 DM/US\$)
Methanol LURGI: Herstellung, 10kt/d	4 (Remote Erdgas: 4) [LURGI 2000]
Methanol	10 (Basis Biomasse: 0,6) [CFR 2000]
Komprimierter H₂ (an Tankstelle)	17 (4 für Erdgas)
H₂ via Elektrolyse an Tankstelle	25 (bei 9 Pfg/kWh _{el} = \$12,5/GJ) [PU]

Folie 45

FOB = Free On Board

Die Tabelle zeigt im oberen Teil Energiepreise aus der Literatur in Deutschland für 2000. Dabei ist zu beachten, dass es beim Rohöl in diesem Jahr erhebliche Preisvariationen aufgrund schwankender Wechselkurse und Barreelpreise gegeben hat. Die Bandbreite für die Tonne Rohöl lag in DM/t zwischen ca. 370 und 560 DM/t. Der Preis für RME berücksichtigt die Zahlung von Prämien der EU für Stilllegungsflächen, die beim Anbau von Raps weiterhin gezahlt werden und somit die Kosten reduzieren.

Der untere Tabellenteil zeigt Angaben aus der Literatur zu erwarteten Kosten für neue Kraftstoffe bis 2010. Auch diese Kosten sind stark abhängig von den zukünftigen Rohölpreisen. Die Annahme von 0,6 \$/GJ für Biomasse ist als sehr optimistisch einzustufen.

Literatur:

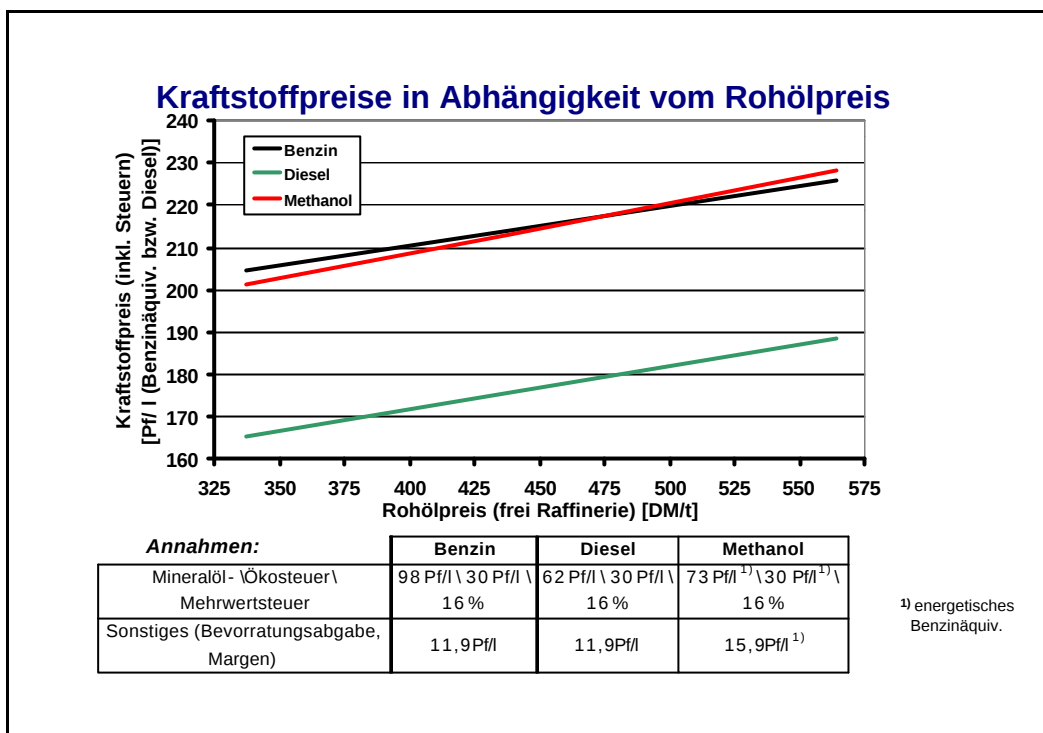
[BAW] Bundesamt für Wirtschaft; Pressemitteilung 19.12.2000

[CFR 2000] Clean Fuel Report; 2000

[DREIER 2000], Dreier, Th.; Ganzheitliche Systemanalyse und Potenzialanalyse biogener Kraftstoffe; Dissertation; TU München; Ife Schriftenreihe Heft 42; E&M Verlag; Herrsching; 2000

[LURGI 2000], Streb, S. and Göhna, H.; Mega-Methanol – paving the way for new downstream industries; Millennium Seminar Catalysis & Technology; Lisboa; Portugal; May 10-12, 2000

[PU] OGDEN, J.; A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development; Journal of Power Sources, Vol 79; S. 143-168; 1999



Folie 46

Im Bild wurde für einen möglichen Einführungszeitraum 2005 bis 2010 der Benzin- und Dieselpreis frei Tankstelle parametrisiert.

Als denkbarer Bereich für den Rohölpreis frei Raffinerie wurden 24 bis 34 \$/bbl plus 0,6 \$/bbl für die Anlieferung unterstellt. Der Wechselkurs wurde zwischen 1,85 und 2,20 DM/\$ gespreizt. In Anlehnung an die IKARUS-Daten wurden die Herstellungskosten für Mitteldestillat und Benzin (Normal) sowie für Methanol aus Erdgas ermittelt (Anlagenauslastung 7500 h/a, Abschreibung 10a bei 7,5%/a Zins). Dabei wurde für die Erdgaskosten frei Methanolanlage angenommen, dass sich diese (zuzüglich der Erdgastransportkosten) am Heizölpreis anlegen.

Unter Einrechnung der Mineralölsteuer - 0,98 DM/l für Benzin bzw. 0,62 DM/l Heizöl-, der Mineralölbevorratungsabgabe von 0,09 DM/l, der zukünftigen Ökosteuer von 0,30 DM/l und einer Marge von 0,11 DM/l für Produkttransport, Tankstellen-/Pächterkosten und Gewinn ergeben sich die dargestellten Benzin- und Dieselpreise inklusive 16% Mehrwertsteuer. Aus den o.g. Anlegbarkeitsüberlegungen ergibt sich ein Erdgaspreis in der analogen Bandbreite von 2,17 bis 3,79 Pf/kWh. Hieraus errechnet sich ein zum Benzinpreis in etwa gleicher Preis pro Liter Benzinäquivalent, wenn man unterstellt, dass bei Methanol die Mineralölbevorratungsabgabe entfällt, jedoch - wegen der größeren Volumenströme und Tankertüchtigungen - eine um 0,04 DM höhere Marge erforderlich ist und ein eigener Mineralölsteuersatz zwischen Diesel und Benzin mit ca. 0,73 DM/l Benzinäquivalent eingeführt wird. (Da neben Benzin- auch Dieselfahrzeuge substituiert werden, ergibt sich ein geringerer Steuerausfall als bei reiner Benzinsubstitution).

Für die Anlegbarkeitsüberlegungen zu tragbaren Aufpreisen von Brennstoffzellen-Pkw wurde angenommen, dass sich jenseits 2005 der Benzinpreis eher am oberen Ende der Kurve bei ca. 2,30 DM/l einstellen wird, insbesondere wenn man noch zukünftige Zuschläge für die Kraftstoffentschwefelung unterstellt und vorwiegend vom Einsatz von Super- bzw. Superplus-Benzin ausgeht.



Verfügbarkeit Biokraftstoffe (I)

landwirtschaftliche Stilllegungsflächen (Prämien!) in der EU

Überproduktion an Nahrungsmitteln in der EU
Druck auf die Erzeugerpreise

Substitutionspotenzial für Kraftstoffe des Straßenverkehrs bei Nutzung von 30 % der gesamten Ackerfläche in Deutschland (Fruchtfolge eingehalten):

- 3 % für Ethanol aus Zuckerrüben oder
- 6 % für Methanol aus Holz oder
- 2 % für RME aus Raps (Dieselersatz)

Bewertungskriterien für Biokraftstoffe

spezifischer Flächenbedarf und Energiebedarf beim Anbau von Biomasse

Quelle: KOSSMEHL 1995 - Dissertation TU Berlin

Folie 47

Nach [MOHR 2000] deckt Holz derzeit in Deutschland etwa 1,4 % des Bedarfs an Primärenergie. Rechnet man das energetisch (aber nicht ökonomisch) nutzbare Restholz der Forstwirtschaft hinzu, so kommt man auf 2 %. Die meisten Fachleute gehen derzeit davon aus, dass max. 4 % der globalen Nettoprimärproduktion (NPP) nachhaltig als Substitut für fossile Energieträger in Frage kommt. Dieser Wert entspricht den 6 % Primärenergieanteil, der 1993 unter nachhaltigen Rahmenbedingungen für die energetisch nutzbare Biomasse (einschließlich landwirtschaftlich erzeugten Nutzpflanzen) in Deutschland berechnet wurde.

In der Landwirtschaft der EU gibt es seit Jahren eine Überproduktion an Nahrungsmitteln. Diese Überschüsse drücken die Erzeugerpreise. Im Jahre 1992 wurden durch die Agrarreform 15 % und seit 1995/1996 10 % der landwirtschaftlichen Flächen stillgelegt, für die Stilllegungsprämien gezahlt werden. Auf Stilllegungsflächen dürfen keine Nahrungsmittel angebaut werden wohl aber nachwachsende Rohstoffe für Biokraftstoffe.

Energiebedarf und spezifischer Flächenbedarf beim Anbau von Biomassen sind zwei wesentliche Kriterien zur Bewertung von Biokraftstoffen. Nimmt man nach einer Maximalprognose 30 % der gesamten Ackerfläche in Deutschland und baut auf allen geeigneten Standorten dieser Ackerfläche Zuckerrüben in üblichen Fruchtfolgen an, um daraus Ethanol herzustellen, so ließe sich ein Substitutionspotential von etwa 3 % bzgl. aller Kraftstoffe für den Straßenverkehr erzielen oder etwa 4 % bei Methanol aus Holz oder etwa 2 % bei RME als Dieselersatz aus Raps [KOSSMEHL 1995].

Literatur:

[Mohr 2000] VDI-Nachrichten 18.8.2000

[KOSSMEHL 1995] Kossmehl, S.; Beurteilung der technischen, ökologischen und ökonomischen Bedingungen für den Einsatz von Biokraftstoffen in Fahrzeugen; Dissertation; TU Berlin; 1995



Verfügbarkeit Biokraftstoffe (II)

Nach DREIER (IfE Schriftenreihe Heft 42, TU München, 2000) lässt sich als technisches Potenzial das Zweifache des heutigen Weltprimärenergiebedarfs durch Biomasse decken:

Primärenergiebedarf: 355 EJ/a (Europa: 108 EJ/a)
davon 19 EJ/a traditionelle Brennstoffe
auf Basis Biomasse = etwa 5 %

Primäre Biomasse ¹: 623 EJ/a Energiepflanzen
83 EJ/a nachhaltige Forstwirtschaft

Sekundäre Biomasse ²: 21 EJ/a Restholz
16 EJ/a Ernterückstände
8 EJ/a Biogas

Bei der Realisierung des technischen Potentials müssten 2,2 Mrd. Hektar in landwirtschaftliche Fläche für den Energiepflanzenanbau umgewandelt werden; die globale Ackerfläche beträgt heute 1,4 Mrd. Hektar.

¹Europa: 50 EJ/a, ²Europa: 7 EJ/a

Folie 48

Literatur:

[DREIER 2000], Dreier, Th.; Ganzheitliche Systemanalyse und Potenzialanalyse biogener Kraftstoffe; Disseration; TU München; Ife Schriftenreihe Heft 42; E&M Verlag; Herrsching; 2000



Sicherheitstechnische Daten der Kraftstoffe

	Benzin	Diesel	Methanol	Methan	Wasserstoff
Dichteverhältnis zu Luft	3,2 - 4	7	1,1	0,55	0,07
Zündtemperatur (°C)	220	220	455	595	560
Zündgrenzen (Vol% in Luft)	0,6 - 8	0,6 - 6,5	16 - 44	5 - 15	4 - 76
Min. Zündenergie (mJ)	0,24	0,3	0,14	0,28	0,02
Diffusionskoeff. (cm ² /s)	0,05		0,12	0,16	0,61
Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit (m/s)	0,4	-	0,48	0,43	2,7
Flammpunkt (°C)	-20	55	11	-	-

	Benzin	Methanol	Wasserstoff
Gesundheitsgefahren	Kann Krebs erzeugen; Verschlucken kann Lungenschäden verursachen	Reizwirkung auf Augen, Haut und Atemwege; Verschlucken kann Blindheit, Tod hervorrufen	Inhalation kann Atembeschwerden und Bewußtlosigkeit hervorrufen
Umweltgefahren	Stark wassergefährdend (WGK 3)	Schwach wassergefährdend (WGK 1); biologisch abbaubar	-
Toxizität: Gewässer- verunreinigung ab mg/l	40	17000	-
MAK (ppm)	C ₆ H ₁₄ : 50	200	nicht festgelegt

Folie 49

Es gibt keine sicherheitstechnischen und gesundheitsgefährlichen Aspekte, die zum generellen Ausschluss der hier genannten Kraftstoffe führen. Die Gefährdungspotenziale einer Einführung von Methanol oder Wasserstoff in die bestehende Kraftstoffinfrastruktur sind anders aber nicht unbedingt höher im Vergleich zu Benzin und Diesel einzuschätzen. Dies erschwert jedoch die Zulassung der betrachteten neuen Kraftstoffe.

WGK = Wassergefährdungsklasse

WGK, aufgrund von biologischen Testverfahren und sonstiger Eigenschaften wird das Potential von Stoffen und Zubereitungen, die Eigenschaften des Wassers nachteilig zu verändern, in einem Klassifizierungsschema bewertet. Die Wassergefährdung ist in drei Klassen eingeteilt:

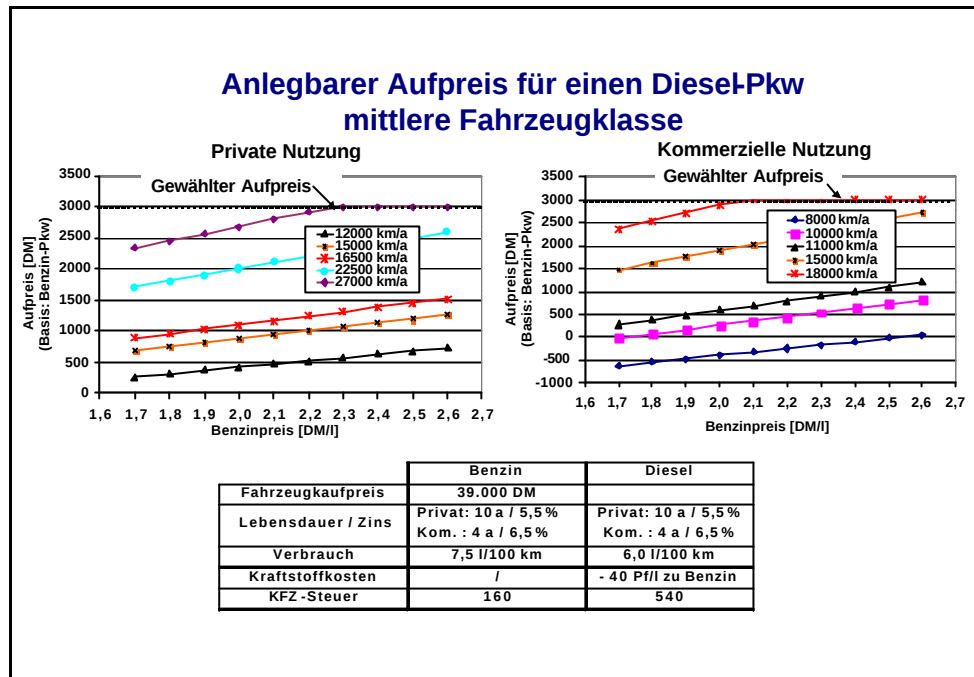
WGK 1 = schwach wassergefährdend

WGK 2 = wassergefährdend

WGK 3 = stark Wassergefährdend

MAK = Maximale Arbeitsplatz-Konzentration

Der MAK-Wert (Messzahl in ppm (parts per million)) ist die Konzentration, welche die Höchstkonzentration von Gasen, Dämpfen und Schwebstoffen am Arbeitsplatz angibt, bei der die Gesundheit der Beschäftigten in einer bestimmten Zeiteinheit (in der Regel 8 Stunden) nicht beeinträchtigt wird (Arbeitsschutz).



Folie 52

Die anlegbare Preisdifferenz zu einem konkurrierenden Fahrzeug A wird berechnet mit der Annahme, dass der aufgrund des Aufpreises erhöhte jährliche Kapitaldienst und eine eventuelle Steuerdifferenz in der Kfz-Steuer durch die jährliche Einsparung bei den Kraftstoffkosten aufgefangen werden. Es gilt:

$$Pa = ((V_A * K_A - V_N * K_N) * J/100 + F_A - F_N) / a_n$$

- Mit:
- Pa anlegbare Preisdifferenz
 - V_A Verbrauch (l/100km Benzinäquivalent) des Konkurrenz-Kfz
 - V_N Verbrauch des Ersatzfahrzeugs
 - K_A, K_N Preis des Kraftstoffs (DM/l) für das Konkurrenz-/Ersatz-Kfz
 - J Jahresfahrleistung (km/a)
 - F_A, F_N kapitalunabh. fixe Kosten (DM/a) des Konkurrenz-Ersatz Kfz
 - a_n Annuität (1/a): $a_n = (1 - (1 + z/100)^{-1}) / (1 - (1 + z/100)^{-T})$
mit z : Kapitalzins, T : Abschreibungszeit in Jahren

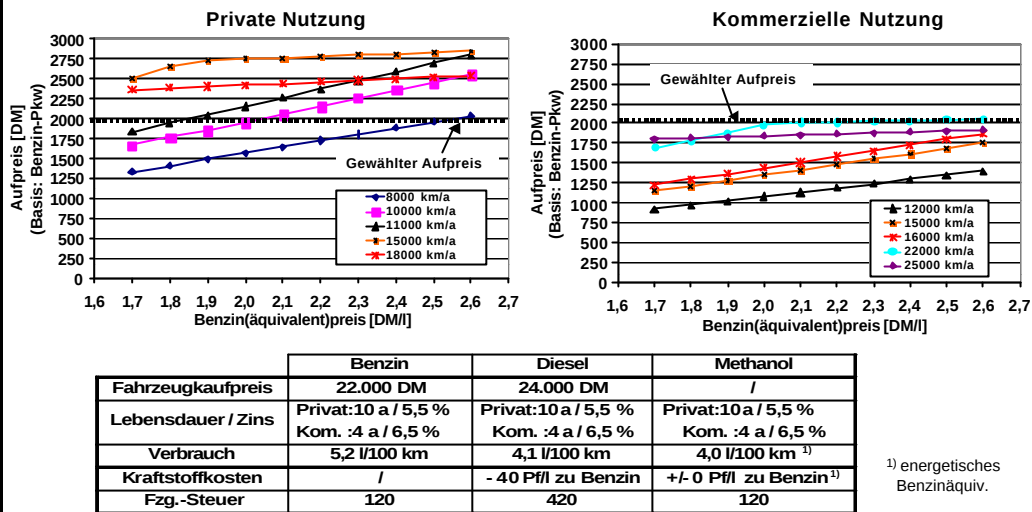
Den unterschiedlichen Betrachtungen seien folgende Annahmen gemeinsam:

Der Preis pro Liter Diesel liegt 0,40 DM unter dem Benzinpreis. Der Preis pro Liter Benzin-äquivalent des Brennstoffzellen-Kraftstoffes entspricht dem Benzinpreis. Bei privaten Pkw werden 10 Jahre Nutzungsdauer und ein Zins von 5,5 %/a, bei kommerzieller Nutzung 4 Jahre und 6,5 %/a unterstellt. Die Kfz Steuer ist für Diesel-Kfz um 20 DM/100ccm und der Hubraum um 200 ccm höher, z.B. Mittelklasse: 1600 ccm Benzin-, 1800 ccm Diesel-Pkw.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass kürzere Abschreibungszeit und höherer Zins im kommerziellen Einsatz höhere Laufleistungen zur Amortisierung erfordern, die dort aber auch auftreten. 3000 DM Zusatzkosten für Dieselantriebe sind nach /BMW/ ein typischer Wert in der Mittelklasse. Höhere Kraftstoffpreise (bzw. analog ein höheres Verbrauchsniveau) begünstigen - bei gleicher Verbrauchsdifferenz - den Diesel-Pkw.



Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw kleine Fahrzeugklasse



Folie 53

Der anlegbare Aufpreis für Brennstoffzellen-Pkw orientiert sich bei niedrigen jährlichen Fahrleistungen und/oder niedrigen Kraftstoffkosten an den Kosten der Benzin-Pkw, anderenfalls an denen der Diesel-Pkw.

Dargestellt ist der anlegbare Aufpreis für Brennstoffzellen(BZ)-Pkw (Basis Methanol) in der kleinen Klasse (KKL) in Abhängigkeit vom Benzinpreis (an der Zapfsäule) bei privaten und kommerziellen Einsatz. Die jährliche Fahrleistung wurde als weiterer Parameter gewählt. Angenommen wurden:

Wirtschaftlichkeitsdaten:

Zinssätze: 5,5 % private Nutzung, 6,5 % kommerzielle Nutzung; 10 Jahre Abschreibungszeit privat, 4 Jahre kommerziell; Kfz-Steuer: BZ-Pkw = Benzin-Pkw 120 DM/a (1200 ccm Hubraum), Diesel-Pkw 420 DM/a (1400 ccm). Pro Energieeinheit gleicher Preis für Methanol und Benzin, Diesel (volumetrisch) um 0,40 DM/l billiger. Der Aufpreis für den Diesel-Pkw ist 2000 DM.

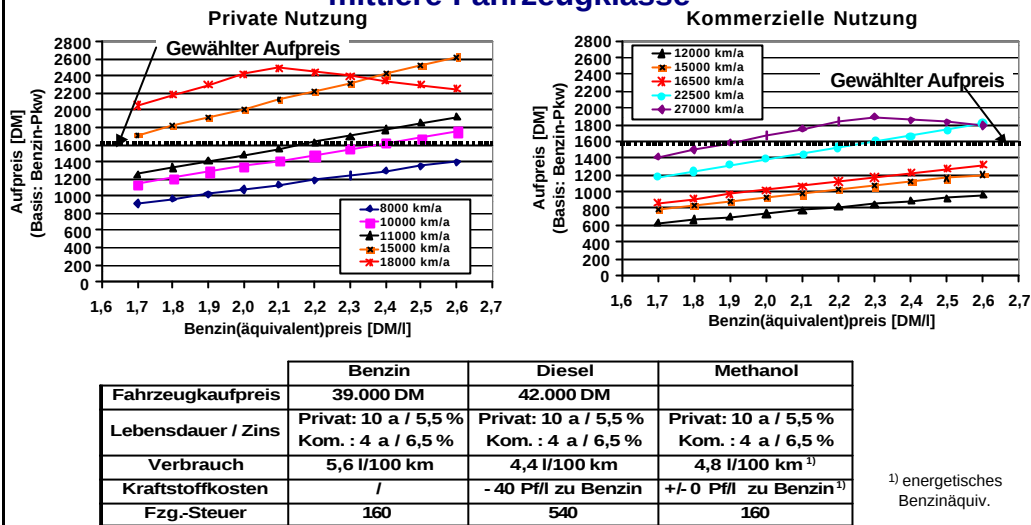
Kraftstoffverbräuche:

Für Benzin- und Diesel-Pkw wurde unterstellt (ca. 90% der IKARUS Flottenwerte von 2020 und Aufteilung in drei Dieselsklassen), dass die Konkurrenzsituation aufgrund der Marktdurchdringungszeit von den zukünftigen Verbräuchen der konventionellen Pkw definiert wird. Dies ist kompatibel zur Errechnung der Verbräuche der BZ-Pkw, für die auch erwartete Verbesserungen (Leistungsgewicht) in der längsdynamischen Simulation vorweggenommen wurden. Als Verbrauch wird unterstellt: Benzin 5,2 l/100km, Diesel 4,1 l/100km, Methanol in Benzinäquivalent 4,0 l/100km.

Da der Schwerpunkt der jährlichen Fahrleistungen privat genutzter Pkw dieser Klasse bei 10-11000 km/a liegt und diese Nutzung überwiegt, wird ein **anlegbarer Aufpreis von 2000 DM** (im Bild als BZ-Fahrzeug markiert) zur Erreichung eines größeren Marktanteils für möglich erachtet, wobei allerdings in Kauf genommen wird, dass die Fahrzeuge im kommerziellen Bereich (mit typischen Fahrleistungen jenseits 15000 km/a) nur für Vielfahrer interessant sind. Mit steigenden Fahrleistungen (Privat > 15000 km/a; Kom. > 22000 km/a) fällt der anlegbare Aufpreis mit steigenden Jahreskilometern ab, da hier der Diesel-Pkw zur preislichen Konkurrenz wird und den anlegbaren Aufpreis nach oben hin begrenzt.



Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw mittlere Fahrzeugklasse



Folie 54

Der anlegbare Aufpreis für Brennstoffzellen-Pkw orientiert sich bei niedrigen jährlichen Fahrleistungen und/oder niedrigen Kraftstoffkosten an den Kosten der Benzin-Pkw, anderenfalls an denen der Diesel-Pkw.

Dargestellt ist der anlegbare Aufpreis für Brennstoffzellen(BZ)-Pkw (Basis Methanol) in der mittleren Klasse (MKL) in Abhängigkeit vom Benzinpreis (an der Zapfsäule) bei privaten und kommerziellen Einsatz. Die jährliche Fahrleistung wurde als weiterer Parameter gewählt. Angenommen wurden:

Wirtschaftlichkeitsdaten:

Zinssätze: 5,5 % private Nutzung, 6,5 % kommerzielle Nutzung; 10 Jahre Abschreibungszeit privat, 4 Jahre kommerziell; Kfz-Steuer: BZ-Pkw = Benzin-Pkw 160 DM/a (1600 ccm Hubraum), Diesel-Pkw 540 DM/a (1800 ccm). Pro Energieeinheit gleicher Preis für Methanol und Benzin, Diesel (volumetrisch) um 0,40 DM/l billiger. Der Aufpreis für den Diesel-Pkw ist 3000 DM.

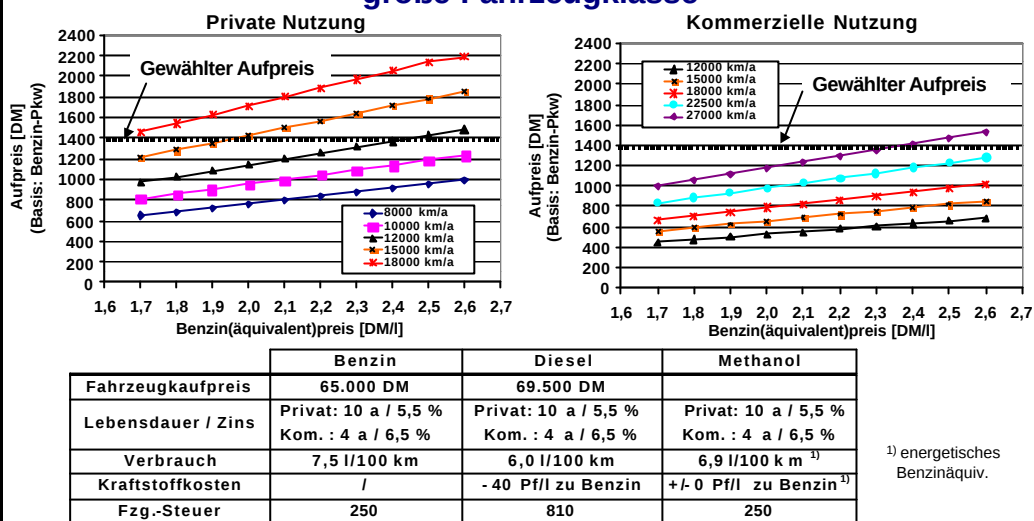
Kraftstoffverbräuche:

Die Konkurrenzsituation wird aufgrund der Marktdurchdringungszeit von den zukünftigen Verbräuchen (ca. 90% der IKARUS Flottenwerte von 2020) der konventionellen Benzin- und Diesel-Pkw definiert. Dies ist kompatibel zur Errechnung der Verbräuche der BZ-Pkw, für die auch erwartete Verbesserungen (Leistungsgewicht) in der längsdynamischen Simulation vorweggenommen wurden. Als Verbrauch wird unterstellt: Benzin 5,6 l/100km, Diesel 4,4 l/100km, Methanol in Benzinäquivalent 4,8 l/100km.

Bei einem Schwerpunkt der jährlichen Fahrleistungen privat genutzter Pkw von 11-12000 km/a und kommerziell genutzter Pkw (einem wichtigen Zulassungssegment in der Mittelklasse) von 16-18000 km/a wird ein **anlegbarer Aufpreis von 1600 DM** (im Bild als BZ-Fahrzeug markiert) zum Erreichen eines größeren Marktanteils für möglich erachtet, wobei die Fahrzeuge im kommerziellen Bereich überdurchschnittliche Fahrleistungen haben müssen. Die Konkurrenz zum Diesel erkennt man an der flacheren bzw. negativen Steigung der Kurven.



Anlegbarer Aufpreis für einen Methanol PEFC-Elektro-Pkw große Fahrzeugklasse



Folie 55

Der anlegbare Aufpreis für Brennstoffzellen-Pkw orientiert sich bei niedrigen jährlichen Fahrleistungen und/oder niedrigen Kraftstoffkosten an den Kosten der Benzin-Pkw, anderenfalls an denen der Diesel-Pkw.

Dargestellt ist der anlegbare Aufpreis für Brennstoffzellen(BZ)-Pkw (Basis Methanol) in der großen Klasse (OKL) in Abhängigkeit vom Benzinpreis (an der Zapfsäule) bei privatem bzw. kommerziellem Einsatz. Die jährliche Fahrleistung wurde als weiterer Parameter gewählt. Angenommen wurden:

Wirtschaftlichkeitsdaten:

Zinssätze: 5,5 % private Nutzung, 6,5 % kommerzielle Nutzung; 10 Jahre Abschreibungszeit privat, 4 Jahre kommerziell; Kfz-Steuer: BZ-Pkw = Benzin-Pkw 250 DM/a (2500 ccm Hubraum), Diesel-Pkw 810 DM/a (2700 ccm). Bezogen auf den Energieinhalt gleicher Preis für Methanol und Benzin, Diesel (volumetrisch) um 0,40 DM/l billiger. Der Aufpreis für den Diesel-Pkw ist 4500 DM.

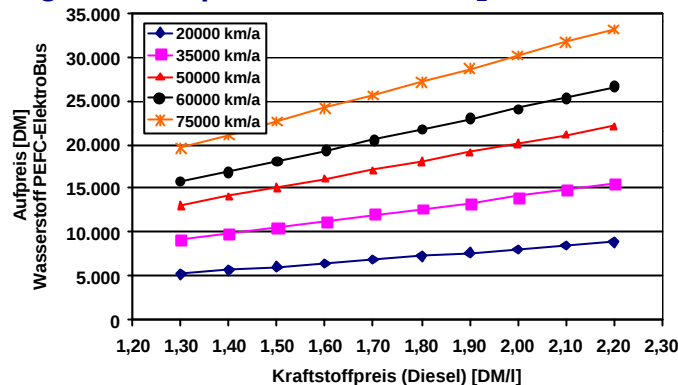
Kraftstoffverbräuche:

Die Konkurrenzsituation wird aufgrund der Marktdurchdringungszeit von den zukünftigen Verbräuchen der konventionellen Benzin- und Diesel-Pkw (ca. 90% der IKARUS Flottenwerte von 2020) bestimmt. Dies ist kompatibel zur Berechnung der Verbräuche der BZ-Pkw, bei der auch erwartete Verbesserungen (Leistungsgewicht) in der längsdynamischen Simulation vorweggenommen wurden. Als Verbrauch wird unterstellt: Benzin 7,5 l/100km, Diesel 6,0 l/100km, Methanol in Benzinäquivalent 6,9 l/100km.

Da Fahrzeuge der Oberklasse überwiegend von kommerziellen Nutzern gekauft werden, deren Fahrleistungen jenseits 22500 km/a liegen, wird ein **anlegbarer Aufpreis von 1400 DM** (im Bild als BZ-Fahrzeug markiert) zur Erreichung eines Marktanteils für möglich erachtet, wobei allerdings aufgrund der hohen Fahrzeugmassen mit grundsätzlichen Problemen (keine Performance-Gleichheit) bei der Akzeptanz zu rechnen ist. Im privaten Bereich können Fahrleistungen um 15000 km/a als typisch angesehen werden. Die Akzeptanzvorbehalte gelten auch hier.



Anlegbarer Aufpreis für einen CH₂ PEFC-Elektro-Bus



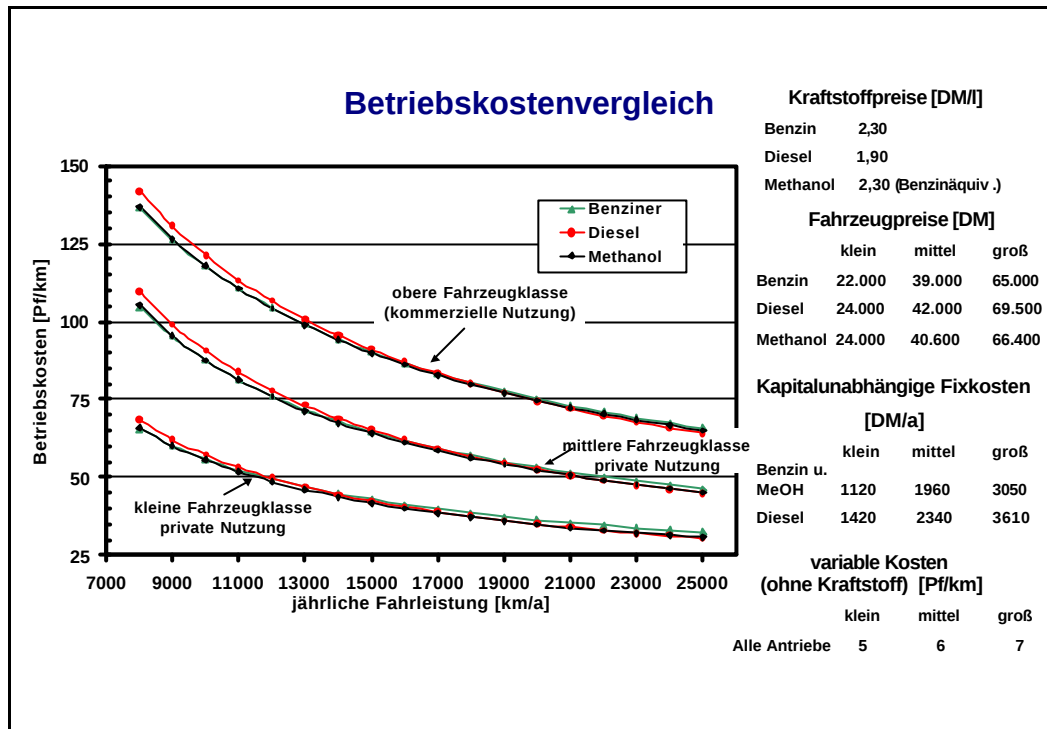
	Diesel	Wasserstoff
Fahrzeugkaufpreis	350.000 DM	
Lebensdauer / Zins	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %	Privat: 10 a / 5,5 % Kom. : 4 a / 6,5 %
Verbrauch	31 l/100 km	27,9 l/100 km ¹⁾
Kraftstoffkosten	Energetische Preisgleichheit Diesel - CH ₂	

Folie 56

Entsprechend der Anlegbarkeitsformel wurde der anlegbare Aufpreis für einen mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen-Elektro-Bus (im Nahverkehr mit Inselbetankung) für verschiedene Jahresfahrleistungen errechnet.

Es wurde unterstellt, dass ein solcher Bus energetisch 10% weniger verbraucht (27,9 l Dieseläquivalent/100km (PEFC-Elektro-Bus) versus 31 l Diesel/100km (Diesel-Variante)) und dass der Tankstellenpreis auf Dieselniveau gehalten wird. Der Verzicht auf entsprechende Mineralölsteuereinnahmen lässt sich sicher mit der Abgasfreiheit und Geräuscharmheit dieser Fahrzeuge in (belasteten) Ballungsräumen rechtfertigen.

Bei typischen Fahrleistungen über 60000 km/a ist im Bereich 1,90-2,00 DM/l Diesel(äquivalent) ein Aufpreis für den Bus von 23.000-30.000 DM unter Wirtschaftlichkeitskriterien möglich. Bei typischen Motorleistungen von etwa 220-260 kW und Verbrennungsmotor - Kosten um 300 DM/kW_{mech} müssten die spezifischen Kosten des Brennstoffzellenantriebs in den Bereich von etwa 400 DM/kW_{el} Stackbrutto-Leistung gebracht werden. Dies ist deutlich mehr, als im Pkw Sektor anlegbar ist. Jedoch sind die Anforderung an die Zeitstandsfestigkeit deutlich höher.



Folie 57

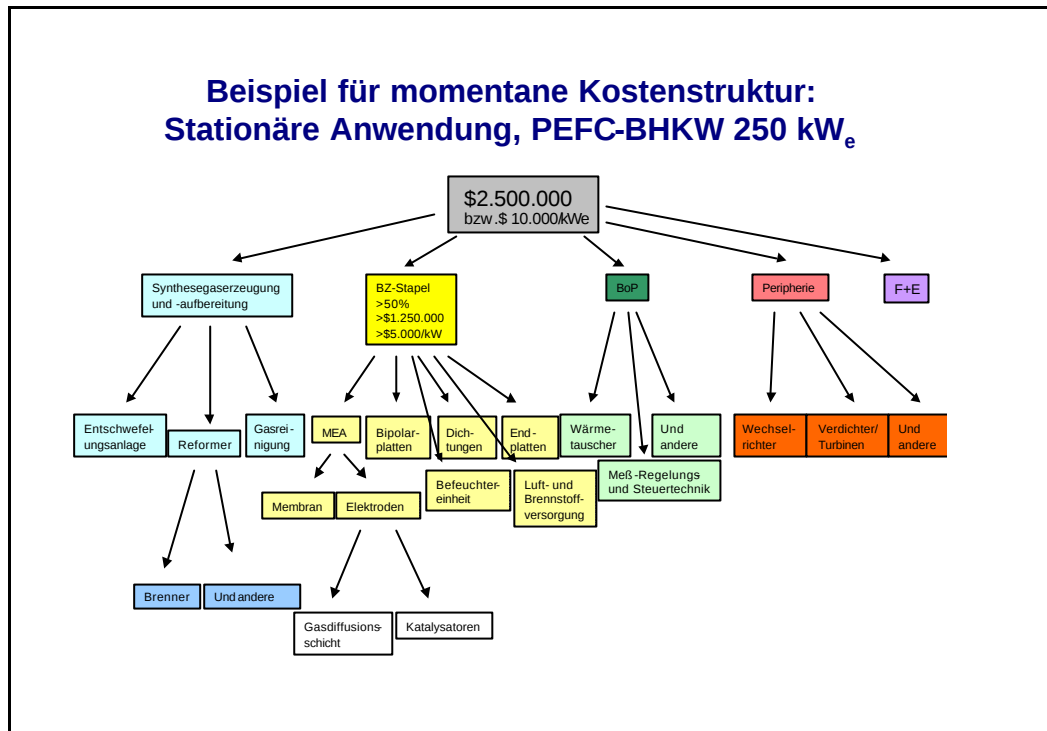
Die Betriebskosten der Fahrzeuge wurden errechnet gemäß dem Ansatz:

(Fixe Kosten pro Jahr)/(jährliche Fahrleistung) plus Variable Kosten/km

Die Fixen Kosten setzen sich zusammen aus kapitalunabhängigen jährlichen Kosten (im wesentlichen Steuer und Versicherung) und der annuitätischen Abschreibung des Fahrzeugpreises. Bei der Abschreibung wurde zwischen privater Nutzung (10 a Abschreibungszeit, Zins 5,5%/a) und kommerziellem Einsatz (4 a und 6,5 %/a) unterschieden. Die Oberklasse wurde, entsprechend der dort überwiegenden Einsatzweise, für die kommerzielle Nutzung dargestellt. Bei den Fahrzeugpreisen wurden die Differenzen von Benzin-/Diesel-/Methanol Fahrzeugen so wie in den anderen Bildern gewählt.

Die Variablen Kosten setzen sich aus einem Ansatz für Verschleiß/ Reparatur/ sonstige Betriebsmittel (=variable Kosten (ohne Kraftstoff)) und den über den Verbrauch/100 km ermittelten Kraftstoffkosten zusammen, wobei die bereits zuvor genannten Verbräuche unterstellt wurden.

Man erkennt, dass die Kapitalkosten bei niedrigen Fahrleistungen dominieren, während bei hohen Fahrleistungen die Variablen - und damit die Kraftstoff-verbrauchskosten - entscheidend werden. Die ermittelten möglichen Aufpreise für Methanol PEFC-Elektrofahrzeuge führen dazu, dass diese Fahrzeuge zu vergleichbaren Kosten betrieben werden können und somit eine Kaufentscheidung nicht negativ beeinflussen. So werden Performance-Vor- oder auch Nachteile die Fahrzeugwahl entscheiden. Positiv dürften sich die Geräuscharmheit, die weitgehende Abgasfreiheit und wahrscheinlich der gute Drehmomentverlauf des Elektromotors auswirken. Dies gilt insbesondere für die kleine und mit weniger großen Vorteilen für die Mittelklasse. In der Oberklasse und teilweise in der Mittelklasse wird die hohe Fahrzeugmasse nachteilig sein. Insbesondere für die Oberklasse wird dies zu keiner Akzeptanz führen.



Folie 58

BoP = Balance of Plant

BHKW:

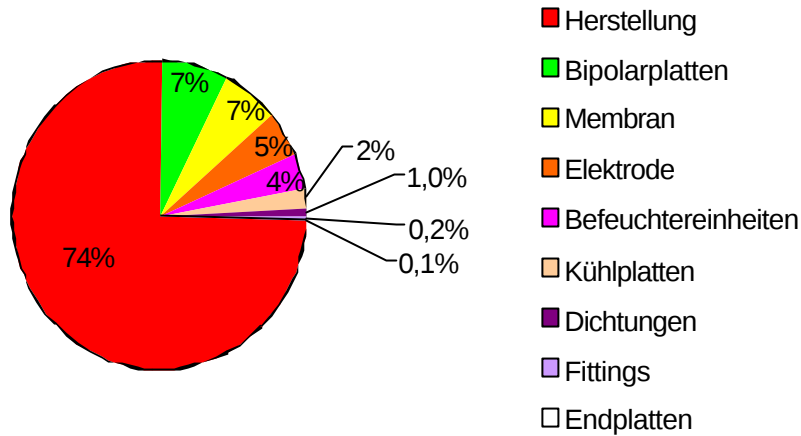
Da sich PEFC-Brennstoffzellen-BHKW noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase befinden, sind sie teurer als die ONSI-PAFC-Anlage mit heute etwa 4000 US-\$ je kW. Die Technik ist noch nicht voll ausgereift und das Produktionsvolumen viel kleiner als das der ONSI-Anlagen. Alstom spricht bei stationären PEFC-Anlagen von 10.000 US-\$ je kW_e. Die Kostenstruktur ist nicht genau bekannt. Der Anteil des PEFC-Brennstoffzellenstacks beträgt heute ca. 50 %, in der Zukunft seien 30 bis 35 % zu erwarten. Die Kostenziele für konventionelle stationäre BHKW-Anlagen (100 - 1000 kW_e) werden bei 1000 bis 500 US-\$ je kW_e liegen müssen, um gegenüber konventionellen Anlagen konkurrenzfähig zu sein.

Mobile Anwendung:

Kostenziele von weniger als DM 100/ kW_e müssen für den Pkw-Antrieb erreicht werden. Davon anteilige Kosten für den Brennstoffzellenstack und die Peripherie. Durch neue Technik und die Einführung einer Serienfertigung von PEFC-Brennstoffzellenantrieben für mobile Anwendungen wird ein großes Kostensenkungspotential für die Brennstoffzellen und die Peripherie erwartet. Es sind wegen der unterschiedlichen Randbedingungen für stationäre und mobile Anwendungen der Brennstoffzellen Synergieeffekte insbesondere hinsichtlich der Kostenreduktion noch nicht abzusehen.



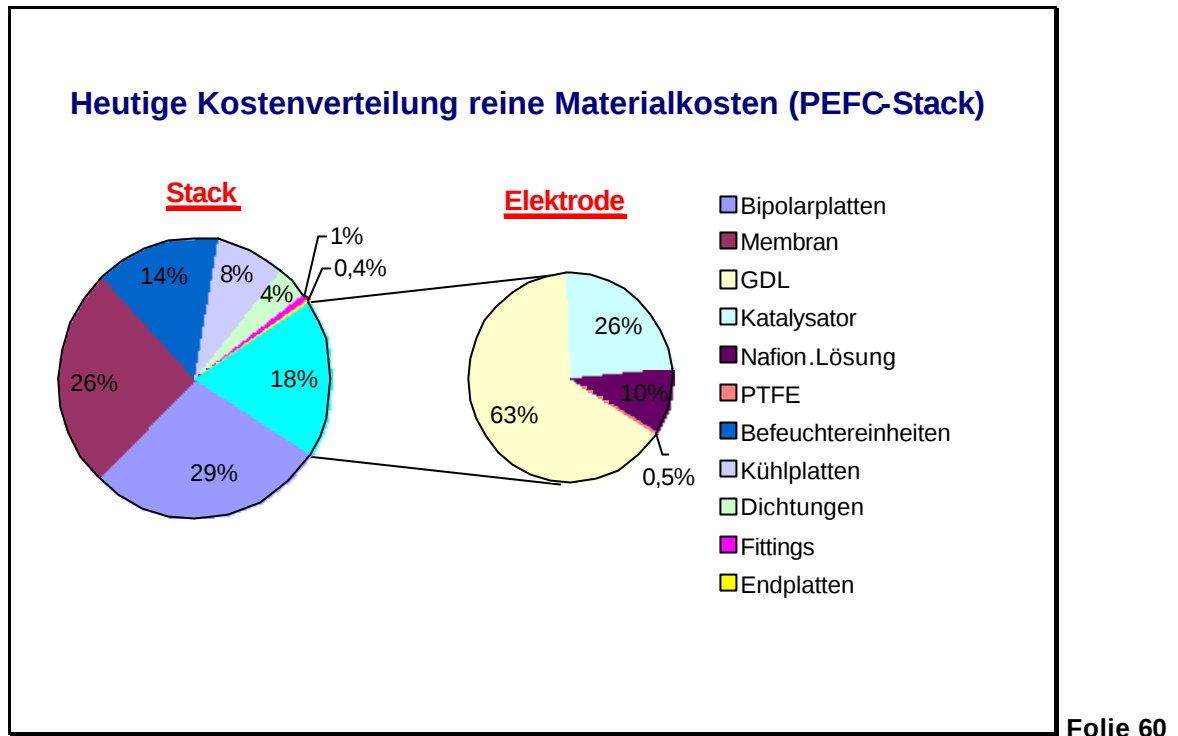
Heutige Kostenverteilung PEFC-Stack



Folie 59

Wenn man die Kostenstruktur eines PEFC-Stacks aus heutiger Sicht analysiert, ergibt sich folgende Verteilung:

- 75 % der Gesamtkosten sind Herstellungskosten.
- Das restliche Viertel der Gesamtkosten verteilt sich auf die reine Materialkosten für Bipolarplatten, Membran, Elektrode usw..
- Bedingt durch die fehlende Serienproduktion können die Herstellungskosten, welche derzeit maßgeblich für die hohen Stackkosten verantwortlich sind, noch erheblich gesenkt werden.
- In Zukunft kann erwartet werden, dass die Herstellungskosten nur noch einen Bruchteil der gesamten Stackkosten verursachen.



Die Betrachtung der reinen Materialkosten eines PEFC-Stacks ergibt folgende Verteilung:

- ca. 30 % Bipolarplatten
- ca. 25 % Membran
- ca. 20 % Elektroden

Die weitere Gliederung Materialkosten für die Elektrode ergibt sich derzeit zu:

- Zweidrittel GDL (Gasdiffusionsschicht),
- Einviertel Katalysator (Platinbelegung: Anode 2,5, Kathode 6,6 g/m²)
- und 10% für Nafionlösung

Es ist zu erkennen, dass Bipolarplatte, Membran und Elektrode ca. Dreiviertel der gesamten Materialkosten verursachen. Die Reduktion von teurer Materialien und/ oder die Substitution durch kostengünstigere Materialien bei diesen Bauteilen ist daher bezogen auf die gesamten Materialkosten des Stacks effizienter als z.B. bei den Endplatten oder den Dichtungen.



Energieumwandlungsketten für Pkw – NEFZ-Fahrzyklus

	Benzin Rohöl VM	Diesel Rohöl VM	FT-D Erdgas VM	CNG Erdgas VM	CH ₂ Erdgas BZ	IMFC Erdgas BZ	DMFC Erdgas BZ	FT-D Erdgas BZ	Strom Mix Bat
EP _{kw} in MJ/100km	153	132	132	145	91	125	111	136	51
m _{Pkw} in kg	1 064	1 062	1 062	1 064	1 164	1 257	1 202	1 251	k.A.
η _{Pkw} in %	22	25	25	23	39	30	31	27	59
η _{KK} in %	84	92	62	81	64	64	64	62	32
EE _{UK} in MJ/100km	182	144	213	180	141	194	172	219	160
η _{EUK} in %	18	23	16	19	25	19	20	17	19
CO ₂ in kg/100km	12,8	10,6	14,5	10,4	8,3	11,8	10,5	15,0	10,0
	Reg.	Reg.	Fern	Lokal	Reg.	Fern	Fern	Fern	Reg.

Bat: E-Antrieb mit Batterie
 BZ: E-Antrieb mit Brennstoffzelle (PEFC)
 CH₂: Druck-Wasserstoff
 CNG: Druck-Erdgas
 DMFC: Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
 (ohne Reformer)
 EUK: Energieumwandlungskette
 Pkw + Kraftstoff
 FT-D: Fischer-Tropsch Diesel

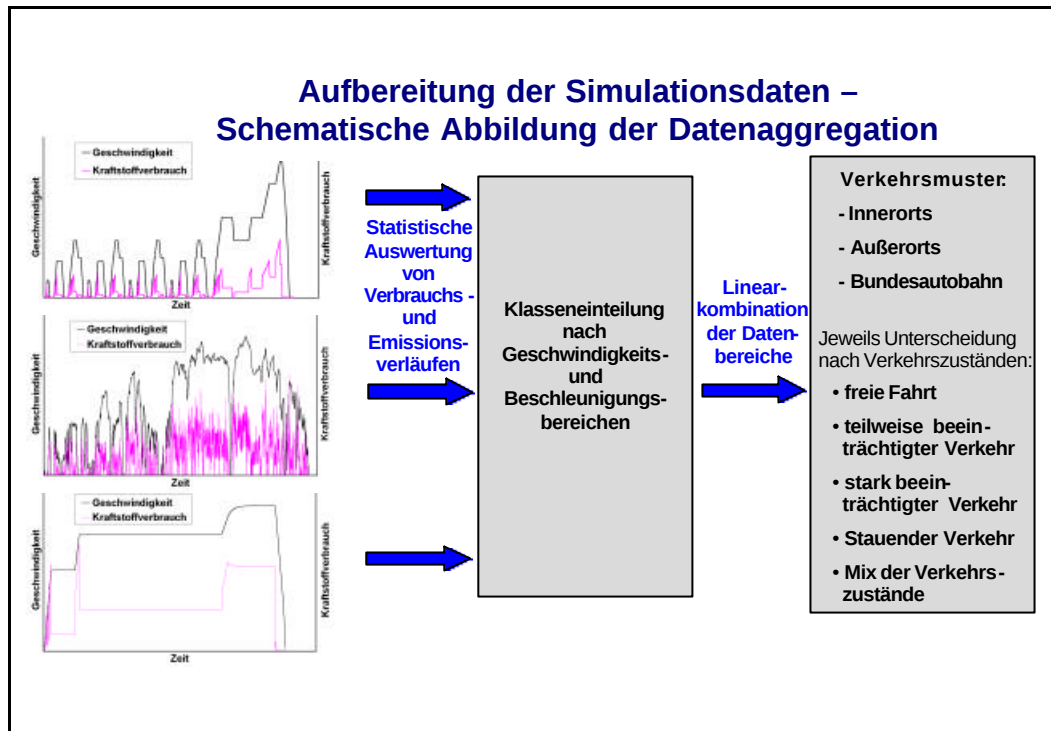
Fern: Erzeugung des Endenergieträgers
 am Bohrloch (z.B. Übersee)
 IMFC: Indirekte Methanol Brennstoffzelle
 (mit Reformer)
 KK: Kraftstoffkette
 Lokal: Lokale Erzeugung des
 Endenergieträgers
 Reg.: Regionale Erzeugung des
 Endenergieträgers
 VM: Verbrennungsmotor

Folie 63

Es wird eine Orientierung für verschiedene auch in der Studie nicht behandelte Kraftstoffpfade/Fahrzeuge gezeigt. Hierbei ist zu beachten, dass diese Abschätzungen die relativen Unterschiede nur für Fahrzeuge einer Größenklasse wiedergeben. Diese entspricht hier der bereits im Kapitel der Fahrzeuganalysen angenommenen kleinen Fahrzeugklasse mit ihren spezifischen Rahmenbedingungen. Aufgrund der Fahrleistungsanforderungen (max. Beschleunigung, Höchstgeschwindigkeit) ergeben sich in der Mittel- und Oberklasse für die Fahrzeuge mit neuen Antrieben gegenüber den jeweiligen konventionellen Fahrzeugen deutlich höhere Gewichte und damit geringere Verbrauchsvorteile, die sich naturgemäß auf den Kettenvergleich nachteilig auswirken.

Die hier gezeigten Annahmen zum Energiebedarf der Pkw's und Wirkungsgrad des Gesamtantriebsstrangs, die zur Ermittlung der Kraftstoffverbräuche dienen, gelten streng nur für den **Neuen Europäischen Fahrzyklus** und sind deshalb **nicht** mit den Daten der folgend angenommenen **Verkehrsmuster** konsistent.

Vor dem Hintergrund eines Übergangs vom Benzin/Diesel auf Basis von Erdöl hin zum Erdgas ergeben sich konkurrierende Situationen des CNG-Verbrennungsmotorantriebs und des Methanol-Brennstoffzellenantriebs insbesondere als Direkt-Methanol-Brennstoffzelle sowohl für die Energie- als auch die CO₂-Bilanz mit Reichweitenvorteilen für Brennstoffzellen-Pkw. Dabei wurden die Potenziale der verbrennungsmotorischen Hybridantriebe nicht berücksichtigt. Der Energieumwandlungspfad über Fischer-Tropsch-Diesel ist aufwendig sowohl für die Verbrennungsmotor- als auch für die (im Vergleich zum Methanolbetrieb komplizierten) Brennstoffzellennutzung. Für die letztgenannte Variante könnte die Erdölverknappung und die großen Erdgasressourcen bei vorhandener Infrastruktur sprechen.



Folie 64

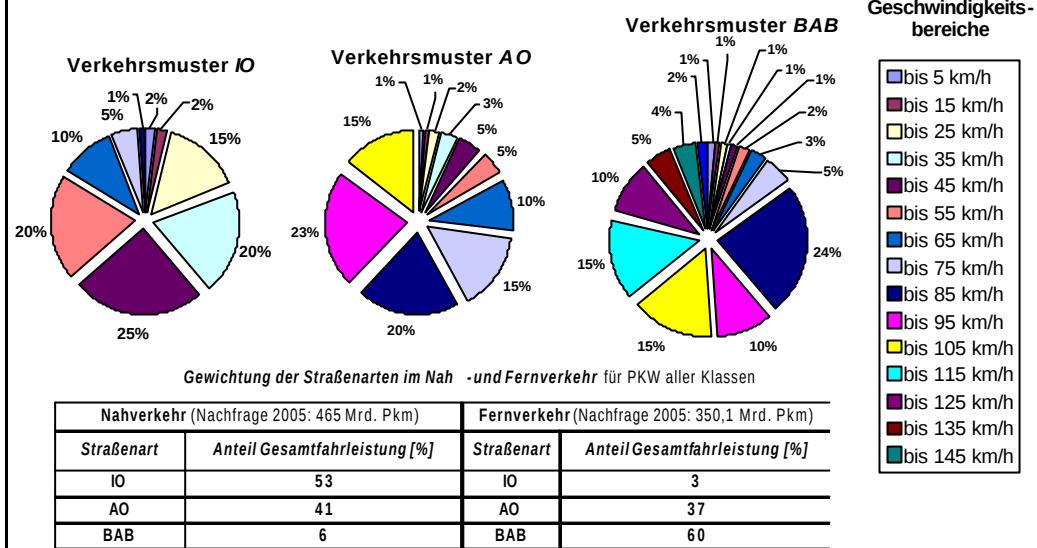
Das Fahrverhalten und somit auch die Emissionen und der Verbrauch von Straßenfahrzeugen wird durch die befahrene Straßenart (Innerorts (IO), Außerorts (AO), Bundesautobahn (BAB)) und den vorherrschenden Verkehrszustand (z.B. freie Fahrt, Stauungen etc.) stark beeinflusst. Die Beschreibung durch mittlere Kennwerte aus Fahrzyklen (z.B. NEFZ, HYZEM etc.) reicht nicht aus, um bei der verkehrlichen Bilanzierung die Emissionen und Energieverbräuche von Fahrzeugen detailliert nachbilden zu können. Aus diesem Grund wurden für die Verkehrsbilanzierung sogenannte *Verkehrsmuster* verwendet, die für jede Straßenart und jeden Verkehrszustand mit fahrstreckenspezifischen Emissions- und Verbrauchsfaktoren hinterlegt sind.

Verkehrsmuster beschreiben bestimmte Fahrverhalten, welche durch eine Linearkombination verschiedener Geschwindigkeitsbereiche erzeugt werden, die ihrerseits wiederum durch kinematische Größen (wie mittlere Geschwindigkeit, Beschleunigung) charakterisiert sind.

Die Verbrauchs- und Emissionsergebnisse der längsdynamischen Simulationsrechnungen für das Methanol bzw. CH₂-PEFC-Elektrofahrzeug wurden zu Verbrauchs- und Emissionsfaktoren des jeweiligen Verkehrsmusters aggregiert (siehe Schema der Folie).



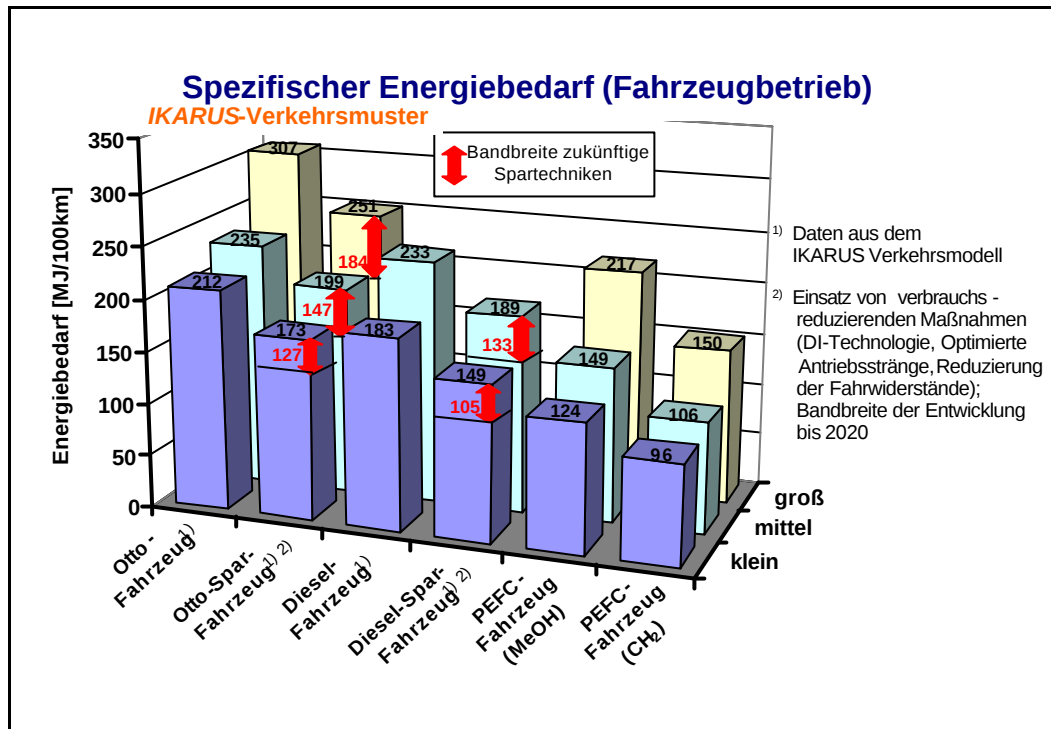
Definition IKARUS-Verkehrsmuster



Folie 65

Das ausgewählten Verkehrsmuster wurde als das mittlere Fahrverhalten von Personenkraftwagen im Jahre 2005 in Deutschland unterstellt. Die Vorgaben der Verkehrsmuster sind dem IKARUS-Technikdatensatz des Teilmodells Verkehr entnommen. Hierbei handelt es sich um ein Modell für den Endenergiesektor Verkehr, welches von der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) und dem TÜV Rheinland im Rahmen des vom BMBF initiiertes IKARUS-Projekts entwickelt worden ist. Mit diesem computergestützten Modell können Umweltauswirkungen und mögliche Minderungen von technologischen und strukturellen Veränderungen im Verkehrssektor aufgezeigt werden.

Die Linearkombination der unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereiche und den dahinter stehenden Emissions- und Verbrauchsfaktoren variiert in den Bereichen Nah- und Fern sowie bei den verschiedenen Straßenarten IO, AO und BAB. Die Verteilung auf die Verkehrsbereiche Nah und Fern erfolgt durch die exogene Vorgabe von Verkehrsleistungen.



Folie 66

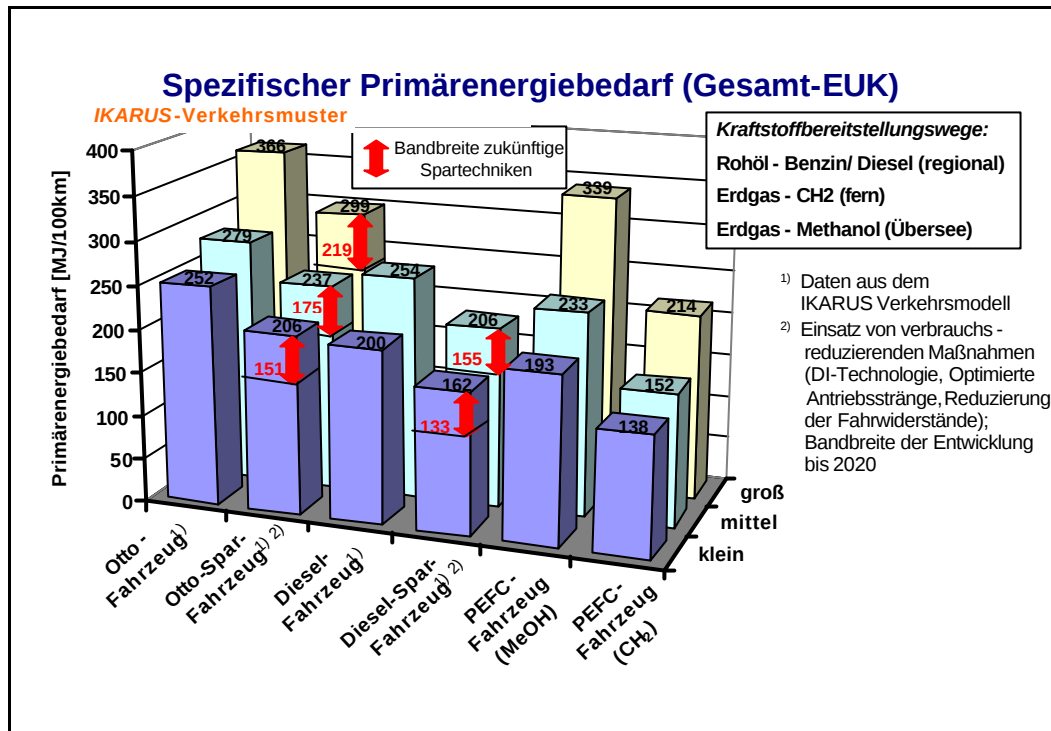
Die Energieverbrauchsdaten der Fahrzeug mit Verbrennungsmotor stammen aus dem Technikdatensatz des IKARUS Teilmodells Verkehr für das unterstellte Pkw-Verkehrsmuster im Jahr 2005. Die Fahrzeuge sind in das Konzept der Abgasnorm EURO 4 für Benzin bzw. Dieselfahrzeuge eingestuft. Die gezeigten Energieverbräuche sind als **Mittelwerte** über eine **ganze Fahrzeugklasse** zu verstehen und **nicht** vergleichbar mit Verbrauchswerten von **Einzelfahrzeugen**, die in definierten Fahrzyklen ermittelt worden sind.

Die Einteilung der Fahrzeuge in Klassen ist ebenfalls dem IKARUS Datensatz entnommen worden. Hierbei ist als Besonderheit anzufügen, dass für Dieselfahrzeuge aus Datenerhebungsgründen eine Zweiteilung vorgenommen wurde.

Die angeführten Daten der *Sparfahrzeuge* entsprechen ebenfalls der Abgasnorm EURO 4. Bei der „Sparvariante“ wurde eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch fahrzeug- und antriebsstrangtechnische Verbesserungen unterstellt. Mögliche Maßnahmen der Verbrauchseinsparungen: Gewichtsreduzierung, Luftwiderstandsoptimierung, Direkt-Einspritzung bei Benzin- und Dieselmotoren, Aufladung und Downsizing der Motoren. Für die *Sparfahrzeuge* wird ein Mehrpreis beim Kauf im Vergleich zu den Standardfahrzeugen unterstellt, der durch die aufwendigere Technik und Verfahrensweise begründet wird. Da die zukünftigen Entwicklung von Sparfahrzeugen starken Streubreiten unterliegt, wurde eine Bandbreite für die Energieverbräuchen dieser Fahrzeuge eingefügt.

Die Daten für die PEFC-Elektrofahrzeuge entsprechen den Simulationsrechnungen der vorliegenden Studie und sind nach den Vorgaben der Verkehrsmustern des IKARUS Datensatzes aggregiert worden. Die Fahrzeug- und Antriebsstrangkennwerte entsprechen den Vorgaben aus Kapitel 2.

Für alle Fahrzeuge wurde der Kaltstartanteil mit Hilfe von Zuschlagfaktoren und eigenen Annahmen für die Verbrauchsfaktoren der Verkehrsmuster berücksichtigt.



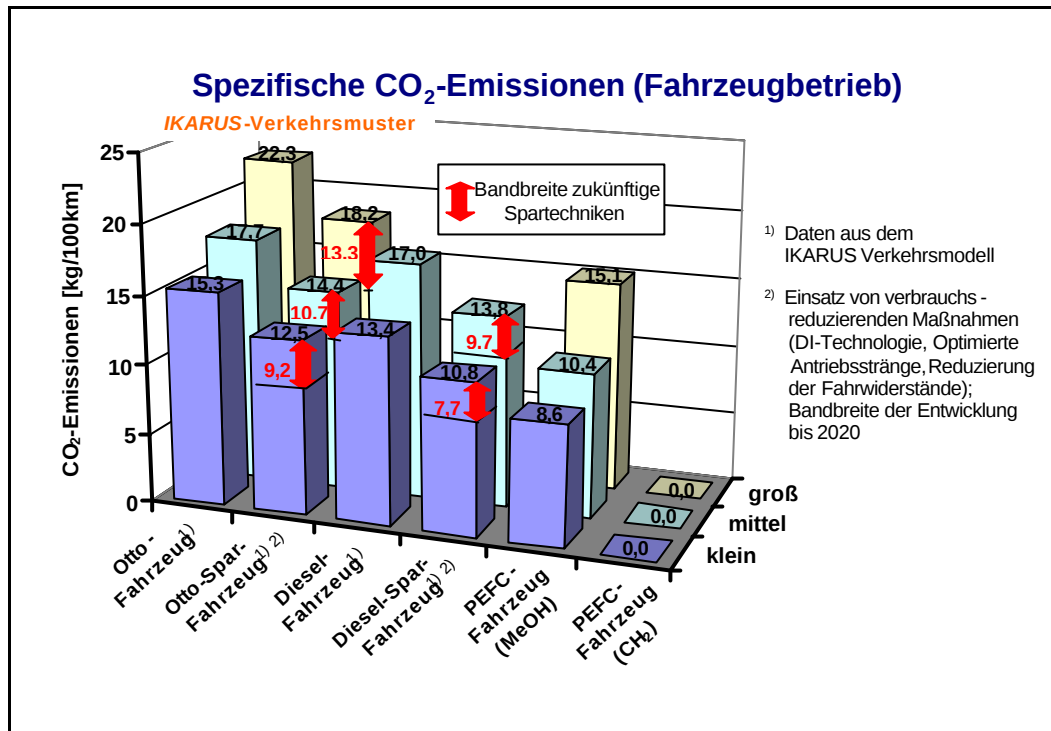
Folie 67

Für die Kraftstoffbereitstellung wurden die Pfade und Primärenergieeinsätze berücksichtigt, die über den gesamten Bereitstellungspfad für den jeweiligen Kraftstoff den geringsten Primärenergiebedarf aufweisen. (Vergleiche Folie „Bereitstellungswege Kohlenwasserstoff-basierter Kraftstoffe“)

Kraftstoff	Kraftstoffpfad	Zusätzlicher Primärenergieeinsatz [MJ/MJ]
Benzin	Rohöl – Benzin (regional)	0,19
Diesel	Rohöl – Diesel (regional)	0,09
Wasserstoff (kompr.)	Erdgas – CH ₂ (fern)	0,43
Methanol	Erdgas – Methanol (Übersee)	0,51

Der Primärenergieeinsatz der vorgelagerten Kette beinhalten die Kraftstoffbereitstellung und die notwendigen Transporte der Zwischen- und Endprodukte bis hin zur Tankstelle. Die Schnittstelle der Energiebilanzierung zwischen der Kraftstoffbereitstellungskette und der Fahrzeugbetriebsphase ist der „Tankstutzen“ des Fahrzeugs.

Die Angaben zu den Energieverbrauchswerten der Fahrzeugkonzepte entstammen der Datenbank des IKARUS Teilmodell Verkehr und eigenen Simulationsrechnungen dieser Studie.



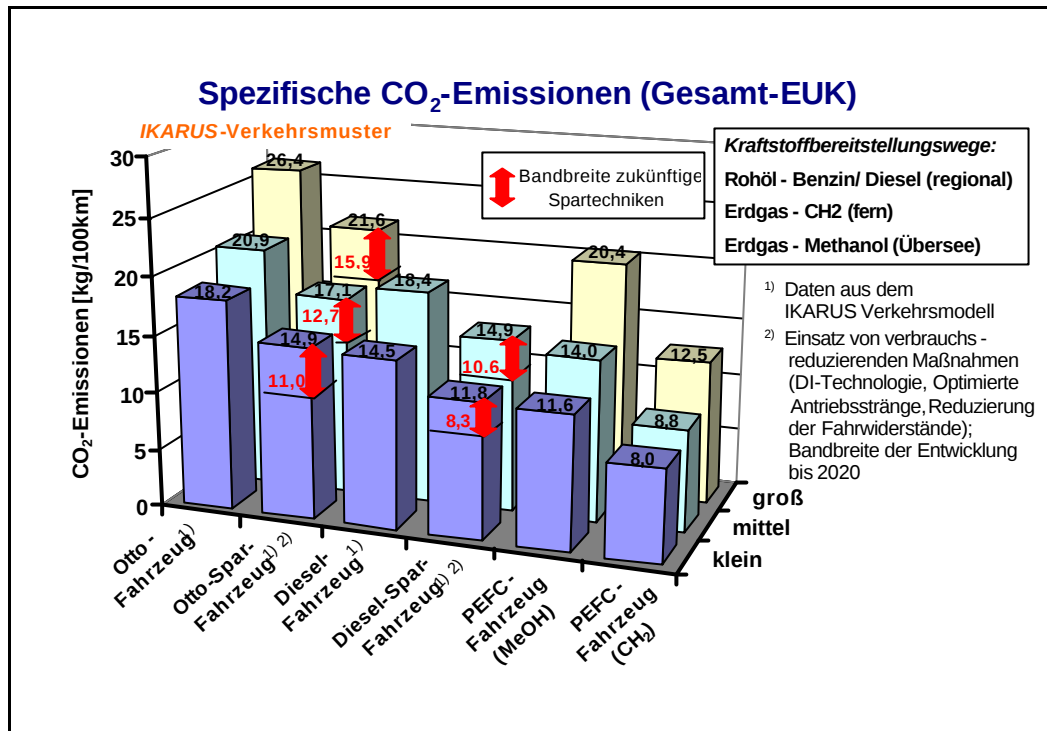
Folie 68

Die CO₂-Emissionsdaten der Fahrzeug mit Verbrennungsmotor stammen aus dem Technikdatensatz des IKARUS Teilmodells Verkehr für das unterstellte PKW-Verkehrsmuster im Jahr 2005. Die Fahrzeuge sind in das Konzept der Abgasnorm EURO 4 für Benzin bzw. Dieselfahrzeuge eingestuft. Die aus den Energieverbräuchen abgeleiteten CO₂-Emissionen sind als Mittelwerte über ein Fahrzeugkonzept einer Fahrzeugklasse zu verstehen und nicht vergleichbar mit Emissionen von Einzelfahrzeugen.

Die angeführten Daten der *Sparfahrzeuge* entsprechen ebenfalls der Abgasnorm EURO 4. Bei der „Sparvariante“ wurde eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und damit auch der CO₂-Emissionen durch fahrzeug- und antriebsstrangtechnische Verbesserungen unterstellt. Mögliche Maßnahmen der CO₂-Einsparungen: Gewichtsreduzierung, Luftwiderstandsoptimierung, Direkt-Einspritzung bei Benzin- und Dieselmotoren, Aufladung und Downsizing der Motoren. Für die *Sparfahrzeuge* wird ein Mehrpreis beim Kauf im Vergleich zu den Standardfahrzeugen unterstellt, der durch die aufwendigere Technik und Verfahrensweise begründet wird. Da die zukünftigen Entwicklung von Sparfahrzeuge starken Streubreiten unterliegt, wurde eine Bandbreite für die Emissionen dieser Fahrzeuge eingefügt.

Die Daten für die PEFC-Elektrofahrzeuge entsprechen den Simulationsrechnungen der vorliegenden Studie und sind nach den Vorgaben der Verkehrsmustern des IKARUS Datensatzes aggregiert worden. Die Fahrzeug- und Antriebstrangkennwerte entsprechen den Vorgaben aus Kapitel 2.

Für alle Fahrzeuge wurde der Kaltstartanteil mit Hilfe von Zuschlagfaktoren und eigenen Annahmen für die Emissionsfaktoren im Verkehrsmuster berücksichtigt.



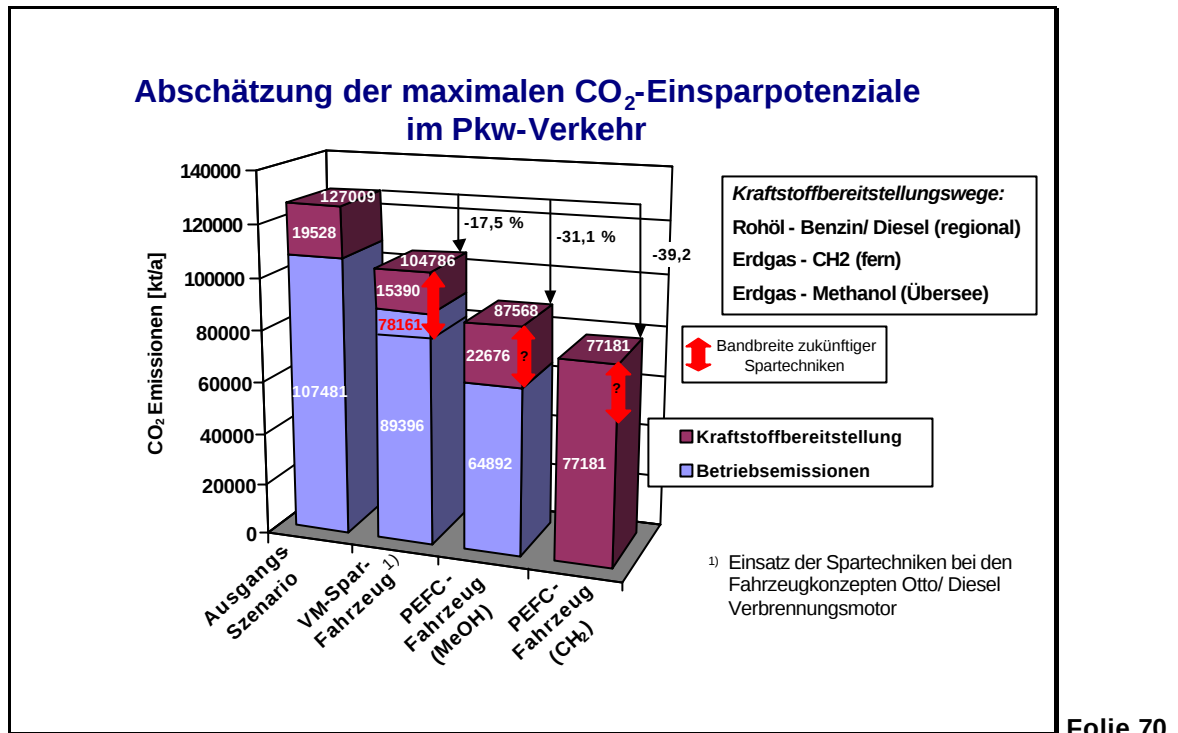
Folie 69

Für die Kohlendioxid-Emissionen der Kraftstoffbereitstellung wurden diejenigen energiespezifischen Emissionsfaktoren der vorgelagerten Kraftstoffkette unterstellt, die für den jeweiligen Kraftstoff die geringsten CO₂-Emissionen aufweisen. (Vergleiche Folie „CO₂-Emissionen der Kohlenwasserstoff-basierten Kraftstoffbereitstellung (I)“)

Kraftstoff	Kraftstoffpfad	CO ₂ -Emission [g/MJ]
Benzin	Rohöl – Benzin (regional)	14
Diesel	Rohöl – Diesel (regional)	6
Wasserstoff (kompr.)	Erdgas – CH ₂ (fern)	83
Methanol	Erdgas – Methanol (Übersee)	24

Bei der CO₂-Bilanzierung der vorgelagerten Kette wurden der Bereiche der Kraftstoffbereitstellung und die notwendigen Transporte der Zwischen- und Endprodukte bis hin zur Tankstelle berücksichtigt. Die Schnittstelle der Emissionsbilanz zwischen der Kraftstoffbereitstellungskette und der Fahrzeugbetriebsphase ist der „Tankstutzen“ des Fahrzeugs.

Die Angaben zu den Kohlendioxid-Emissionsfaktoren der Fahrzeugkonzepte entstammen der Datenbank des IKARUS Teilmodells Verkehr und eigenen Simulationsrechnungen dieser Studie.



In dieser Darstellung wurden die CO₂-Emissionen des motorisierten Pkw-Individualverkehrs bilanziert. Die Bilanzierungshülle umfasst die Kraftstoffbereitstellungskette und die Fahrzeugbetriebsphase. Das Ausgangsszenario für den Pkw-MIV ist durch folgende Kennzahlen charakterisiert:

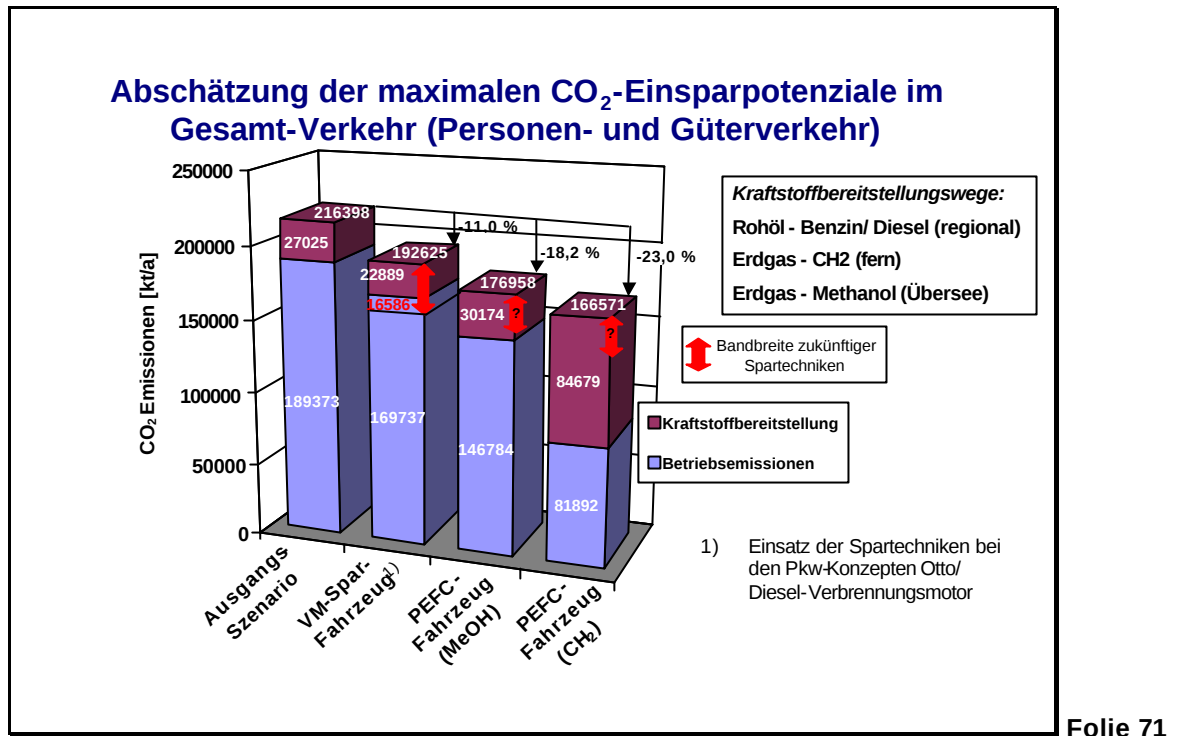
Gesamt-Verkehrsnachfrage Pkw	815 Mrd. Pkm
Gesamt-Bestand Pkw	42,6 Mio.
Personenbesetzungszahl	1,20/ 1,33 (Nah/ Fern)
Straßenartanteile Verkehrsmuster Nah	0,53/ 0,41/ 0,06 (IO/ AO/ BAB)
Straßenartanteile Verkehrsmuster Fern	0,03/ 0,37/ 0,60 (IO/ AO/ BAB)

Die Verteilung der Verkehrsleistungen auf die einzelnen Fahrzeugvarianten (Größenklasse und Antriebsvariante) wurde durch Wichtungsfaktoren, die eine Anpassung der jährlichen Fahrleistungen ermöglichen, vorgenommen.

Die Annahmen zu weiteren Randbedingungen des MIV und zu den Emissionsfaktoren der Fahrzeugkonzepte entstammen der Datenbank des IKARUS Teilmodells Verkehr. Die Datensätze der PEFC-Elektrofahrzeuge wurden mittels Datenaggregation aus den Ergebnissen längsdynamischen Simulationsrechnungen erzeugt.

Für die Potenzialabschätzung wurde eine fiktive, vollständige Substitution aller Antriebstechniken im motorisierten Individualverkehr (PKW) durch die ausgewählte Fahrzeugtechnik unterstellt.

Um Unsicherheiten bezüglich der Beurteilung zukünftiger Techniken der Verbrauchsreduzierung bei Verbrennungsmotoren darzustellen, wurden Bandbreiten für die erwarteten Entwicklungspotenziale eingefügt. Eine analoge Aussagen über Bandbreiten zukünftiger verbrauchsreduzierender Techniken bei PEFC-Elektroantrieben konnte nicht ermittelt werden, da hierzu keine verlässliche Datenbasis existiert.



In dieser Darstellung wurden die CO₂-Emissionen des gesamten Personen- und Güterverkehrs auf der Straße, Schiene, in der Luft und auf dem Wasser bilanziert. Für das Ausgangsszenario des Gesamtverkehrs wurde folgende Annahmen zu den Verkehrsleistungen getroffen (ohne Fußgänger- und Fahrradverkehr):

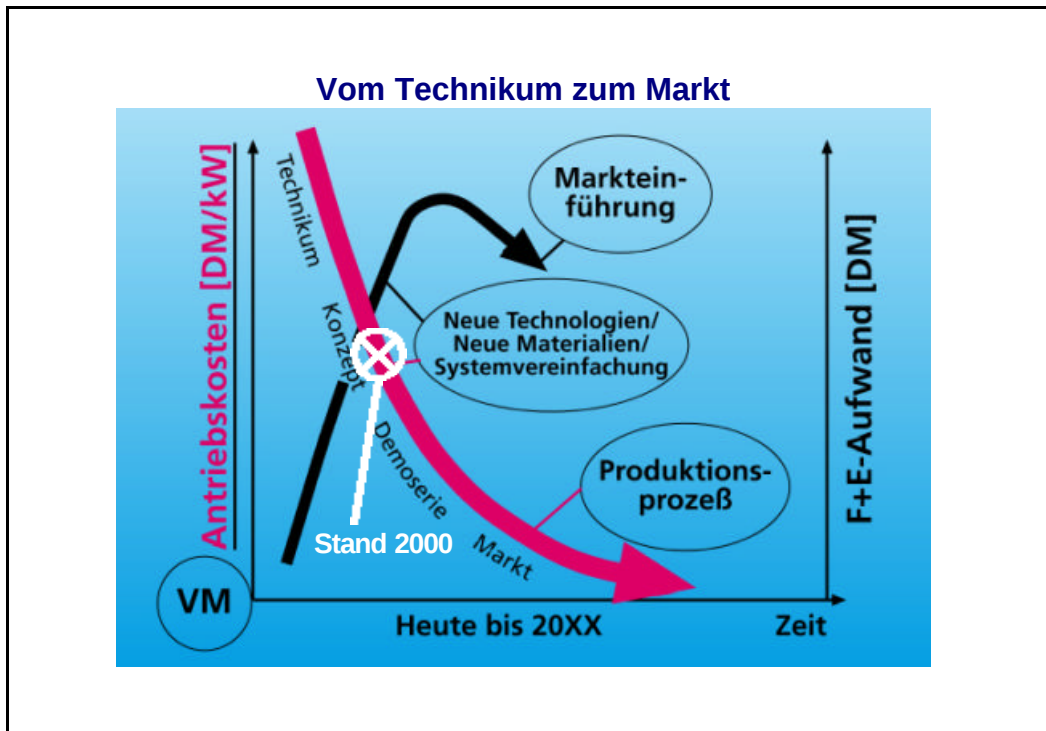
Verkehrsleistung	PV [Mrd. Pkm]	GV [Mrd. tkm]
Straße/ Schiene/ Luft/ Wasser	968/ 60/ 15/ 0	308/ 100/ 1/ 73

Die Verteilung der Verkehrsleistungen auf die einzelnen Fahrzeugtechniken (Verkehrsmitteltypen, Größenklasse und Antriebsvariante) wurde durch Wichtungsfaktoren, die eine Anpassung der jährlichen Fahrleistungen ermöglichen, vorgenommen.

Die Annahmen zu weiteren Randbedingungen des Personen- und Güterverkehrs und zu den Emissionsfaktoren der Fahrzeugkonzepte entstammen der Datenbank des IKARUS Teilmodells Verkehr. Die Datensätze der PEFC-Elektrofahrzeuge wurden mittels Datenaggregation aus den Ergebnissen längsdynamischen Simulationsrechnungen erzeugt.

Für die Potenzialabschätzung wurde eine fiktive, vollständige Substitution aller Antriebstechniken im motorisierten Individualverkehr (PKW) durch das ausgewählte Fahrzeugkonzept unterstellt. Die übrigen Verkehrsmittelarten im Personen- und Güterverkehr bleiben bei den gewählten Fahrzeugkonzepten unberücksichtigt (Szenario: Einführung der neuen Antriebstechnik nur im Pkw-Bereich).

Um Unsicherheiten bei der Beurteilung zukünftiger Techniken der Verbrauchs- und CO₂-Reduzierung darzustellen, wurden Bandbreiten für die erwarteten Entwicklungspotenziale eingefügt. Eine analoge Aussagen über Bandbreiten zukünftiger verbrauchsreduzierender Techniken bei PEFC-Elektroantrieben konnte nicht ermittelt werden, da hierzu keine verlässliche Datenbasis existiert.

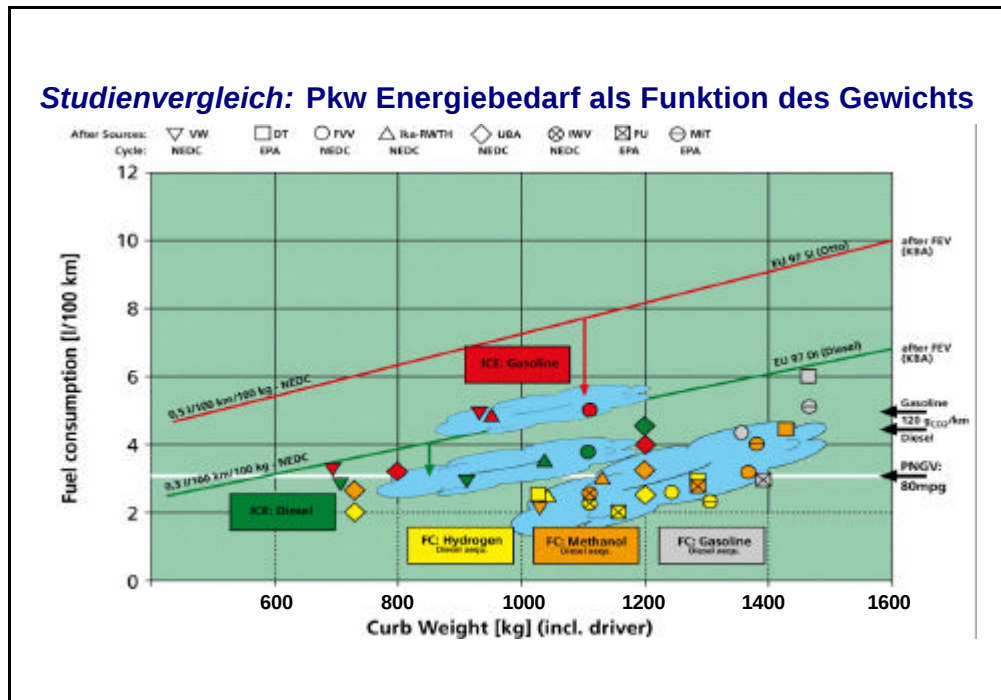


Folie 74

Ein individueller Kundenanreiz zum Kauf eines Brennstoffzellen-Pkw ist gering, da dieser Pkw wenig originären neuen Kundennutzen bringen würde. Es ist also ein Substitutionsprodukt (BZ-Elektroantrieb gegenüber Verbrennungsmotorantrieb) und steht damit unter einem enormen Kostendruck.

Die Brennstoffzellenentwicklung für den mobilen Einsatz zeigt, dass ausgehend vom Stand 2000, neue Technologien, neue Materialien, insbesondere Systemintegration und -vereinfachung und weitere Betriebserfahrungen erforderlich sind, um Kostensenkungen sichtbar zu machen und eine Markteinführung vorzubereiten.

Das heißt, beim derzeitigen Übergang von den Konzeptfahrzeugen in Demonstrationsserien ist ein weiterführender staatlicher und industrieller F&E-Aufwand erforderlich.



Folie 80

Literatur:

[DT] Direct Technology; Hydrogen Infrastructure Report; prepared for Ford Motor Company Dearborn, Michigan; under prime contract No. DE-ACO2-94CE50389 – purchase order No. 47-2-R31148 to the DOE; Washington (USA); 1997

[Ika-RWTH] Gossen, F.; Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu weiterentwickelten konventionell angetriebenen Fahrzeugen; Dissertation RWTH Aachen in Schriftenreihe Automobiltechnik; Ika RWTH Aachen; 2001

[FVV] Höhle, B.; Nitsch, J.; Wagner, U.; Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen; Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. Projekt 686, Nr. 657. Final Report; Frankfurt am Main, 1998

[IWV] Höhle, B. et al.; Systemvergleich: Einsatz von Brennstoffzellen in Straßenfahrzeugen; Studie für Büro für Technikfolgen-Abschätzung; Deutscher Bundestag; Forschungszentrum Jülich (IWV-3) in Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik; 1999

[MIT] On the Road in 2020, – A Life Cycle Analysis of New Automobile Technologies Massachusetts Institute of Technology (Cambridge USA), 2000, www.mit.com/e-lab

[PU] OGDEN, A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development, Journal of Power Sources, Vol 79, S. 143-168

[UBA] Kolke, R.; Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren; Umweltbundesamt Berlin; Mai 1999

[VW] Schweimer; Sachbilanz des 3-Liter-Lupo; VDI-Berichte 1505; VDI-Verlag Düsseldorf; 1999



Übersicht: Kraftstoffe und Speichersystemdaten

Kraftstoff [Fahrzeugantrieb (Klassifikation)]	Kraftstoff- dichte (Normzustand) kg / m ³	Energiedichte			spez. Verbrauch [exempl. Fahrzeuge]		Tank- werkstoff	Tank- volumen Liter	Pkw- Reichweite km	Tank- gewicht leer [kg]	Invest- kosten Tank DM / Tank
		MJ / kg	kWh / kg	kWh / l	Liter / 100km	MJ / 100km					
Benzin [VM-Pkw (klein)]	750 (flüssig)	43,2	12,01	9,01	6,7	217	Kunststoff	55	786	~ 7	~ 200
Diesel [VM-Pkw (klein)]	831 (flüssig)	42,7	11,87	9,86	5,1	181	Kunststoff	55	917	~ 7	~ 200
Methanol [PEFC-Elektro-Pkw (klein)]	796 (flüssig)	21,5	5,98	4,76	8	137	Kunststoff	55	688	~ 7	~ 200
Erdgas H (CNG 200 bar) [VM-Pkw (mittel)]	154 (gasf.)	47	13,14	2,02	~ 6 kg	282	Stahl Al / GFK	~ 80 ~ 85	~ 205 ~ 220	~ 100 ~ 30	~ 1000 k.A.
Wasserstoff (CH ₄ bei 200 bar) [PEFC-Elektro-Pkw (klein)]	17,8 (gasf.)	120	33,3	0,59	0,8 kg	96	Al / GFK	~ 85	~ 190	30	k.A.
Wasserstoff (LH ₂ bei -252 °C) [VM-Pkw (groß)]	71 (flüssig)	120	33,3	2,37	~ 38	324	Carbonfaser Verbund mit Isolation	~ 140	~ 350	~ 150	Ziel: 3.000 - 5.000

Folie 81

Die Speicherung von komprimierten Gasen unter hohem Druck wie auch die Speicherung einer kryogenen Flüssigkeit hat sich als unproblematisch erwiesen, weil Handhabung und Speicherung in einer großen Zahl industrieller Anwendungen praktiziert und beherrscht wird.

Beim Einsatz als Kraftstoff in einem Fahrzeug werden an die Speichersysteme jedoch weiterführende Anforderungen gestellt, die sich nicht nur auf den Punkt Sicherheit bei einem Unfall beschränken. Gewicht, Volumen und Kosten haben einen hohen Stellenwert, weshalb die derzeit industriell eingesetzten Systeme keine optimale Lösung darstellen, sie sind zu schwer, zu unförmig und zu teuer.

Trotz aller Fortschritte in der Entwicklung von leichteren, preiswerten und form-variablen Tankkonstruktionen kann die Summe der Anforderungen, die im Interesse der Fahrzeugnutzer gestellt werden, noch nicht ausreichend erfüllt werden. Diese Feststellung gilt insbesondere für kleinere Fahrzeuge, bei denen alle Komponenten unter der Prämisse Raum- und Gewichtsökonomie optimiert sind. Die bisher entwickelten und erprobten Speicher sind relativ schwer und teuer, was insbesondere beim Einsatz in kleineren, leichten, kompakten Fahrzeugen zu einem Hemmnis werden könnte.