

Modell
zur ökologisch-technischen Lebenszyklusanalyse
von Nahverkehrsbussystemen

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Michael Faltenbacher
Erlangen

Hauptberichter: Prof. Dr. Ing. P. Eyerer
Mitberichter: Prof. Dr. Ing. Bargende
Tag der Prüfung: 15.08.2006

Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde
Universität Stuttgart
2006

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde an der Universität Stuttgart.

Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eyerer, danke ich für die Übernahme des Erstgutachtens, die wohlwollende Unterstützung und besonders für sein Vertrauen und den Freiraum zur Durchführung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt Prof. Dr. Ing. Michael Bargende für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Besonderen Dank schulde ich Frau Anna Braune, Herrn Dr. Martin Baitz, Prof. Dr.-Ing. Bernhard Möglinger, Dr. Manfred Schuckert, die mich durch fachliche Diskussionen in meiner Arbeit unterstützt haben. Frau Elfriede Emmert danke ich für die orthographische Korrekturlesung.

Dank gilt auch meinen Kollegen Matthias Fischer, Harald Florin und Julia Pflieger, die stets bereit waren, meine Ideen anzuhören und diese mit mir zu diskutieren. Natürlich danke ich auch allen nicht genannten Kollegen ohne deren Verständnis und Rückhalt solch eine Arbeit kaum vorstellbar ist.

Meinen zahlreichen Studenten möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen, die durch ihren unermüdlichen Einsatzwillen mit zu dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders erwähnen möchte ich an dieser Stelle Stephan Abele, Stefan Albrecht, Klaus Gönner, Robert Ilg, Ellen Mailänder und Oliver Schuller. Besonders gefreut hat mich, dass einige von ihnen meine geschätzten Kollegen wurden.

Letztendlich verdanke ich auch die Durchführung dieser Arbeit Frau Isabel Reusch, die den Start und die Durchführung durch die geeignete Wortwahl immer wieder forciert hat.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir es überhaupt ermöglicht haben diesen Weg einzuschlagen.

Stuttgart, im Monat August 2006

Michael Faltenbacher

Quidquid agis, prudenter agas et respice finem!

Was immer Du tust, tue es klug und bedenke das Ende!

[Gesta Romanorum 103]

Kurzfassung

Die Verbesserung der Luftqualität und damit der Lebensqualität der Bürger, gemeinsam mit einer langfristig gesicherten Energieversorgung der Europäischen Union, sind vorrangige Ziele der Europäischen Umwelt- und Energiepolitik. Ein Hauptverursacher von luftbelastenden Schadstoffemissionen und Verbraucher von vorwiegend nicht erneuerbaren Ressourcen ist der Verkehrssektor. Gerade in Ballungsräumen mit ihrer dichten Bebauung und hohen Bevölkerungs- und Verkehrsdichte sind die Umweltbelastungen des Verkehrs spürbar. Um diese Verkehrsbelastungen zu senken, ist es erklärtes Ziel der Städte und Gemeinden, den ÖPNV auszuweiten. Da der Nahverkehrsbus das vorwiegend eingesetzte Transportmittel im ÖPNV ist, wird von den Kommunen der Einsatz verbrauchs- und emissionsarmer Omnibusse angestrebt. Mögliche Antriebskonzepte nutzen u.a. selbstzündende bzw. fremdgezündete Verbrennungsmotoren sowie Brennstoffzellen. Abhängig vom Antriebskonzept können verschiedene flüssige und gasförmige Kraftstoffe, wie z.B. Diesel, Erdgas oder Wasserstoff, eingesetzt werden.

Nun haben Bushersteller wie Busbetreiber das Problem, dass sie den vollen Umfang der ökologischen Chancen und Risiken bekannter und neuer Busantriebstechnologien meist nicht oder nur unzureichend einschätzen können. Um eine Aussage über die Umweltfreundlichkeit der verschiedenen Antriebsformen treffen zu können, ist eine ganzheitliche Betrachtung der einzelnen Bussysteme aus umweltlicher Sicht durchzuführen. Wesentlich dabei ist die Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus des Systems Nahverkehrsbus und der lokalen Einsatzbedingungen.

Basierend auf dem Ansatz der Ganzheitlichen Bilanzierung und den Erkenntnissen aus den von der Europäischen Kommission geförderten Demonstrationsprojekten CUTE (Clean Urban Transport for Europe) und ECTOS (Ecological City Transport System) wird in der vorliegenden Arbeit ein Instrumentarium zur ökologisch-technischen Analyse und Optimierung von Nahverkehrsomnibussen entwickelt. Der Ansatz des Modells beruht auf der Untersuchung der vier wesentlichen Lebenszyklusbestandteile eines Bussystems, der Busherstellung, der Kraftstoffbereitstellung, dem Busbetrieb und schließlich der Busentsorgung. Zunächst wird ein modulares Modell für die Herstellung und Entsorgung der betrachteten Bustypen erstellt. Die Kraftstoffbereitstellung wird einschließlich der Gewinnung und Verarbeitung der benötigten Energieträger länderspezifisch analysiert. Für den Busbetrieb wurde ein Modell erstellt, das die standortspezifischen Randbedingungen des Betriebs, wie zum Beispiel Geschwindigkeit, Topographie und Beladung, bei der Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen berücksichtigt.

Anhand der Ergebnisse, welche mit Hilfe des in MS-Excel und in der Ökobilanzsoftware GaBi 4 umgesetzten Modells ermittelt wurden, lassen sich die drei Antriebstechnologien Diesel, Erdgas und Brennstoffzelle ökologisch vergleichen. Die Szenariofähigkeit des entwickelten Modells erlaubt die Optimierung der Bussysteme hinsichtlich u.a. Gesamtenergieverbrauch, Minimierung der Emissionen etc.. Ferner kann das Umweltprofil ganzer Busflotten in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung berechnet werden. Die Validierung der quantitativen Ergebnisse des Modells erfolgt anhand von Messfahrten, die auf mehreren Strecken durchgeführt wurden und detaillierten Emissionsmessungen auf Rollenprüfständen.

Abstract

Improving citizens' quality of life through improvement of air quality and increasing the security of long-term energy supply for the European Union, are the priority goals of the European Environment and Energy policy. The transport sector is one of the largest sectors in the economy responsible for both emission of air pollutants and the use of predominantly non-renewable resources. The environmental impacts are particularly noticeable in congested urban areas where buildings, population and traffic are most dense. To reduce this impact, cities and municipalities have set specific targets to extend public transport systems. Local authorities aim to increase the use of low consumption and low emission transit buses since these are the most common form of transport in public transport networks. Achieving these objectives can be facilitated by different drive system concepts such as self-igniting and spark-igniting internal combustion engines as well as fuel cells. Depending on the drive system concept, different liquid or gaseous fuels can be employed e.g. diesel, natural gas or hydrogen.

However, bus manufacturers and operators are left with the problem that they are typically not able to assess the full extent of the actual and potential ecological benefits and risks of existing and new bus drive systems adequately. A holistic environmental investigation of each bus system has to be carried out in order to determine the environmental-friendliness of the various drive systems. This requires a consideration of the whole life cycle of the bus system and the local operating conditions.

This work developed an instrument for an ecological and technical analysis and optimisation of local transit buses. The work employs the Life Cycle Assessment approach and is based on findings of the CUTE (Clean Urban Transport for Europe) and ECTOS (Ecological City Transport System) fuel cell bus demonstration projects which were conducted with the funding support of the European Commission in ten different cities across Europe. The created model is based on the examination of a bus's four fundamental life cycle stages; its manufacture, the provision of fuel, its operation and finally its disposal. The model comprises two parts. Initially, a general model for the manufacture and disposal of the specific bus model is developed. It also comprises the analysis of the provision of fuel for each city site, including the extraction and processing of the relevant energy sources. Subsequently the second component of the model is compiled for bus operation that considers site-specific operation (factors such as speed, topography and load) for the definition of fuel consumption and resulting emissions. The model is implemented in both MS-Excel and the Life Cycle Assessment software, Gabi 4.

The results obtained from the model enabled three drive system technologies (diesel, natural gas and hydrogen) to be ecologically compared. The model provides the ability to develop and examine different scenarios which enables bus systems to be optimised with regard to their total energy consumption, the minimisation of their emissions etc.. Furthermore, the environmental impact of an entire bus fleet can be examined taking into account the number and different type of buses in the fleet. The quantitative results of the model have been validated on several routes with real world test runs and with detailed emissions monitoring carried out on a dynamometer test bench.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	4
INHALTSVERZEICHNIS.....	6
NOMENKLATUR.....	9
1 EINFÜHRUNG.....	15
1.1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	15
1.2 ZIELSETZUNG UND VORGEHENSWEISE	17
2 GRUNDLAGEN.....	18
2.1 TECHNISCHE GRUNDLAGEN DES SYSTEMS NAHVERKEHRSOMNIBUS.....	18
2.2 METHODISCHE GRUNDLAGEN DER ANALYSE KOMPLEXER SYSTEME	20
2.3 ÖKOBILANZIERUNG UND GANZHEITLICHE BILANZIERUNG.....	21
2.3.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens	22
2.3.2 Sachbilanz	23
2.3.3 Wirkungsabschätzung oder Wirkbilanz.....	23
2.3.4 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.....	23
2.4 CHARAKTERISIERUNG DES BETRACHTETEN SYSTEMS NAHVERKEHRSOMNIBUS.....	24
2.5 BUSBETRIEB	25
2.5.1 Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsmessungen.....	26
2.5.2 Einflussfaktoren auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen.....	28
2.5.3 Flottenzusammensetzung.....	31
2.6 KRAFTSTOFFBEREITSTELLUNG	32
2.7 FAHRZEUGHERSTELLUNG	34
2.8 FAHRZEUGENTSORGUNG	34
3 STAND DER TECHNIK IN DER ÖKOLOGISCHEN BEWERTUNG VON BUSSYSTEMEN	36
3.1 LEBENSZYKLUSBETRACHTUNG DES GESAMTSYSTEMS OMNIBUS UND WASSERSTOFFGETRIEBENER BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUGE	36
3.2 WELL-TO-WHEEL STUDIEN.....	39
3.3 STUDIEN ZU EINZELNEN MODULEN	39
3.3.1 Busbetrieb.....	40
3.3.2 Kraftstoffbereitstellung.....	45
3.3.3 Fahrzeugherstellung und –entsorgung.....	46
3.4 ZUSAMMENFASSUNG	47
4 ANFORDERUNGEN AN DIE ARBEIT.....	48
5 MODELLENTWICKLUNG ZUR LEBENSZYKLUSANALYSE VON BUSSYSTEMEN	50
5.1 SYSTEMBESCHREIBUNG UND -GRENZEN	50
5.1.1 Allgemeine Systembeschreibung	50
5.1.2 Diesebussystem	51
5.1.3 Erdgasbussystem (CNG)	52

5.1.4	<i>Brennstoffzellenbussystem (BZ)</i>	53
5.1.5	<i>Berücksichtigte Sachbilanzwerte</i>	54
5.2	BUSERSTELLUNG.....	55
5.3	BUSENTSORGUNG.....	57
5.4	KRAFTSTOFFBEREITSTELLUNG.....	59
5.4.1	<i>Diesel</i>	59
5.4.2	<i>Erdgas</i>	63
5.4.3	<i>Wasserstoff</i>	64
5.4.4	<i>Zusammenfassung Kraftstoffbereitstellung</i>	73
5.5	BUSBETRIEB.....	75
5.5.1	<i>Ermittlung Einflussparameter Diesel</i>	76
5.5.2	<i>Ermittlung Verbrauchs- und Emissionsfaktoren CNG</i>	80
5.5.3	<i>Ermittlung Verbrauchsfaktoren Brennstoffzellenbus</i>	82
5.6	ENTWICKLUNG EINES MODELLS ZUR ÖKOLOGISCHEN ANALYSE UND OPTIMIERUNG VON BUSSYSTEMEN ..	87
5.6.1	<i>Modellrahmen</i>	88
5.6.2	<i>Entscheidungsbaum</i>	89
5.6.3	<i>Modellzusammenhänge</i>	91
5.6.4	<i>Validierung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren mit Messdaten</i>	96
5.6.5	<i>Datenqualität</i>	99
6	ANWENDUNG DES MODELLS	101
6.1	ANTRIEBSTECHNOLOGIEVERGLEICH.....	101
6.1.1	<i>Fahrzeugherstellung</i>	101
6.1.2	<i>Fahrzeugentsorgung</i>	103
6.1.3	<i>Kraftstoffbereitstellung</i>	103
6.1.4	<i>Busbetrieb</i>	103
6.1.5	<i>Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtung</i>	106
6.2	UMWELTPROFIL EINER KOMPLETTEN BUSFLOTTE.....	108
6.2.1	<i>Fahrzeugherstellung und -entsorgung</i>	109
6.2.2	<i>Kraftstoffbereitstellung</i>	109
6.2.3	<i>Flottenbetrieb</i>	109
6.2.4	<i>Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtung</i>	111
6.3	SZENARIEN.....	112
6.3.1	<i>Antriebsszenario</i>	112
6.3.2	<i>Flottenszenario</i>	114
6.4	SENSITIVITÄTSANALYSE UND FEHLERABSCHÄTZUNG.....	115
7	ZUSAMMENFASSUNG	118
7.1	MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN.....	118
7.2	AUSBlick.....	119
8	LITERATUR	122
ANHANG A	ANTRIEBSTECHNOLOGIEN	137

ANHANG A.1	BRENNSTOFFZELLENBUS	137
ANHANG A.2	DIESELBUS	141
ANHANG A.3	ERDGAS (CNG) BUS.....	146
ANHANG A.4	NEBUS	147
ANHANG A.5	TECHNISCHE DATEN DER UNTERSUCHTEN BUSSE	148
ANHANG B	EIGENSCHAFTEN KRAFTSTOFFE	149
ANHANG B.1	WASSERSTOFF	149
ANHANG B.2	DIESEL.....	151
ANHANG B.3	ERDGAS	152
ANHANG B.4	KRAFTSTOFFEIGENSCHAFTEN.....	152
ANHANG C	KRAFTSTOFFVERBRAUCHS- UND EMISSIONSMESSUNGEN.....	153
ANHANG C.1	KRAFTSTOFFVERBRAUCHSMESSUNG	153
ANHANG C.2	EMISSIONSMESSUNG.....	155
ANHANG C.3	VERBRAUCHS- UND EMISSIONSMESSUNGEN IM RAHMEN DIESER ARBEIT	157
ANHANG D	FLOTTENZUSAMMENSETZUNG.....	158
ANHANG E	HANDBUCH EMISSIONSFAKTOREN	164
ANHANG E.1	FAHRMUSTER UND VERKEHRSSITUATIONEN	164
ANHANG F	RAFFINERIE	167
ANHANG F.1	ALLOKATIONSFAKTOREN	167
ANHANG G	ERMITTLUNG H₂ VERBRAUCHSFUNKTION.....	168
ANHANG H	ERGEBNISSE DER ANWENDUNGSBEISPIELE	171
ANHANG H.1	ANTRIEBSTECHNOLOGIEVERGLEICH.....	171
ANHANG H.2	ANALYSE EINER FLOTTE	173

Nomenklatur

Abkürzungen

<i>ARGE</i>	Arbeitsgemeinschaft
<i>ANL</i>	Argonne National Laboratory
<i>AOP</i>	Auto Oil Programme
<i>BE</i>	Belgien
<i>BTL</i>	Biomass-To-Liquid (auf Biomasse basierende Kraftstoffe)
<i>BZ</i>	Brennstoffzelle
<i>CBDC</i>	Central Business District Cycle
<i>CML</i>	Centrum voor Milieukunde (Zentrum für Umwelttechnik) der Universität Leiden
<i>CNG</i>	Compressed Natural Gas (Komprimiertes Erdgas)
<i>Concawe</i>	Conservation of clean air and water in Europe (Vereinigung der europäischen Mineralölfirmer für Umwelt, Gesundheit und Sicherheit)
<i>COPERT</i>	COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport
<i>CRT</i>	Continuously Regenerating Trap
<i>c_w Wert</i>	Luftwiderstandskoeffizient
<i>CUTE</i>	Clean Urban Transport for Europe (EU gefördertes Projekt)
<i>DE</i>	Deutschland
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung e.V.
<i>DK</i>	Dänemark
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<i>DZ</i>	Algerien
<i>ECE</i>	Economic Commission for Europe
<i>ECTOS</i>	Ecological City Transport System (EU gefördertes Projekt)
<i>EEV</i>	Enhanced Environmental friendly Vehicle
<i>EFA</i>	Emissionsfaktor
<i>EG</i>	Europäische Gemeinschaft
<i>Elektr.</i>	Elektolyse (im Kontext H ₂ Produktion)
<i>ELR</i>	European Load Response

<i>ETC</i>	European Transient Cycle
<i>EU</i>	Europäische Union
<i>EU 15</i>	Mitgliedsstaaten der Europäischen Union: Belgien, Deutschland, Luxemburg, Niederlande, Dänemark, Irland, Vereinigtes Königreich, Griechenland, Portugal, Österreich, Schweden
<i>EU Mix</i>	EU Versorgungsmix (im Kontext Erdgasbereitstellung, Stromerzeugung o.ä.)
<i>EUCAR</i>	European Council for Automotive R&D (Forschungsvereinigung der Europäischen Automobilhersteller)
<i>FIGE</i>	Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen
<i>FR</i>	Frankreich
<i>FZ Jülich</i>	Forschungszentrum Jülich
<i>GB</i>	Großbritannien
<i>GHG</i>	Greenhouse gas (Treibhausgas)
<i>GREET</i>	Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation
<i>GTL</i>	Gas-To-Liquid (auf Erdgas oder anderen gasförmigen Stoffen basierende Kraftstoffe)
<i>GWP</i>	Global Warming Potential (Treibhauspotential)
<i>HBEFA</i>	Handbuch Emissionsfaktoren
<i>HTP</i>	Human Toxizitätspotential
<i>Hydro</i>	Wasserkraft (im Kontext H ₂ Produktion)
<i>Ifeu</i>	Institut für Energie- und Umweltforschung
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<i>ISO</i>	International Standardisation Organisation
<i>IT</i>	Italien
<i>JP</i>	Japan
<i>JRC</i>	Joint Research Center of the European Union
<i>Kfz</i>	Kraftfahrzeug
<i>l DÄ</i>	Liter Dieseläquivalent
<i>LBST</i>	Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH

<i>LCA</i>	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
<i>LNF</i>	Leichte Nutzfahrzeuge
<i>LNG</i>	Liquefied Natural Gas (verflüssigtes Erdgas)
<i>LPG</i>	Liquefied Petroleum Gas (Flüssiggas)
<i>mKr</i>	Kraftstoffmasse
<i>MEET</i>	Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport (EU gefördertes Projekt)
<i>MIT</i>	Massachusetts Institute of Technology
<i>MOBILE</i>	Mobile Source Emission Factor Model
<i>MVEG</i>	Motor Vehicle Emission Group
<i>NFZ</i>	Nutzfahrzeug
<i>NG</i>	Nigeria
<i>NL</i>	Niederlande
<i>NO</i>	Norwegen
<i>Offsh.</i>	Offshore (Standort auf See, im Kontext Windpark und Erdöl und Erdgasförderung)
<i>Onsite</i>	Vor Ort Erzeugung (im Kontext H ₂ Produktion)
<i>ÖPNV</i>	Öffentlicher Personennahverkehr
<i>Part</i>	Partikel
<i>Pb</i>	Blei
<i>PE</i>	Primärenergie
<i>PEB</i>	Primärenergiebedarf
<i>PHEM</i>	Passenger Car and Heavy Duty Emission Model
<i>Pkw</i>	Personenkraftwagen
<i>PM</i>	Particulate Matter (Partikel)
<i>RER</i>	Region Europa
<i>RME</i>	Rapsmethylester (Biodiesel)
<i>RU</i>	Russische Föderation
<i>RWTÜV</i>	Rheinisch-Westfälischer TÜV
<i>SCR</i>	Selective Catalytic Reduction

<i>SCRT</i>	Selective Catalytic Reduction Trap
<i>SNF</i>	Schwere Nutzfahrzeuge
<i>SORT</i>	Standardised Onroad Tests
<i>St. Ref.</i>	Steam Refoming (Dampfreformierung)
<i>Stabw</i>	Standardabweichung
<i>TREMOT</i>	Transport Emission Estimation Model
<i>TtW</i>	Tank to wheel (vom Tank bis zum Rad)
<i>TÜV</i>	Technischer Überwachungsverein
<i>UITP</i>	International Union of Public Transport
<i>US</i>	Vereinigte Staaten von Amerika
<i>VDI</i>	Verband deutscher Ingenieure
<i>VITO</i>	Flemish Institute for Technological Research
<i>VTT</i>	Technical Research Centre of Finland
<i>WtW</i>	Well to Wheel (vom Bohrloch bis zum Rad)
<i>WtT</i>	Well to Tank (vom Bohrloch bis zum Tank)

Lateinische Formelzeichen

AF_{Route}	Anzahl Fahrten auf einer Route
A_{i,AT_j}	Aktivitätsrate der Abgasnorm i einer Antriebstechnologie AT_j (z.B. Fahrleistung in km)
E_{Strom}	Menge verbrauchter elektrischer Strom
E_{SS}	Menge eines emittierten Stoffes SS
\dot{E}_{SS}	Menge eines emittierten Stoffes SS je km
$E_{SS_{BH}}$	Menge eines emittierten Stoffes SS während der Busherstellung BH
$E_{SS_{BV}}$	Menge eines emittierten Stoffes SS während der Busverwertung BV
e_{SS_j,AT_i}	spezifischer Emissionsfaktor eines Stoffes SS je Abgasnorm j einer Antriebstechnologie AT_i
$EFA_{SS_{AT_i}}$	Emissionsfaktor eines Stoffes SS für eine Antriebstechnologie AT_i

FL	Fahrleistung
$Fzgan_{z_{AT_i}}$	Fahrzeuganzahl einer Antriebstechnologie i
$Fzgan_{z_{ges}}$	Gesamtfahrzeuganzahl einer Busflotte
H_{Erdgas}	Heizwert eingesetztes Erdgas
H_{H_2}	Heizwert Wasserstoff (120 MJ/ kg)
$l_{Abschnitt}$	Streckenlänge eines Routenabschnittes
l_{RM}	Streckenlänge eines Routenmixes
l_{Route}	Streckenlänge einer Route
m_{Erdgas}	Masse verbrauchtes Erdgas
m_{H_2}	Masse produzierter Wasserstoff
MKr_q	Verbrauch des Kraftstoffes q
$MKr_{q,j}$	spezifischer Verbrauch des Kraftstoffes q je Abgasnorm j einer Antriebstechnologie AT_j
$RF_{AB_{SS}}$	Reduktionsfaktor einer Abgasnachbehandlungstechnologie AB für einen emittierten Stoff SS
S	Steigung einer Strecke
v	Geschwindigkeit
$x_{i,j,k}$	Prozentualer Anteil eines Antriebskonzeptes i an einer Busflotte im Land k für das Bezugsjahr j
z_p	Prozentualer Anteil einer Steigungsklasse p

Griechische Formelzeichen

η	Wirkungsgrad
η_{Anlage}	Anlagenwirkungsgrad

Chemische Formelzeichen und Kurzschreibweisen

CH_4	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid

<i>H₂</i>	Wasserstoff
<i>HC</i>	Kohlenwasserstoffe
<i>HFC</i>	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
<i>N₂O</i>	Lachgas
<i>NH₃</i>	Ammoniak
<i>NO_x</i>	Stickoxide (beinhaltet NO und NO ₂)
<i>NMHC</i>	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe
<i>Pb</i>	Blei
<i>PFC</i>	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
<i>Pt</i>	Platin
<i>SF₆</i>	Schwefelhexafluorid
<i>SO₂</i>	Schwefeldioxid

Einheiten

<i>bar</i>	10.000 N/m ²
<i>Fzgkm</i>	Fahrzeugkilometer
<i>km</i>	Kilometer
<i>kWh</i>	Kilowattstunde, 1000 Wh
<i>MJ</i>	Mega Joule, 10 ⁶ Joule
<i>Mio</i>	Million, 10 ⁶
<i>Pkm</i>	Personenkilometer (Transportleistung)
<i>ppm</i>	Parts per million, [mg/kg]
<i>W</i>	Watt [J/s]

1 Einführung

1.1 Einleitung und Problemstellung

Die Verbesserung der Luftqualität und damit der Lebensqualität der Bürger, gemeinsam mit einer langfristig gesicherten Energieversorgung der Europäischen Union, sind vorrangige Ziele der Europäischen Umwelt- und Energiepolitik [1],[2]. Verursacher von luftbelastenden Schadstoffemissionen und Verbraucher von Energie sind die Sektoren Industrie, Verkehr und private Haushalte. So ist der Verkehr beispielsweise in Deutschland mit einer Nachfrage von jährlich 57 Mio. Tonnen Otto- und Dieselkraftstoff der größte Verbraucher von Mineralölprodukten und trägt signifikant zu den anthropogen verursachten Emissionen bei. Der Beitrag des motorisierten Verkehrs in Deutschland im Jahre 2001 beläuft sich z.B. bei den klimarelevanten Kohlendioxidemissionen (CO_2) auf 21 % und bei den Stickoxidemissionen (NO_x) auf 61 % [3]. Die Wirkungen der Emissionen des Verkehrs reichen von Sommersmog, verursacht durch die Ozonvorläufersubstanzen NO_x und Kohlenwasserstoffe (HC) über die Klimaerwärmung bis hin zu einer Verminderung der Lebenserwartung, verursacht durch Benzol- und Feinstaubemissionen (PM) [4].

Als Reaktion auf den steigenden Energiebedarf und die steigenden Emissionen des Verkehrssektors wurde von der Europäischen Kommission gemeinsam mit der Mineralöl- und Automobilindustrie in den 90er Jahren das Auto-Öl Programm aufgelegt [5]. Im Rahmen dieses Programms wurden die Zusammenhänge zwischen Kraftstoffqualität, Verbrennungstechnologie und Schadstoffemissionen detailliert untersucht. Eine Folge war u.a. die Festschreibung des maximalen Schwefelgehaltes der Kraftstoffe EU-weit auf 50 ppm ab 2005 [6] zur Senkung der Schwefeldioxid (SO_2)- und PM-Emissionen. Eine andere Auflage war die Verschärfung der Schadstoffgrenzwerte für Pkw und Nutzfahrzeuge für das Jahr 2000 in Form der Euro 3 Norm. Diese wurde inzwischen mit der Euro 4 und 5 Norm bis in das Jahr 2008 weiter fortgeschrieben [7]. Um insbesondere die CO_2 Emissionen zu erniedrigen, verpflichteten sich die europäischen Automobilhersteller auf freiwilliger Basis bis 2008 den Flottenverbrauch um 25 % gegenüber dem Basisjahr 1995 zu reduzieren [8].

Die getroffenen Maßnahmen reichen jedoch noch nicht aus, um die formulierten Ziele der Europäischen Kommission hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Luftqualität zu erreichen [1]. Gerade in Ballungsräumen mit ihrer dichten Bebauung und hohen Bevölkerungs- und Verkehrsdichte¹ sind die Umweltbelastungen des Verkehrs spürbar. Es gilt daher gerade diese Verkehrsbelastungen weiter zu senken.

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) ist einerseits ein probates Mittel zur Verringerung der Verkehrsdichte, andererseits trägt er je nach verwendetem Verkehrsträger selber zu den innerstädtischen Lärm- und Schadstoffemissionen bei. Der ÖPNV hat am innerstädtischen Ver-

¹ 75 % der europäischen Bevölkerung leben in Ballungsräumen, 20 % aller Fahrten <15 km in der EU finden in Ballungsräumen statt, 10 % der CO_2 Emissionen der EU stammen aus dem städtischen Verkehr, Tendenz steigend

kehrsaufkommen in Deutschland einen durchschnittlichen Anteil von 15 %, mit Spitzenwerten von bis zu 25 %, wie z.B. in Frankfurt a.M. [9]. In Europa ist dieser Anteil eher noch höher. So hat z.B. in Zürich der ÖPNV einen Anteil von 37 %, in Budapest und Prag liegt er sogar bei über 50 % [10]. Ein wesentlicher Teil dieser Transportleistung wird mit Nahverkehrsbussen erbracht.

Um den drohenden innerstädtischen Verkehrsinfarkt zu vermeiden, ist es erklärtes Ziel der Städte und Gemeinden den ÖPNV auszuweiten. Damit steigt aber wiederum die Bedeutung des ÖPNV für die verkehrsbedingten Emissionen. Von den Kommunen wird daher der Einsatz verbrauchs- und emissionsarmer Fahrzeuge angestrebt. Der Dieselmotor stellt z.Zt. mit einem Marktanteil von 97 % [11] den Stand der Technik im Bereich der Busantriebssysteme dar. Eine Verringerung des Verbrauchs und der Emissionen bei dieselgetriebenen Nahverkehrsbussen wird über eine stetige Optimierung der Kraftstoffqualität und des Verbrennungsmotors sowie über die Entwicklung neuer Abgasnachbehandlungskonzepte verfolgt. Eine Option ist die Entwicklung und Erprobung alternativer Antriebe. Die gegenwärtig ausgereifteste und auch am häufigsten eingesetzte Alternative ist der Erdgasbus. Ein Vorteil des Gasverbrennungsmotors sind seine extrem niedrigen Partikelemissionen. Der verstärkte Einsatz von erdgasgetriebenen Fahrzeugen, vor allem in Flotten, wird von der öffentlichen Hand durch Demonstrationsprojekte und Förderprogramme unterstützt. Nichtsdestotrotz ist ihr Anteil mit weniger als 2 % am Fuhrpark der europäischen Busflottenbetreiber gegenüber dem Dieselmotor noch sehr gering.

Besondere Aufmerksamkeit finden seit einiger Zeit vor allem sogenannte „Nullemissionsfahrzeuge“ wie zum Beispiel Elektrofahrzeuge und neuerdings wasserstoffgetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge mit und ohne Hybridtechnik. Der schadstofffreie Betrieb und der hohe Wirkungsgrad der Brennstoffzelle (BZ) zum einen und der aus verschiedensten Ressourcen herstellbare Wasserstoff (H_2) zum anderen, machen die Brennstoffzelle als Antriebstechnologie langfristig zu einer aussichtsreichen Alternative für die Nahverkehrsbusse der nächsten Generation.

Um aber eine Aussage über die Umweltfreundlichkeit der Brennstoffzellentechnologie gegenüber den anderen verfügbaren oder ebenfalls in der Entwicklung befindlichen Antriebsformen treffen zu können, ist eine gesamtheitliche Betrachtung der einzelnen Bussysteme aus umweltlicher Sicht durchzuführen. Für einen aussagekräftigen Vergleich der unterschiedlichen Antriebstechnologien bietet sich die Lebenszyklusanalyse mit Hilfe der Methode der Ökobilanzierung an. Sie betrachtet nicht nur den eigentlichen Busbetrieb, sondern berücksichtigt zusätzlich die Kraftstoffproduktion- und -bereitstellung sowie die Fahrzeugherstellung und -entsorgung. Sie ermöglicht somit einen umfassenden, objektiven Vergleich der einzelnen Bussysteme. Wichtig dabei ist neben der Betrachtung der genannten Systemkomponenten die Berücksichtigung der Einsatzbedingungen. So schwanken z.B. der Verbrauch und die Emissionen eines Busses je nach Strecke auf der er eingesetzt wird. Die Kraftstoffbereitstellung stellt sich je Region bzw. Land ebenfalls unterschiedlich dar.

In zahlreichen Untersuchungen wurde bisher vorwiegend der Busbetrieb im Detail analysiert. Dabei stand schwerpunktmäßig der Dieselmotor bzw. der Dieselmotor im Vergleich zum Erdgasbus

im Fokus. Untersuchungen zu Brennstoffzellenbussen liegen bisher nur in sehr geringem Umfang vor. Es existiert zur Zeit kein integrierter Ansatz zur vollständigen ökologischen Lebenszyklusanalyse der einzelnen Bussysteme oder ganzer Busflotten, der es ermöglicht das Umweltprofil, den sogenannten ökologischen Fußabdruck, einer Antriebstechnologie oder Busflotte unter Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzbedingungen zu ermitteln. Ein solcher Ansatz ermöglicht, gemeinsam mit der Betrachtung der Lebenszykluskosten, die Ermittlung der optimalen Antriebstechnologie bzw. Busflottenzusammensetzung für den jeweiligen Einsatzfall aus ökologischer und ökonomischer Sicht.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Modell zur ökologischen Analyse und Optimierung von ÖPNV Bussen über den gesamten Lebenszyklus unter Berücksichtigung der jeweiligen lokalen Einsatzbedingungen zu erstellen. Hierzu baut die Arbeit auf der Methode der Ökobilanzierung und den Erkenntnissen aus den von der Europäischen Kommission geförderten Projekten CUTE und ECTOS² [12] auf. Die Berücksichtigung ökonomischer Aspekte soll weiteren Arbeiten zu diesem Thema vorbehalten bleiben.

Das Modell soll sich zunächst auf die Analyse der Diesel-, Erdgas- und Brennstoffzellenantriebstechnologie konzentrieren. Es ist jedoch so zu gestalten, dass eine Erweiterung um weitere Antriebstechnologien jederzeit möglich ist. Ausgehend von den jeweiligen lokalen Randbedingungen soll es Buserstellern wie Busflottenbetreibern mit Hilfe des Modells möglich sein, Aussagen zu treffen bezüglich des Umweltprofils einer einzelnen Antriebstechnologie oder einer kompletten Busflotte, bestehend aus einer beliebigen Kombination an untersuchten Antriebstechnologien. Das Modell kann damit auch zur entwicklungsbegleitenden Analyse bzw. der Optimierung von Bussystemen und –flotten eingesetzt werden.

Kapitel 2 legt zunächst die technischen und methodischen Grundlagen dieser Arbeit dar. Den Stand der Technik in der ökologischen Analyse und Bewertung von Bussystemen erläutert Kapitel 3. Die im Kapitel 4 formulierten Anforderungen an diese Arbeit bzw. an das Modell leiten sich aus den beiden vorausgehenden Kapiteln 2 und 3 ab. Die modulare Entwicklung des Modells findet in Kapitel 5 statt. Um dem Ziel der praktischen Anwendbarkeit gerecht zu werden, folgen in Kapitel 6 zwei Anwendungsbeispiele sowie die Verwendung des Modells zur Erstellung von Szenarien. Es beinhaltet außerdem noch eine Sensitivitätsanalyse und Fehlerabschätzung der Ergebnisse. Schließlich fasst Kapitel 7 die wichtigsten Punkte zusammen, erörtert die Möglichkeiten und Grenzen des Modells und schließt mit einem Ausblick auf weitere Handlungsfelder.

² Im Rahmen der beiden von der Europäischen Kommission geförderten Projekte CUTE (Clean Urban Transport for Europe) und ECTOS (Ecological City TranspOrt System) werden in zehn europäischen Städten jeweils drei BZ Busse im Rahmen einer zweijährigen Demonstrationsphase im Alltagsbetrieb getestet. Dabei gilt es, die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge und der an jedem Standort aufgebauten Wasserstoffinfrastruktur (teilweise mit Wasserstoff-erzeugung vor Ort) unter unterschiedlichsten klimatischen, topografischen und verkehrstechnischen Randbedingungen zu erproben. Insgesamt sind über 40 Partner aus Industrie und Forschung an diesen jeweils über vier Jahre dauernden Projekten beteiligt. Nähere Informationen zu den Projekten finden sich unter [13].

2 Grundlagen

Zunächst gilt es im folgenden Kapitel die Grundlagen des zu entwickelnden Modells zur ökologischen Analyse und Bewertung von Nahverkehrsbussystemen zu beschreiben. Zu Beginn werden die technischen Grundlagen des Systems Nahverkehrsomnibus in Kapitel 2.1 beschrieben. Mit den methodischen Grundlagen der Analyse komplexer Systeme beschäftigt sich Kapitel 2.2. Als grundlegender Bestandteil des in dieser Arbeit entwickelten Analysemodells wird im Anschluss die Ökobilanzierung näher erläutert. Die auf der Ökobilanzierung aufbauende Methode der ganzheitlichen Bilanzierung wird ebenfalls kurz in Kapitel 2.3 dargestellt. Zum besseren Verständnis erfolgt in Kapitel 2.4 die allgemeine Charakterisierung des zu untersuchenden Systems Nahverkehrsomnibus anhand einer Untergliederung in seine wesentlichen Bestandteile, auch Module genannt. Die Beschreibung der einzelnen Module mit ihren relevanten Parametern in den Kapiteln 2.5 bis 2.8 schließt das Grundlagenkapitel ab.

2.1 Technische Grundlagen des Systems Nahverkehrsomnibus

Mit einem Anteil von ca. 68 % bzw. 89 %³ an der Beförderungsleistung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) in Deutschland [14] bzw. Europa (EU15) [15] wird der Hauptanteil der Transportleistung von Omnibussen erbracht. Dabei kommen verschiedene Bussysteme zum Einsatz. Technologisch charakterisiert wird ein Bussystem über die Kombination der eingesetzten Antriebstechnologie und des verwendeten Kraftstoffs. Die integrierte Betrachtung von Antriebstechnologie und Kraftstoff ist von entscheidender Bedeutung, da sich das technische Verhalten (Leistung, Beschleunigung etc.), genauso wie das ökologische Verhalten, aus dem Zusammenspiel zwischen Antriebstechnologie und den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Kraftstoffes ergibt. Tabelle 2.1 enthält eine Übersicht über die einsetzbaren Antrieb/Kraftstoff-Kombinationen.

Tabelle 2.1 Kraftstoffe und Antriebstechnologien für Bussysteme

Antriebs- technologie Kraftstoff	Verbrennungs- motor	Elektro (E) - Motor	Brennstoffzelle (BZ) + E-Motor
Diesel/ Biodiesel	X	X ⁴	(X) ⁵
(Bio)Methanol/ (Bio)Ethanol	X		(X) ⁵
CNG/ LNG ⁶ / LPG	X		(X) ⁵
Biogas	X		(X) ⁵
Wasserstoff (H ₂)	X		X
Strom/ Batterie		X	

³ Inklusive Überlandbusse

⁴ Die Kombination konstant laufender Verbrennungsmotor und E-Motor wurde als Serienmodell angeboten [16] aufgrund mangelnder Nachfrage mittlerweile wieder eingestellt

⁵ Grundsätzlich ist es möglich, über eine sogenannte Onboard Reformierung alle kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffe in H₂ umzuwandeln

⁶ CNG – komprimiertes Erdgas, LNG – flüssiges Erdgas, LPG – Flüssiggas

Es ist hervorzuheben, dass im Verbrennungsmotor eine Vielzahl von Energieträgern direkt eingesetzt werden können, während der Brennstoffzelle die meisten Kraftstoffe, mit Ausnahme von Wasserstoff, nur über den Zwischenschritt der Reformierung zugänglich sind. Für jeden Kraftstoff sind jedoch spezifische Anpassungen des Motors, beispielsweise bei der Gemischbildung und -zündung erforderlich. Eine alternative Antriebstechnologie stellt der Elektromotor dar. Die benötigte elektrische Energie kann von extern über eine Stromoberleitung bezogen werden oder an Bord sowohl über eine Batterie gespeichert als auch mit Hilfe eines Verbrennungsmotors oder einer Brennstoffzelle erzeugt werden. Die Brennstoffzelle als Antrieb für Busse wie auch für andere Kraftfahrzeuge befindet sich momentan in der Entwicklung und ist auf längere Sicht als Alternative zum Verbrennungsmotor zu sehen. Erste Vorserienmodelle sind bereits verfügbar [17]. Die Hybridtechnologie, die die Rückgewinnung und Speicherung von Verlustenergie erlaubt, ist bei allen genannten Antriebsarten einsetzbar und kann einen zusätzlichen Beitrag zur Kraftstoffeinsparung leisten.

Um den Anteil an Kraftstoffen zu erhöhen, die sich auf erneuerbaren Energieträgern gründen, [19] wurden in den letzten Jahren entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen, z.B. mit dem Grün- und Weissbuch zur europäischen Verkehrs- und Energiepolitik [1], [2] oder auf deutscher Ebene durch Steuererleichterungen für Biokraftstoffe [18]. Dadurch sollte die Abhängigkeit von fossilen, zum Großteil importierten Energieträgern verringert und zugleich die klimaschädlichen CO₂ Emissionen reduziert werden [20]. Gerade der Kraftstoff Wasserstoff lässt sich, wie aus Abbildung 2.1 ersichtlich ist, aus einer Vielzahl unterschiedlicher erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energieträger gewinnen. Eingesetzt in einer Brennstoffzelle, entstehen bei der energetischen Umwandlung von Wasserstoff außer Wasser bzw. Wasserdampf keine stofflichen Emissionen. Diese Tatsache macht die Kombination Wasserstoff / Brennstoffzelle interessant. Neben der Verbreiterung der Energieträgerbasis wird ein Beitrag zur Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen in Ballungsräumen geleistet.

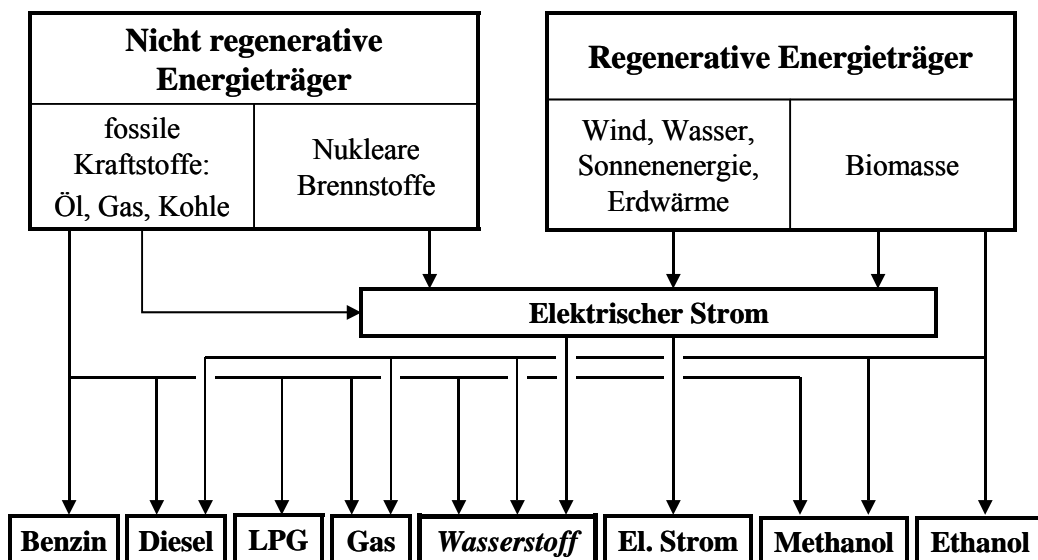


Abbildung 2.1 Herstellungsketten für Kraftstoffe

Detaillierte technische Beschreibungen der entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit untersuchten Bussysteme Diesel-, Erdgas- und Brennstoffzellenbus finden sich im Anhang A. Die Eigenschaften der Kraftstoffe werden in Anhang B aufgeführt.

2.2 Methodische Grundlagen der Analyse komplexer Systeme

Die methodischen Grundlagen für diese Arbeit bilden die Systemanalyse, die Stoff- und Energiestromanalyse als eine Untermethode der Systemanalyse und die darauf aufbauenden Methoden der Ökobilanzierung und der Ganzheitlichen Bilanzierung.

Systemanalyse

Die Systemanalyse, wie sie z.B. von Gabriel [21] oder Krüger [22] erläutert wird, bietet, abhängig von Aufgabenstellung und Einsatzbereich, geeignete Denkmodelle und -methoden zum Verstehen und Beherrschen komplexer technischer Systeme an. Durch die Unterteilung des zu untersuchenden Systems in seine Elemente werden die Wechselwirkungen untereinander und mit der Umwelt erkennbar [23], [24]. Durch die Untergliederung des Systems in Elemente bzw. Subsysteme, die ihrerseits aus Subsystemen bestehen können, kommt der Festlegung des Betrachtungsrahmens, also der Definition von Systemgrenzen⁷, und der Festlegung des Detaillierungsgrades der Analyse entscheidende Bedeutung zu [22]. Systemgrenze sowie Detaillierungsgrad richten sich nach dem Ziel bzw. Zweck der Untersuchung.

Wesentliches Merkmal der Systemanalyse ist die Benutzung von Modellen, die durch mathematische Abstrahierung die Struktur und funktionellen Abhängigkeiten in komplexen Systemen effizient beschreiben [25], [26]. Laut VDI Richtlinie 3633 ist "Ein Modell eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. ..." [26]. Durch die möglichst genaue Abbildung des untersuchten Systems ist es dem Modellierer möglich, durch Variation unterschiedlicher Modellparameter das Verhalten des Systems theoretisch zu untersuchen, ohne real in das System eingreifen zu müssen [27]. Dabei ist zwischen anschaulich-ikonischen und abstrakt-symbolischen Modelltypen zu unterscheiden. Mathematische Modelle gehören zur zweiten Gruppe. Modelltypen aus dieser Gruppe sind beispielsweise Optimierungs- und Simulationsmodelle. Optimierungsmodelle haben zum Ziel, einen Satz von Parametern zu finden, mit dem das bestmögliche Systemverhalten erreicht wird [28]. Hierbei verwenden sie analytische und numerische Verfahren. Mit diesen lassen sich in der Praxis komplexe Systeme aufgrund bestehender nicht-linearer Beziehungen meist nicht vollständig beschreiben. Hingegen erlauben, heutzutage meist rechnergestützt, Simulationsmodelle die Analyse des Einflusses einzelner Parameter auf das Systemverhalten. Ziel der Simulation ist die vereinfachte, aber korrekte Nachbildung des realen Verhaltens eines Systems. Es kann durch Simulation die Frage „was passiert wenn?“ mit Hilfe beliebig vieler Parametervariationen beantwortet werden. Daher wird die Simulation als geeignetes Modell für die Beantwortung der Fragestellung dieser Arbeit ausgewählt. Erwäh-

⁷ Die Systemgrenze definiert die Schnittstellen zwischen System und seiner Umwelt

nenswert ist noch, dass ein Optimum aufgrund des heuristischen Ansatzes bei der Simulation, wenn überhaupt, nur über iteratives Vorgehen gefunden werden kann [29].

Stoff- und Energiestromanalyse

Die ganzheitliche Analyse und Bewertung eines Systems beinhaltet die gleichzeitige Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und umweltlicher Größen. Als Grundlage für solch eine integrierte Betrachtung sind Energie- und Stoffstromanalysen geeignet [30]-[34]. Mit dieser Methode lassen sich beliebig komplexe Stoffstromnetzwerke abbilden [35]. Je nach Detaillierungsgrad können die stofflichen bzw. energetischen Ein- und Ausgangsströme entweder des Gesamtsystems oder einzelner Teilsysteme / Prozesse innerhalb des Systems dargestellt werden. (siehe Abbildung 2.2)

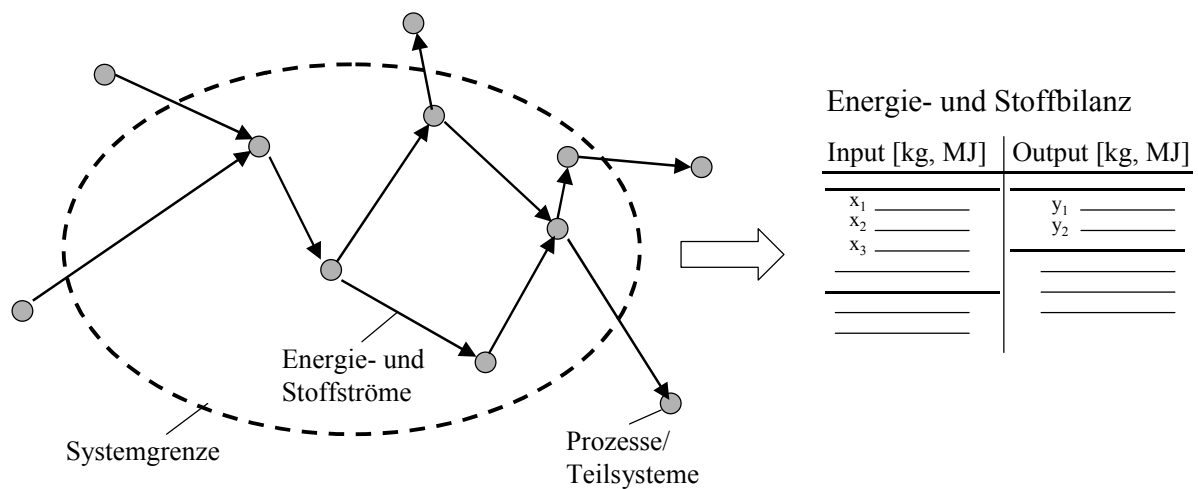


Abbildung 2.2 Energie- und Stoffstrommodelle und –bilanzen nach [21]

Vertiefende Ausführungen zum Thema Energie- und Stoffstromanalysen finden sich in [21]. Gerade für die Betrachtung der Umweltauswirkungen eines Systems hat sich die Energie- und Stoffstromanalyse in Form einer Prozesskettenanalyse bewährt. Darauf aufbauend wurden die Methoden der Ökobilanzierung und Ganzheitlichen Bilanzierung entwickelt. Diese beiden Ansätze bilden eine wesentliche Grundlage des in Kapitel 5 entwickelten Modells zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung von Nahverkehrsbussystemen und werden nachfolgend näher erläutert.

2.3 Ökobilanzierung und Ganzheitliche Bilanzierung

An dieser Stelle werden die wichtigsten Punkte der Methoden der Ökobilanzierung und der Ganzheitlichen Bilanzierung dargestellt. Zum Themenkomplex Ökobilanz und Ganzheitliche Bilanzierung existieren eine Vielzahl von Veröffentlichungen, so dass für detailliertere Ausführungen auf Eyerer [31] sowie für weiterführende Literatur auf [36]-[41] verwiesen wird.

Grundsätzlich ist die Ökobilanz als Werkzeug zu verstehen, mit dessen Hilfe Umwelteffekte von Produkten, Systemen oder Dienstleistungen quantifiziert werden können. Dabei ist der gesamte Lebenszyklus analytisch zu betrachten.

Der entscheidende Unterschied zwischen Ökobilanz und Ganzheitlicher Bilanzierung besteht in der Erweiterung der Kriterien um die Dimensionen Ökonomie und Technik. Somit wurde eine Methode definiert, welche sich entsprechend der Rahmenbedingungen in Ablauf, Struktur und Modellierung nach der Ökobilanz richtet. Dadurch stellt sie ein Entscheidungswerkzeug dar, das den Themenkomplex Umwelt gleichberechtigt neben den klassischen Entscheidungskriterien technische Machbarkeit und Kosten berücksichtigt.

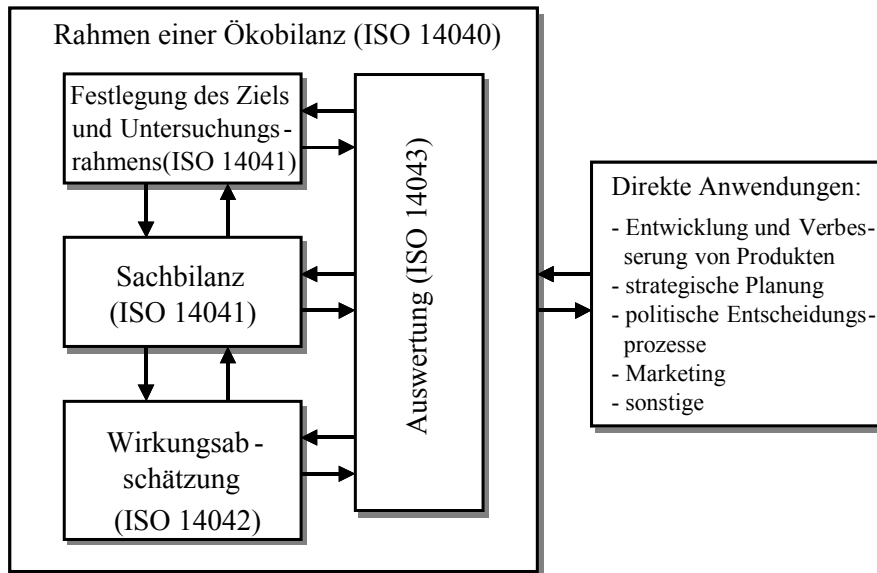


Abbildung 2.3: Rahmen und Bestandteile einer Ökobilanz, nach [42]

Abbildung 2.3 zeigt den Ablauf von Ökobilanzen und Ganzheitlichen Bilanzierungen, der sich nach den Normen ISO 14040 [42], 14041 [43], 14042 [44] und 14043 [45] richtet.

2.3.1 Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Generelle Ziele einer Ökobilanz sind die Analyse des Lebenszyklus eines Produktes zum Aufdecken ökologischer Schwachstellen oder der ökologische Vergleich alternativer Produkte oder Systeme. Auch die Analyse einzelner Lebenszyklusabschnitte ist mit entsprechender Zieldefinition möglich. Folgende Punkte müssen nach ISO 14041 [43] definiert sein:

- ◆ Funktion des zu untersuchenden Systems und die funktionelle Einheit
- ◆ Grenzen des Produktsystems, Einschränkungen und Abschneidekriterien
- ◆ Anforderung an verwendete Daten und deren Qualität
- ◆ beabsichtigte Aussagen und Wahl der Ergebnisdarstellung

Auf Basis dieser Festlegungen und Beschreibungen ist die Sachbilanz des betrachteten Systems durchzuführen.

2.3.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz umfasst nach ISO 14041 [43] sowohl die Datenaufnahme als auch die Modellierung des in der Zieldefinition beschriebenen Systems. Die Sachbilanzmodellierung ist Grundlage der ökologischen Analyse in Kapitel 5. Das Modell einer Sachbilanz gliedert sich in Einzelprozesse, die in aufaggeregierter Form das Sachbilanzergebnis für den definierten Systemraum liefern. Jeder Prozess besteht input- und outputseitig aus einer Reihe von Massen- und Energieströmen, sogenannten Flüssen, die jeweils mit einer bestimmten Mengenangabe versehen sind. Die Flüsse können entweder Elementar- oder Nicht-Elementarflüsse sein. Ein Elementarfluss ist dabei nach ISO 14040 [42] ein Fluss, welcher der Ökosphäre ohne jede Behandlung entnommen wird oder in sie eingeht. Beispiele hierfür sind Ressourcen und Emissionen. Nicht-Elementarflüsse sind entsprechend Flüsse, die nicht in die Ökosphäre eingehen wie z.B. Wertstoffe.

2.3.3 Wirkungsabschätzung oder Wirkbilanz

Die mit Hilfe der Sachbilanz quantifizierten Elementarflüsse können input- wie outputseitig bestimmte Effekte auf die Umwelt haben. Mit Hilfe der Wirkungsabschätzung erfolgt eine Informationsverdichtung der Sachbilanzergebnisse. Ziel ist es, die Menge der Sachbilanzdaten auf ein übersichtliches und aussagekräftiges Maß zu reduzieren und darzustellen.

Die Vorgehensweise zur Erstellung von Wirkungsabschätzungen beschreibt die ISO 14042 Norm [44]. Sie umfasst folgende Schritte:

- ◆ Klassifizierung
- ◆ Charakterisierung
- ◆ Normalisierung (optional)
- ◆ Gewichtung

Die Klassifizierung bestimmt die Zuordnung einer Sachbilanzgröße zu einem bestimmten Umwelteffekt. Die Charakterisierung legt über einen numerischen Faktor die Höhe des Beitrags der Sachbilanzgröße zu dem entsprechenden Umwelteffekt fest. Die Wahl der Wirkungskategorien und damit die Auswahl der dargestellten Umwelteffekte aus der Sachbilanz müssen in Übereinstimmung mit der Zieldefinition erfolgen. Sollen mehrere Umweltkategorien zusammengefasst werden, müssen die Wirkungskategorien normalisiert werden und gegebenenfalls gewichtet bzw. ungewichtet zu einem Einpunktwert aufsummiert werden.

2.3.4 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Die Auswertung hat zum Ziel, die Ergebnisse der Sachbilanz und/oder der Wirkungsbilanz(en) zusammenzufassen. Die ISO 14043 [45] definiert die Anforderungen zur Auswertung und Darstellung solcher Ökobilanzergebnisse. Die Interpretation der Ergebnisse überprüft einerseits, ob die festgelegten Zieldefinitionen erreicht wurden, andererseits können die Ergebnisse in

Schwachstellenanalysen und andere Analyse-, Bewertungs- oder Optimierungsmethoden einfließen.

2.4 Charakterisierung des betrachteten Systems Nahverkehrsomnibus

Bevor die Grundlagen und der Stand der Technik zur Analyse und Bewertung von Omnibussystemen in Kapitel 2.5 bis 2.8 bzw. Kapitel 3 dargelegt werden, erfolgt zunächst die Charakterisierung des untersuchten Systems anhand einer Unterteilung in seine Hauptkomponenten. Dies geschieht im Vorgriff auf Kapitel 5, um ein besseres Verständnis der Arbeit zu ermöglichen. Bei der Betrachtung des zu untersuchenden Systems Nahverkehrsomnibus und in Anlehnung an bereits durchgeführte Arbeiten zur Untersuchung von Verkehrssystemen [38], [22], [46] [159], [147], [71], [59] ergibt sich die in Abbildung 2.4 dargestellte Struktur des Modells. Entsprechend der Methode der Ganzheitlichen Bilanzierung erfolgt eine Unterteilung des Systems in die drei Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung. Dabei lässt sich das System, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, entsprechend den Hauptsystemkomponenten in vier Module unterteilen:

1. Fahrzeugherstellung,
2. Kraftstoffbereitstellung (einschließlich Distribution),
3. Fahrzeugbetrieb und
4. Fahrzeugverwertung/-entsorgung

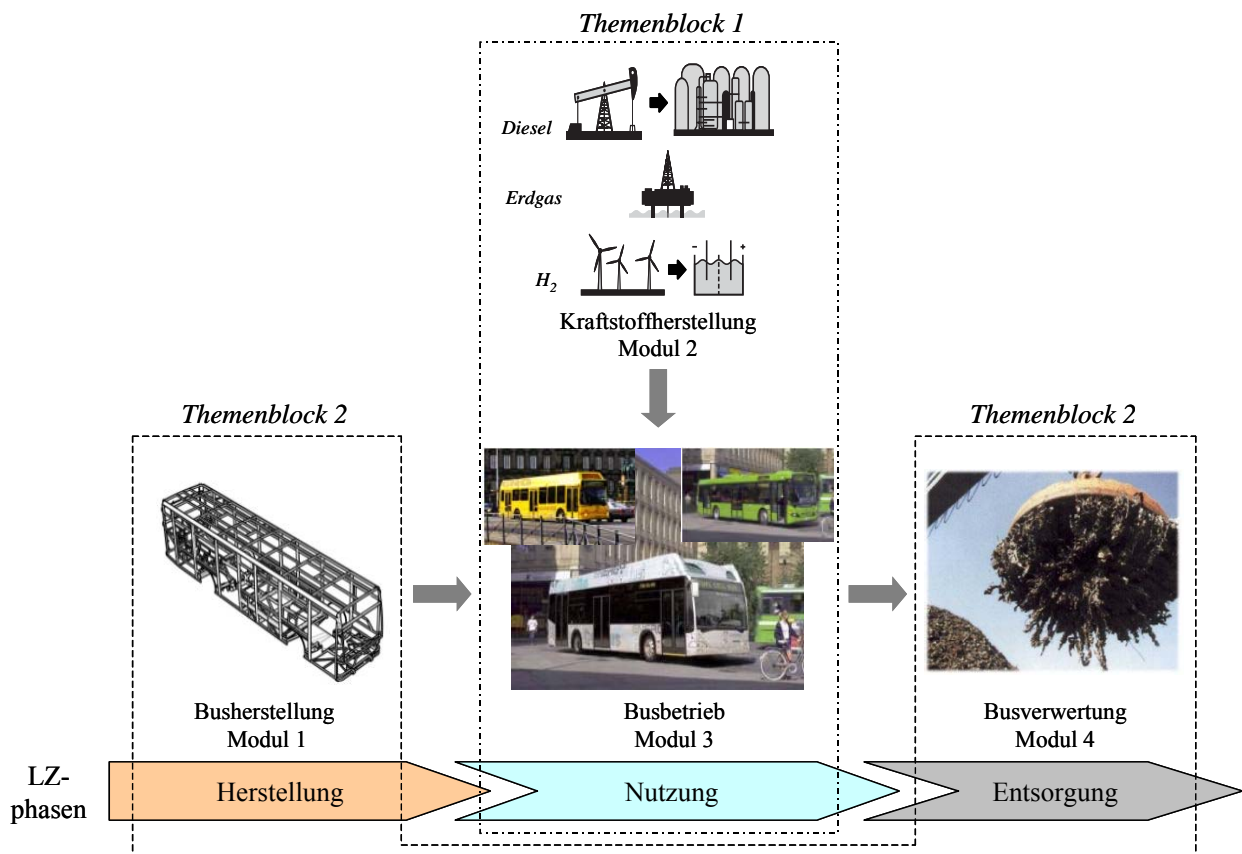


Abbildung 2.4 Komponenten des Systems Nahverkehrsomnibus

Es werden jeweils zwei Module zu einem Themenblock zusammengefasst [159]. Der erste Block ist der vorwiegend aus ÖPNV Betreibersicht relevante Block der Nutzungsphase, bestehend aus Kraftstoffbereitstellung und Busbetrieb (Module 2 und 3). Die Grundlagen hierfür werden in den folgenden Kapiteln 2.5 und 2.6 beschrieben. Der zweite Block beschäftigt sich mit dem Fahrzeug und besteht aus den eng miteinander verknüpften Modulen 1 und 4, Fahrzeugherstellung und –verwertung. In der Fertigung des Fahrzeuges werden bereits die wesentlichen Verwertungs- und Entsorgungspfade durch die Materialwahl und die verwendete Fügetechnik weitgehend definiert. Die Grundlagen für diesen vorwiegend für den Hersteller interessanten Block behandeln Kapitel 2.7 und 2.8.

2.5 Busbetrieb

Die unmittelbaren Auswirkungen eines Verkehrsträgers sind in erster Linie während des Betriebes der Fahrzeuge wahrnehmbar, sei es aus ökologischer Sicht durch die bei der Kraftstoffumsetzung entstehenden Emissionen, aus energiepolitischer Sicht durch den Verbrauch nicht erneuerbarer, importierter Ressourcen oder aus wirtschaftlicher Sicht durch die Kosten für die verbrauchten Kraft- und Betriebsstoffe, Wartung etc. Daher sind zunächst die Energie- und Stoffströme der Nutzungsphase zu untersuchen. Abbildung 2.5 stellt diese dar.

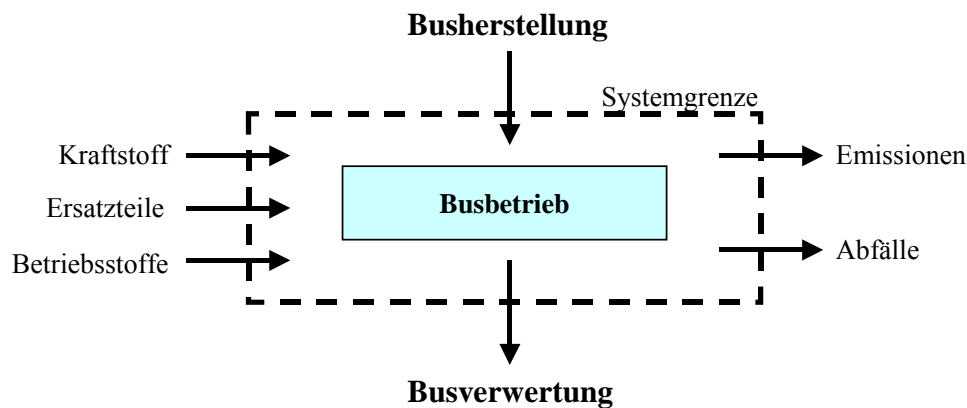


Abbildung 2.5 Stoff- und Energieströme der Nutzungsphase

Für die Analyse der Nutzungsphase von Bussen und Verkehrsträgern im allgemeinen sind, abhängig vom Untersuchungsrahmen unterschiedliche Sachbilanzdaten erforderlich. Die Daten für Kraftstoffverbrauch und Emissionen von Kfz können im Verkehrswesen auf unterschiedliche Weise erfasst werden:

1. Durch konkrete *Kraftstoff- und Emissionsmessungen*. Die Vorgehensweise bei diesen Messungen werden in Kapitel 2.5.1 beschrieben.

Die messtechnische Ermittlung von Verbrauchs- und Emissionsdaten erscheint für spezifische Busse auf einer einzelnen Route innerhalb einer Stadt aufwendig, aber machbar. Soll sich die Analyse aber auf mehrere Busse mit derselben oder unterschiedlichen Antriebstechnologien und zusätzlich noch mit unterschiedlichen Abgasnormen beziehen und dann eventuell noch auf das gesamte Routennetz einer Stadt ausgeweitet werden, so ist schnell

erkennbar, dass die Ermittlung von konkreten Messdaten, gerade für Emissionen, sehr aufwendig und teuer und damit schwierig wird. Für diesen Fall stellt folgende Methode eine Alternative dar.

- Die Verwendung von *Emissionsfaktoren*. Basierend auf einer Vielzahl von Einzeluntersuchungen werden für die einzelnen Fahrzeugkategorien (z.B. Linienbusse), gruppiert nach Antriebstechnologien und Abgasnormen, Emissionsfaktoren ermittelt. Aus diesen Emissionsfaktoren lassen sich Emissionsfunktionen ableiten, die es erlauben, wiederum Emissionsfaktoren für ein breiteres Einsatzspektrum bereitzustellen, also auch für Betriebszustände der Fahrzeuge, die eventuell nicht durch Messungen erfasst wurden. Dabei sind verschiedene Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Diese werden in Kapitel 2.5.2 näher erläutert.

2.5.1 Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsmessungen

Zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauches und der Emissionen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Nach DIN 70030 erfolgt die Verbrauchsmessung für schwere Nutzfahrzeuge auf einer ebenen ($\pm 1,5\%$ Steigung) Prüfstrecke von ca. 10 km Länge bei halber Beladung und $\frac{3}{4}$ der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Um detailliertere, zeitaufgelöste Verbrauchs- und Emissionsdaten zu erhalten, besteht die Möglichkeit, ein Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand vorgegebene, möglichst realitätsnahe Fahrzyklen nachfahren zu lassen. Hierzu werden entsprechend dem gewählten Zyklus Lastprofile simuliert. Und schließlich kann eine Verbrauchsmessung über das Abfahren konkreter Routen bzw. Zyklen im Feld erfolgen. Ein Beispiel für einen häufig verwendeter Rollenprüfstandszyklus ist der vom Gesetzgeber für Abgasnormzertifizierung vorgegebene ETC (European Transient Cycle) oder für einen realen Straßenzyklus der von der UITP entwickelte SORT Zyklus (siehe Abbildung 2.6).

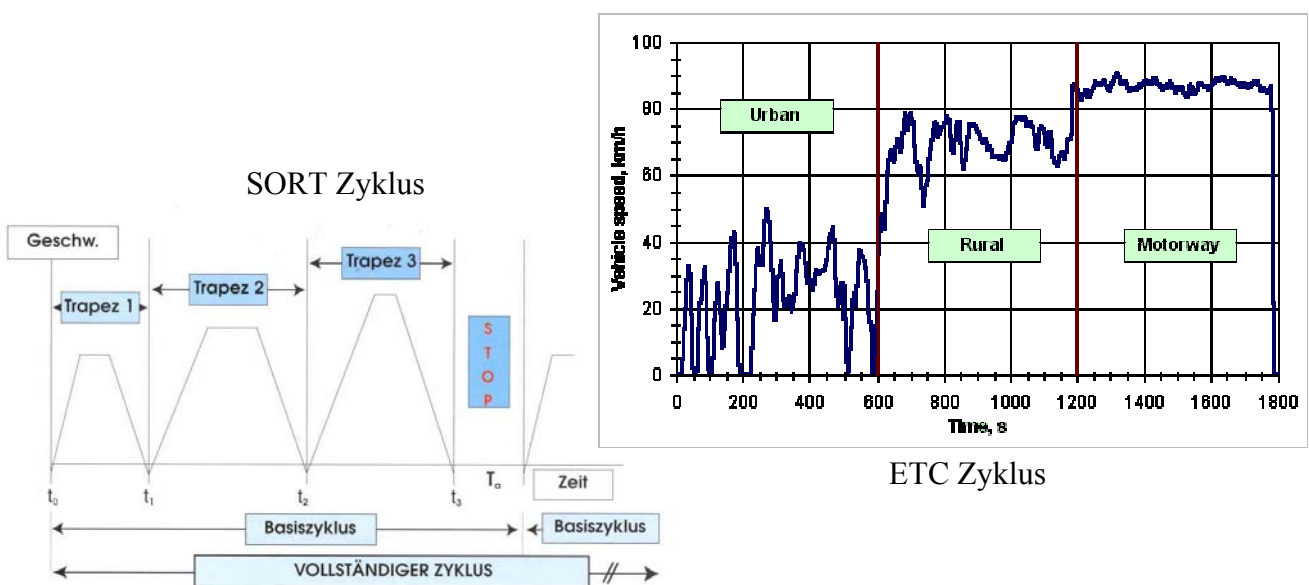


Abbildung 2.6 ETC und SORT Fahrzyklen [126], [127]

Mehr Informationen zu Fahrzyklen und den Verbrauchsmessmethoden im Allgemeinen befinden sich im Anhang C.1. Eine Übersicht über die Ergebnisse konkret durchgeführter Verbrauchs- und Emissionsmessungen bei Bussen gibt Kapitel 3.3.1.

Für bestimmte Emissionen aus verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeugen bestehen je nach Fahrzeugkategorie gesetzliche Grenzwerte. In der Abgasgesetzgebung werden die Grenzwerte und die Prüfmethode entsprechend festgelegt (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2 Emissionsgrenzwerte nach Euro-Norm für Nutzfahrzeuge der Klasse N1 [7]

	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3		Euro 4/5	
	88/77/EWG	91/542/EWG		1999/96/EG			
	seit 1988/90	ab 1992/93 1. Stufe	ab 1995/96 2. Stufe	ab 2000		ab 2005/2006 bzw. 2008/2009*)	
			ESC- und ELR-Test ¹⁾	ETC-Test ^{2) 3)}	ESC- und ELR-Test ¹⁾	ETC-Test ^{2) 3)}	
	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh
CO	12,3	4,9	4,0	2,1	5,45	1,5	4,0
HC	2,6	1,23	1,1	0,66		0,46	—
NMHC	—	—	—	—	0,78		0,55
Methan	—	—	—	—	1,6 ⁴⁾		1,1 ⁴⁾
NO _x	15,8	9,0	7,0	5,0	5,0	3,5 / 2,0*)	3,5 / 2,0*)
Partikel	—	0,4	0,15	0,1	0,16 ⁵⁾	0,02	0,03 ⁵⁾
Ruß	—	—	—	0,8 m ⁻¹	—	0,5 m ⁻¹	—

¹⁾ geändertes / verschärftes Prüfverfahren für alle Dieselmotoren

²⁾ zusätzlicher Transienten-Test für Dieselmotoren mit Abgasnachbehandlungssystem

³⁾ Für Gasmotoren nur Transient-Test

⁴⁾ Nur für Erdgasmotoren

⁵⁾ Nur für Dieselmotoren

^{*} Bei Euro 5 (ab 2008/09) wird nur der NO_x-Grenzwert von 3,5 auf 2,0 g/km herabgesetzt

Gegenwärtig gilt in Europa für schwere Nutzfahrzeuge, worunter Fahrzeuge ab 3,5 t bzw. mit einer Beförderungskapazität ab neun Personen fallen, die Euro 3 Norm und ab Oktober 2005 die Euro 4 Norm für Serienfahrzeuge. Für erstmalig zuzulassende Neufahrzeuge ist sie ab Anfang 2006 verpflichtend.

Mit der Euro 3 Stufe wurde ein dreiteiliges Prüfverfahren, das mit dem Inkrafttreten von Euro 4 verpflichtend wird, eingeführt. Es besteht aus einem stationären 13 Punkte Test (ESC), einem Abgastrübungstest (ELR) und einem dynamischen Abgastest (ETC). Da sämtliche Tests auf dem Motorenprüfstand durchgeführt werden, sind die Emissionen auf die über die Kurbelwelle abgegebene mechanische Energie (g/kWh) bezogen. Um gemessene, fahrwegsbezogene Emissionsdaten, also Emissionen in g/km, zu erhalten, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen sind das, analog zu den Verbrauchsmessungen, Rollenprüfstandsversuche, bei denen entweder der ETC Testzyklus oder andere Zyklen durchfahren werden und zum anderen Messungen bei Straßenfahrten auf realen Zyklen. Für weiterführende Informationen wird auf den Anhang C dieser Arbeit oder auf z.B. [58] verwiesen.

2.5.2 Einflussfaktoren auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen

Mathematisch lassen sich der Gesamtverbrauch und Gesamtemissionen einer Fahrzeugflotte entsprechend Gleichung 2.1 und Gleichung 2.2 darstellen:

$$MKr_q = \sum_i \sum_j mKr_{q,j} * A_{j,AT_i} \quad \text{Gleichung 2.1}$$

$$E_{SS} = \sum_i \sum_j e_{SS,j,AT} * A_{j,AT_i} \quad \text{Gleichung 2.2}$$

mit: MKr_q = Verbrauch des Kraftstoffes q

$mKr_{q,j}$ = spezifischer Verbrauch des Kraftstoffes q je Abgasnorm j einer Antriebstechnologie AT_i

A_{j,AT_i} = Aktivitätsrate der Abgasnorm j einer Antriebstechnologie AT_i (z.B. Fahrleistung (FL) in km)

E_{SS} = Menge einer emittierten Substanz SS

e_{SS,j,AT_i} = spezifischer Emissionsfaktor einer Substanz SS je Abgasnorm j einer Antriebstechnologie AT_i

Der spezifische Verbrauch ist eine entscheidende wirtschaftliche Größe beim Betrieb von Omnibusflotten und beeinflusst auch die spezifischen Emissionen. Der Verbrauch wie auch die Emissionen hängen von einer Reihe unterschiedlicher Einflussfaktoren ab. Sie sind abhängig von der benötigten Leistung zur Überwindung des Fahrwiderstandes und lassen sich zwei Hauptgruppen zuordnen:

- ◆ Antriebstechnologiespezifische Parameter
- ◆ Einsatzbedingte Parameter (antriebsunspezifisch).

Antriebsspezifische Parameter sind z.B. die verwendete Antriebs-/Motorentechnologie. Daraus ergibt sich meist auch der eingesetzte Kraftstoff, das Antriebs- bzw. Fahrzeuggewicht. Weitere Parameter sind die Laufleistung, bei Verbrennungsmotoren außerdem noch der Hubraum, das Baujahr und daraus abgeleitet die Abgasnorm.

Die Einsatzparameter ergeben sich aus dem Fahrzustand (Geschwindigkeit), dem Luftwiderstand, der Beladung, dem Motorbetriebszustand (Voll- oder Teillast), der Außentemperatur (Nebenverbraucher Heizung - Klimaanlage), der Straßenlängsneigung und der Höhe (ü. N.N.)

Um nun realitätsnahe Verbrauchs- und Emissionsfunktionen zu erhalten, gilt es den Einfluss dieser Parameter entsprechend der Vorgehensweise der Systemanalyse (siehe Kapitel 2.2) bei vertretbarem Aufwand mathematisch so genau wie möglich für die einzelnen Antriebstechnologien abzubilden. Während in Kapitel 5.5 die funktionalen Zusammenhänge im einzelnen detailliert untersucht werden, beschreibt der folgende Abschnitt die dafür erforderlichen Grundlagen.

Kraftstoffverbrauch

Nach DIN 70030 [62] errechnet sich der Streckenverbrauch⁸ entsprechend Gleichung 2.3.

$$B_e = \frac{\int b_e \cdot \frac{1}{\eta_u} \left[\left(m \cdot f \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 \right) + m (a + g \cdot \sin \alpha) + B_r \right] \cdot v \cdot dt}{\int v \cdot dt}$$

Strecke
Gleichung 2.3

Die Gleichung zeigt die lineare Abhängigkeit des Verbrauchs von der Masse m und damit auch von der Beladung. Die Abhängigkeit des Verbrauchs von der Steigung α wird als Summand angegeben, der mit dem Sinuswert der aktuellen Steigung größer bzw. kleiner wird. Die Steigung fließt weiterhin in den Rollwiderstand mit ihrem Kosinuswert ein. Die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ist quadratisch. Außerdem geht die Fahrzeuggeometrie über den c_w -Wert und über die Fläche der Front mit in den Streckenverbrauch ein.

Allgemeine weiterführende Informationen stellen z.B. [62], [47] und [22] zur Verfügung.

Emissionen

Neben dem Kraftstoffverbrauch, der in dieser Arbeit mit „mKr“ für Masse des Kraftstoffs abgekürzt wird, entscheidet die Art und Menge der Emissionen über das Umweltprofil des Betriebes eines Fahrzeugs bzw. einer Fahrzeugflotte. Wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit erwähnt, wird ihnen teilweise eine signifikante Umwelt- und Gesundheitswirkung zugeschrieben. Bei der motorischen Verbrennung fossiler Treibstoffe wie Diesel oder Erdgas entstehen neben den Endprodukten Wasser und Kohlendioxid weitere Substanzen, die als Luftverunreinigungen wirken. Dies sind überwiegend Stickstoffoxide, Partikel, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe. Die Liste der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Emissionen wird in Kapitel 5.1.5 definiert.

Entsprechend der Abgasgesetzgebung (siehe Kapitel 2.5.1) werden die Emissionen in limitierte und nichtlimitierte Emissionen unterschieden. Nichtlimitierte Emissionen unterliegen keiner direkten gesetzlichen Regulierung, sind aber teilweise indirekt als Bestandteil einer übergeordneten Emissionsgruppe limitiert. So ist z.B. Benzol nicht limitiert. Jedoch dürfen die Nichtmethan-kohlenwasserstoffe NMHC, zu denen Benzol laut [63] etwa 1,7 % an den Emissionen aus der Dieselerbrennung beiträgt, z.B. bei Euro 4 und Euro 5 den Grenzwert von 0,55 g/kWh nicht überschreiten (siehe Tabelle 2.2).

⁸ Im Stillstand befindet sich der Motor im Leerlauf. Da keine Strecke zurückgelegt wird geht der Streckenverbrauch entsprechend der Formel gegen unendlich. Anstelle des Streckenverbrauchs ist also für den Fall $v=0$ der Leerlaufverbrauch zu berücksichtigen. Er wird in l/h angegeben.

Bei den Emissionen sind nach [74] neben den genannten Einflussfaktoren auf den Normalbetrieb mit warmem Motor prinzipiell noch zwei weitere Quellgruppen zu berücksichtigen, die jedoch für Nahverkehrsomnibusse eine eher untergeordnete Rolle spielen:

- ◆ Verdampfungsemissionen und
- ◆ Kaltstartemissionen.

Verdampfungsemissionen ergeben sich entsprechend dem Namen aus Verdampfungsvorgängen von Kraftstoffen im Tanksystem. Das Tanksystem muss aufgrund des Druckanstieges entlüftet werden und dabei gelangen die Kraftstoffdämpfe in die Umwelt. Diese Phasenübergangsvorgänge können nur bei flüssigen Kraftstoffen mit entsprechend leichtflüchtigen⁹ Komponenten auftreten. Dies ist praktisch ausschließlich bei Ottokraftstoffen der Fall. Die verdampfenden Komponenten bestehen aus Kohlenwasserstoffen. Für Dieselmotoren sind aufgrund der fehlenden leichtflüchtigen Komponenten die Verdampfungsemissionen vernachlässigbar [74].

Die Kaltstartemissionen entstehen auf den ersten Kilometern mit kaltem Motor, d.h. der Motor ist vor dem Anlassen mehr als acht Stunden gestanden, bis die Abgasreinigungskomponenten die für ihre Funktion erforderliche Betriebstemperatur erreicht haben. Während man die Kaltstartemissionen für Pkw sehr detailliert untersucht [74] und Kaltstartemissionsfaktoren entwickelt hat, wurden solche Untersuchungen für Busse bzw. schwere Nutzfahrzeuge im Allgemeinen kaum durchgeführt. Dies hat möglicherweise auch damit zu tun, dass die vorgeschriebenen Abgasuntersuchungstests laut Gesetzgeber, zumindest in Europa und Japan, mit warmem Motor durchgeführt werden [58]. Außerdem kann bei dem Nutzungsverhalten von Bussen von einer reduzierten Relevanz des Kaltstarts ausgegangen werden, da im Gegensatz zu Pkw mit ihrem teilweise doch signifikanten Anteil an Kurzstrecken, ein Nahverkehrsbus nach dem Anlassen für gewöhnlich sechs bis acht Stunden oder länger mit betriebswarmem Motor im Einsatz ist.

Aus den genannten Gründen werden Verdampfungs- und Kaltstartemissionen im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt

Einen unmittelbaren, teilweise sehr wesentlichen Einfluss auf die Betriebsemissionen haben Abgasnachbehandlungssysteme. Bei Dieselmotoren muss nach [64] im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge, zu denen auch Linienbusse gehören, damit gerechnet werden, dass ab Einführung der Euro 4-Abgasnorm im Jahr 2005 Abgasnachbehandlungssysteme zur Einhaltung der Grenzwerte notwendig werden. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, werden verschiedene Abgasbehandlungssysteme und ihr Einfluss auf den Verbrauch und die Emissionen von Linienbussen im nachfolgenden Abschnitt betrachtet. Dabei werden hier drei Typen berücksichtigt.

⁹ leichtflüchtig bedeutet in diesem Fall Komponenten mit niedrigen Siedetemperaturen. Die zur Verdampfung erforderlichen Temperaturen können sich zum einen durch Sonneneinstrahlung auf ein geparktes Fahrzeug (Tankatmung) und/oder durch Abstellen mit warmem oder heißem Motor ergeben. Heutzutage werden Aktivkohlefilter in die Tankentlüftungssysteme eingebaut, die die Verdampfungsemissionen von Kohlenwasserstoffen um bis zu 95 % reduzieren [147]

Abgasnachbehandlungssysteme

- ◆ CRT-Partikelfilter (CRT = Continuously Regenerating Trap)
Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus Partikelfilter und Oxidationskatalysator. Der Katalysator sorgt für eine effiziente Oxidation von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid. Der im Partikelfilter abgeschiedene Ruß wird kontinuierlich oxidiert. Oxidationsmittel ist NO₂, das im vorgeschalteten Oxidationskatalysator aus NO gebildet wird. Voraussetzung für den Einsatz eines CRT-Partikelfilters ist die Verwendung von Kraftstoff mit max. 10 ppm Schwefel. Ansonsten lagert sich der Schwefel auf dem mit Platin beschichteten Katalysator ab und blockiert die Reaktion. Die Reduktionsfaktoren für ausgewählte Emissionen fasst Tabelle 2.3 zusammen.
- ◆ SCR-Verfahren (SCR = Selective Catalytic Reduction)
Bei dieser von der Mehrheit der Nutzfahrzeughersteller favorisierten Variante zur Einhaltung der Euro 4- und Euro 5-Norm wird Harnstofflösung in das Abgassystem eingespritzt. Bei Temperaturen ab 200°C zersetzt sich der Harnstoff in die Bestandteile Ammoniak und CO₂. Das im Abgas enthaltene NO und NO₂ reagiert mit dem Ammoniak zu Stickstoff und Wasser mit geringen Anteilen von Lachgas (N₂O).
- ◆ SCRT-Verfahren (SCRT = Selective Catalytic Reduction Trap)
Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus den beiden oben beschriebenen Verfahren CRT und SCR. Da sich das System noch in der Entwicklung befindet, sind noch keine verlässlichen Reduktionsfaktoren verfügbar.

Tabelle 2.3 fasst die von Herstellern und in Studien angegebenen Reduktionspotentiale bezogen auf Euro 2 und Euro 3 Dieselbusse für CRT und SCR System zusammen.

Tabelle 2.3 Reduktionspotentiale verschiedener Abgasnachbehandlungssysteme [64], [66], [67], [69]

Schadstoff	NO _x	PM	CO	HC	mKr
Reduktion CRT	0 %	90-95 %	90 %	95 %	0 %
Reduktion SCR	85 %	30-50 %	0 %	0 %	-3 %

Ausführlichere Informationen zur Funktionsweise der drei vorgestellten Abgasnachbehandlungssysteme enthält Anhang A.2.

2.5.3 Flottenzusammensetzung

Möchte ein ÖPNV Betreiber das Umweltprofil des Betriebs seiner Busflotte ermitteln, so ist entsprechend Gleichung 2.1 und Gleichung 2.2 eine Verbrauchs- und Emissionsbilanz für die gesamte Flotte zu erstellen. Für die Busflotte wird zunächst der Anteil der verschiedenen Antriebstechnologien (z.B. Diesel, Erdgas etc.) am Fuhrpark ermittelt. Innerhalb der vorhandenen Antriebstechnologien AT wird anschließend nochmals zwischen den Abgasnormen i , die die Fahrzeuge erfüllen, unterschieden. Die Ermittlung der Flottenzusammensetzung kann auf zweierlei Arten erfolgen:

1. die Anzahl der Fahrzeuge der verschiedenen Euro-Stufen der unterschiedlichen Antriebskonzepte ist bekannt und kann direkt angegeben werden.
2. bei Nichtverfügbarkeit der genauen Zahlen oder bei der Absicht, Aussagen über eine ortsunspezifische Flotte zu machen, kann über statistische Daten aus verschiedenen Quellen auf eine durchschnittliche Antriebstechnologie und Euro-Stufenzusammensetzung der Flotte geschlossen werden. Aus dem Jahr und dem Land, in dem die Flotte betrieben wird, lässt sich auf einen durchschnittlichen Abgasstufen-Mix schließen, der sich auf die landesweite in [72] und [73] ermittelte Flottenzusammensetzung bezieht.

Die Flottenzusammensetzung in Deutschland wurde entsprechend den Daten aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren [73] übernommen. Für weitere europäische Länder wurde ein Teilbericht des MEET-Projekts [72] herangezogen, in dem die Verkehrsflottenzusammensetzungen mehrerer europäischer Länder bis zum Jahr 2020 ermittelt bzw. prognostiziert wurde. Beide Berichte werden im Anhang D kurz vorgestellt. Die Busflottenzusammensetzung der einzelnen europäischen Länder betreffend ist zu erwähnen, dass für die Bestimmung der Anteile von Euro 4 und Euro 5 im Rahmen dieser Arbeit Annahmen getroffen wurden, da in [72] diese beiden Klassen keine Berücksichtigung fanden und dies entsprechend Tabelle 2.2 nicht dem Stand der Technik des Jahres 2006 entspricht. Weitere Einzelheiten zu den vorgenommenen Anpassungen sind Anhang D zu entnehmen.

Abbildung 2.7 zeigt die Flottenzusammensetzung am Beispiel der beiden Länder Deutschland und Portugal.

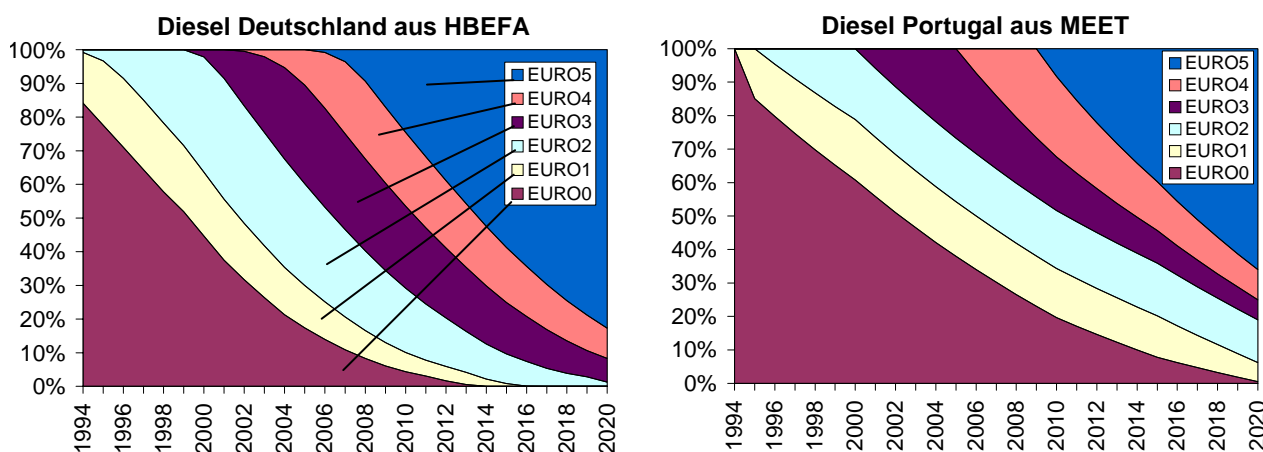


Abbildung 2.7 Flottenzusammensetzung in Deutschland und Portugal 1994-2020

2.6 Kraftstoffbereitstellung

Die Kraftstoffbereitstellung als Komponente des Systems „Nahverkehrsomnibus“ wird der Nutzungsphase zugeordnet, da es sich beim Kraftstoff um einen unmittelbar für den Betrieb der Busse benötigten Stoffstrom handelt. Eine Zuordnung der Kraftstoffbereitstellung zur Herstellung wäre prinzipiell auch denkbar gewesen, wurde aber aufgrund des klaren Nutzungsphasenbezuges

von Kraftstoffen nicht umgesetzt. Die vorgenommene Einteilung deckt sich mit anderen Arbeiten zum Thema Ökobilanzierung von Verkehrssystemen [38], [59], [71].

Analysiert werden der Ressourcenverbrauch und die Prozessemissionen der Bereitstellung des jeweiligen Kraftstoffes, entsprechend der in Kapitel 2.3 vorgestellten Methode der Ökobilanz mittels Prozesskettenanalyse. Dies ermöglicht die prozess- und länderspezifische Abbildung der einzelnen Bereitstellungspfade, d.h. es werden zur Produktion eines Kraftstoffes verschiedene Herstellungsrouten mit entsprechend unterschiedlichen Prozesstechnologien untersucht (z.B. Wasserstoff aus Erdgasreformierung und aus Elektrolyse) und es werden die länderspezifischen Randbedingungen (z.B. der jeweilige Erdölimportmix¹⁰ oder Strommix¹¹ eines Landes oder einer Region) berücksichtigt. Die quantitative Analyse der betrachteten Kraftstoffpfade erfolgt in Kapitel 5.3.

Der Allokation als Vorgehensweise zur Verteilung von energetischen und stofflichen Aufwendungen bei Prozessen mit mehreren Produkten (sogenannte Multioutput-Prozesse) kommt im Bereich der Kraftstoffbereitstellung eine gewisse Bedeutung zu. So liegt im Falle der Herstellung von Diesel in einer Mineralölraffinerie eine Verkettung von etlichen Multioutputprozessen vor. Jedem der Raffinerieprodukte ist eine Teillast der materiellen und energetischen Aufwendungen der einzelnen Prozesse zuzuordnen. Die Aufwendungen setzen sich zusammen aus dem Rohölverbrauch, dem Brennstoffbedarf zur Unterfeuerung sowie dem Strom- und Dampfverbrauch. Dabei werden die mit der Bereitstellung dieser Stoff- und Energieströme verbundenen Umweltlasten (z.B. Emissionen aus der Rohölbereitstellung oder der Unterfeuerung in den Prozessöfen) den einzelnen Produkten verursachergerecht zugeordnet. Entsprechend [53] wird Prozessweise der Rohölbedarf zur Herstellung eines Produktes nach seinem Heizwert und der thermische und elektrische Energiebedarf entsprechend der umgesetzten Masse alloziiert. Nähere Erläuterungen zu den Allokationsfaktoren finden sich im Anhang F.1.

Prinzipiell sind andere Möglichkeiten der Allokation in der Raffinerie denkbar. Es sind aber aufgrund anderer Verteilschlüssel keine grundsätzlich anderen Ergebnisse bzw. Aussagen dieser Arbeit zu erwarten [184]. Eine detailliertere Untersuchung des Einflusses des Verteilschlüssels in der Raffinerie bleibt weiteren Arbeiten vorbehalten.

Generell gilt für die Lebenszyklusbetrachtung von Bus- und Verkehrssystemen, dass bei Fahrzeugen mit geringen oder keinen Emissionen im Betrieb gerade die Kraftstoffbereitstellung, aber auch die in den folgenden Kapiteln 2.7 und 2.8 betrachteten Module Fahrzeugherstellung und -entsorgung von Bedeutung sind [22], [46].

¹⁰ Der Erdölimportmix eines Landes ergibt sich entsprechend den Erdöleinfuhren aus den unterschiedlichen erölproduzierenden und -exportierenden Ländern. Informationen zu den jährlichen Importmengen eines Landes kann Statistiken wie z.B. den IEA Statistiken der OECD [149] entnommen werden.

¹¹ Der Strommix ergibt sich entsprechend der erzeugten Strommengen aus den verschiedenen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträgern, wie z.B. Kohle, Erdgas, Wasser, Wind. Stromimporte aus anderen Ländern werden dabei auch berücksichtigt. Angaben zur Zusammensetzung des Strommixes können ebenfalls Statistiken wie [160] entnommen werden.

2.7 Fahrzeugherstellung

Analog zur Kraftstoffbereitstellung werden die Lebenszyklusphasen Buserstellung und Busentsorgung (siehe Kapitel 2.8) mit Hilfe der Prozesskettenanalyse untersucht.

Aufgrund der Komplexität der Buserstellung bietet sich der bei Schuckert [38] entwickelte Mischansatz aus „Top down“ (vereinfachende Betrachtung, „vom Großen zum Kleinen“) und „Bottom up“ Analyse (detaillierte Betrachtung, vom Bauteil zum System) an. Beim Mischansatz werden ausgehend von einer Systembetrachtung die systembestimmenden Faktoren ermittelt. Diese sind im allgemeinen: Werkstoff, Bauteile und –gruppen, Verarbeitungsverfahren sowie systemspezifische Prozesse (z.B. Montage, Lackierung) (siehe auch Abbildung 5.5). Die wesentlichen Vorteile der Verwendung des Mischansatzes sind:

- ◆ Wesentlich höherer Genauigkeitsgrad als beim „Top down“ Ansatz
- ◆ Geringerer Aufwand als bei der „Bottom up“ Analyse
- ◆ Identifikation von Schwachstellen sowie Darlegung von Optimierungspotentialen
- ◆ Spezifische Problempunkte können detailliert untersucht werden

Weitere Ausführungen zum Mischansatz und zu den „Top Down“ und „Bottom up“ Vorgehensweisen finden sich in [38].

2.8 Fahrzeugentsorgung

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz [77] sowie die VDI Richtlinie 2243 [78] geben für die Entsorgung von Produkten eine hierarchische Reihenfolge vor. So steht an erster Stelle die Vermeidung von Abfällen. Das gilt für die Entsorgung genauso wie für die Herstellung. An zweiter Stelle folgt die Wieder- und Weiterverwendung, d.h. dass das gesamte Produkt oder Teile davon werden ohne Gestaltveränderung einer vergleichbaren (Wiederverwendung) oder einer anderweitigen, meist minderwertigen (Weiterverwendung) Funktion zugeführt. Die nächste Stufe der Entsorgung stellt die wertstoffliche Verwertung, auch Materialrecycling genannt, dar. Ist eine Wieder- oder Weiterverwendung eines Busses als Ganzes oder in Teilen nicht möglich, kommt es zur (virtuellen)¹² Verschrottung des Busses. Es erfolgt die Demontage des Systems bzw. seiner Baugruppen, um möglichst sortenreine Werkstofffraktionen zu erhalten. Kann eine sortenreine Trennung der einzelnen Bauteile nicht erfolgen, so durchlaufen die Bauteile eine weitere Prozesskette, bestehend aus Aufbereitung (z.B. Reinigung, Zerkleinerung) und Trennung, um einzelne verwertbare Sekundärrohstofffraktionen zu gewinnen.

Ist eine werkstoffliche Verwertung nicht möglich (z.B. aus ökonomischen oder ökologischen Gründen) so ist die Abfallbeseitigung der letzte Schritt. Abbildung 2.8 stellt die mit Hilfe der einzelnen Entsorgungsarten realisierten Kreisläufe dar.

¹² Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer Verschrottung des Busses ausgegangen. Tatsächlich werden zur Zeit praktische alle in Europa außer Betrieb genommenen Busse nach Osten (Osteuropa, Russland) und arabischen Raum exportiert. [185]

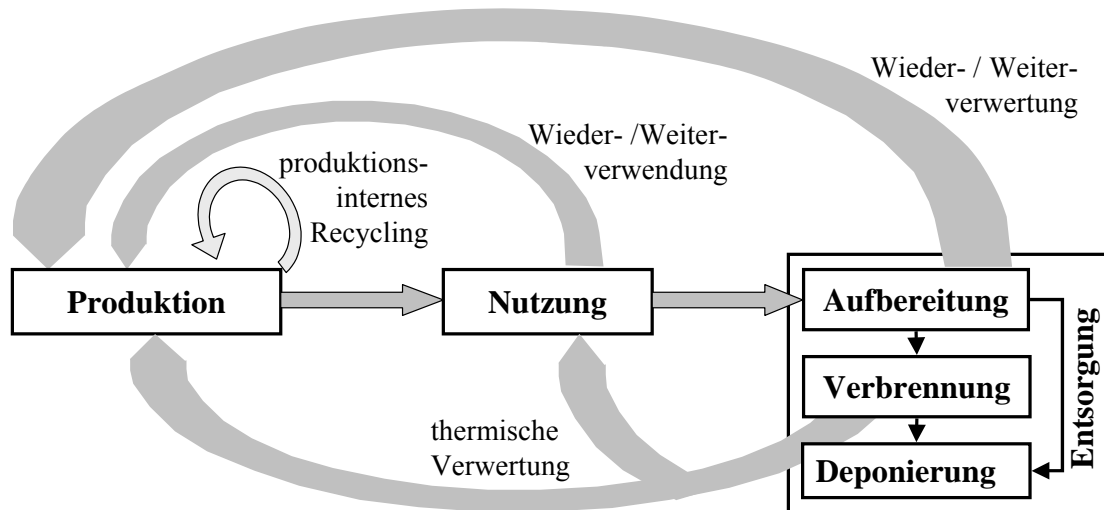


Abbildung 2.8 Realisierung von Materialkreisläufen durch Verwendung und Verwertung [36]

Diese Hierarchisierung findet sich in den entsprechenden Gesetzen und Richtlinien zur Verwertung verschiedenster Produkte wie z.B. Altfahrzeuge, Elektronikgeräten, Verpackung [79], [80], [81]. Entsprechend dem in Kapitel 2.3.2 diskutierten Substituierungsansatzes werden für die gewonnenen Sekundärrohstoffe und die genutzte Energie aus der thermischen Verwertung Recyclingpotentiale ausgewiesen. Diese Art der Modellierung ist weitgehend anerkannt und wird in der Praxis häufig angewendet [36],[82].

3 Stand der Technik in der ökologischen Bewertung von Bussystemen

Nach den allgemeinen Grundlagen, die das vorangegangene Kapitel behandelt hat, erfolgt nun einen Überblick über bereits existierende Studien, Ansätze und Modelle zur ökologischen Analyse und Bewertung von Omnibussystemen. Sie werden bezüglich ihres Ziels, ihres Betrachtungsrahmens, des gewählten Analyseansatzes und eventueller Lücken im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit untersucht. Aufgrund der geringen Anzahl an vorhandenen Untersuchungen zum Thema der ökologischen Lebenszyklusanalyse von Omnibussystemen wurden Studien, die sich mit Teilaspekten des Systems befassen, ebenfalls berücksichtigt.

Kapitel 3.1 gibt zunächst einen Überblick über Studien, die sich mit dem gesamten Lebenszyklus des Systems Omnibus bzw. mit Verkehrsträgern im allgemeinen beschäftigen. Unter dem Namen „Well-to-wheel“ (WtW) Studien verstehen sich Studien, die sich auf die Untersuchung Treibhauseffekt wirksamer Emissionen und des Primärenergiebedarfs (PEB) der Kraftstoffbereitstellung und –nutzung beschränken. Sie werden im Kapitel 3.2 behandelt. Arbeiten, die sich mit einzelnen Modulen des Systems Nahverkehromnibus beschäftigen, sind in Kapitel 3.3 zusammengestellt.

3.1 Lebenszyklusbetrachtung des Gesamtsystems Omnibus und wasserstoffgetriebener Brennstoffzellenfahrzeuge

Auf der Methode der Ökobilanzierung basierende Lebenszyklusanalysen analysieren das Spektrum an relevanten Umweltlasten über alle Module des Systems hinweg. Die aufgeführten Studien berücksichtigen die Module Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugbetrieb, einzelne Studien beziehen darüber hinaus die Bereiche Fahrzeugherstellung und –entsorgung mitein.

Nigge analysiert in [59] die Auswirkungen von Diesel und CNG Bussen auf die menschliche Gesundheit. Er verwendet die Methode der Ökobilanzierung und entwickelt im Rahmen der Wirkanalyse einen standortabhängigen Indikator für die Wirkkategorie Humantoxizitätspotential (HTP). Dieser Indikator berücksichtigt die vorherrschende Bevölkerungsdichte und klimatischen Verhältnisse (Windgeschwindigkeit). Berücksichtigt werden von Nigge die Kraftstoffbereitstellung sowie der Betrieb der Busse, die Brennstoffzellentechnologie sowie die Fahrzeugherstellung und -entsorgung finden keinen Eingang in seine Studie. Die Nutzungsphase wird statisch erfasst, d.h. eine Anpassung der Nutzungsphasedaten (Verbrauch, Emissionen) in Abhängigkeit unterschiedlicher Nutzungsphasenrandbedingungen (Topographie, Verkehrssituation) ist nicht vorgesehen.

Der Vergleich von Bus, Bahn und Pkw im Stadtverkehr ist Inhalt einer Studie von **Lambrecht et al.** [91]. Wie bei Nigge finden Diesel und CNG Busse, einschließlich der Kraftstoffbereitstellung, Berücksichtigung. Fahrzeugherstellung und -entsorgung sowie Brennstoffzellenbusse und Wasserstoffbereitstellung sind nicht Gegenstand der Studie. Der Vergleich erfolgt unter deutschen Randbedingungen auf der Ebene der Umweltwirkkategorien, d.h. Einzelemissionswerte

werden bis auf CO₂ nicht genannt. Streckenspezifische Verbrauchs- und Emissionswerte bleiben entsprechend der Zielsetzung der Studie unberücksichtigt.

Mit Omnibussen als Teil des Verkehrssektors beschäftigt sich auch **Krüger** [22]. Der Fokus der Arbeit liegt jedoch auf der Entwicklung eines Instrumentariums zur ökologischen Bewertung des Gesamtsystems Verkehr in Deutschland und möglicher Auswirkungen alternativer Kraftstoffe und Antriebssysteme darauf. Die Betrachtungen schließen Brennstoffzellenantriebstechnologie und Wasserstoffbereitstellung mit ein. Krüger wendet ebenfalls die Methode der Ökobilanzierung an. Es werden statistisch ermittelte Nutzungsphasenrandbedingungen (Verkehrssituation etc.) und Flottenzusammensetzungen angenommen. Auf Nahverkehrsomnibusse wird entsprechend der Zielsetzung von Krügers Arbeit nicht weiter im Detail eingegangen. Eine flexible Anpassung auf spezifische Randbedingungen der Nutzungsphase (länderspezifische Kraftstoffbereitstellung, streckenspezifische Topografie etc.) ist nicht explizit vorgesehen.

Im Auftrag des australischen Büros für Treibhausgase (Australian Greenhouse Office) untersuchten **Beer et al.** [90] den Lebenszyklus verschiedener Kraftstoffe hinsichtlich Treibhauseffekt verursachender Emissionen sowie weiterer luftverschmutzender Emissionen. Es wird für jeden Kraftstoff die Bereitstellung und die Nutzung in leichten und schweren Kraftfahrzeugen untersucht. Die Nutzung in Nahverkehromnibussen untersucht Beer ebenfalls. Die Fahrzeugherstellung und -entsorgung klammern die Autoren in der Ökobilanzstudie jedoch aus. Soweit möglich werden für die Studie australische Randbedingungen angewendet, es finden jedoch auch verstärkt Daten aus amerikanischen und europäischen Studien Eingang. Die Modellierung der Nutzungsphase hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Emissionen basiert auf Literaturdaten, die teilweise über statistische Methoden gemittelt wurden. Ein direkter Streckenbezug ist nicht gegeben.

Weitet man gerade im Bereich der Brennstoffzellentechnologie den Betrachtungsrahmen etwas aus und berücksichtigt auch Arbeiten und Modelle, die sich nicht explizit mit Omnibussen beschäftigen, so passen die Ausführungen von **Pehnt** [46] ebenfalls in den Themenkomplex dieser Arbeit. Er untersucht Brennstoffzellensysteme in mobilen und stationären Anwendungen und vergleicht sie mit den jeweiligen konventionellen Referenztechnologien unter deutschen Randbedingungen. Er verwendet dafür die Methode der Ökobilanzierung. Pehnt kommt zu dem Schluss, dass sich eine wirklich aussagekräftige Bewertung nur treffen lässt, wenn alle relevanten Systemkomponenten über ihren gesamten Lebenszyklus, also Kraftstoff und Fahrzeugherstellung, Fahrzeugbetrieb und -entsorgung, betrachtet werden. Bei Pehnt findet sich auch eine Übersicht zu weiteren in Deutschland bereits durchgeführten Arbeiten im Bereich Antriebstechnologien und Kraftstoffbereitstellung (z.B. DLR – vorwiegend Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen, FZ Jülich – ökonomische und ökologische Untersuchungen von Kraftstoffketten, Ifeu – Kraftstoffe für Verbrennungsmotor und Betrieb konventioneller Antriebssysteme, TU München – Pkw-Herstellung und Kraftstoffketten mit Schwerpunkt auf kumulierten Energiebedarf). Keine dieser genannten Arbeiten führt Pehnt zufolge eine konsistente, auf der Me-

thode der Ökobilanzierung gründende ökologische Bewertung über alle relevanten Lebenszyklusphasen durch.

Aufbauend auf den Arbeiten von Pehnt u.a. hat **Sorensen** [105] ebenfalls einen Lebenszyklusvergleich von Otto-, Diesel- und BZ-Antriebstechnologie für Pkw durchgeführt. Es werden alle vier Systemmodule betrachtet, der Fokus dieser Arbeit liegt aber mehr auf der Bewertung der Technologie hinsichtlich ihrer externen Kosten.

Mit der ökobilanziellen Lebenszyklusbetrachtung des Verkehrssystems Pkw bzw. mit dem gesamten Sektor Straßenverkehr haben sich verschiedene weitere Autoren beschäftigt. Da sie sich aber nicht schwerpunktmäßig mit dem Verkehrsträger Bus oder dem Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellenantrieb beschäftigt haben, soll hier eine tabellarische Kurzauswahl genügen. Die in Tabelle 3.1 genannten Arbeiten bieten umfangreiche, weiterführende Informationen zum Themengebiet der Ökobilanzierung des Systems Straßenverkehr.

Tabelle 3.1 Ökobilanzstudien zum Themenkomplex Straßenverkehr (Auswahl)

Autor	Untersuchtes System	Schwerpunkt	Regionaler Bezug	Jahr	Literatur
Eberle, R.	Lebenszyklus Pkw	Fahrzeug: Leichtbau, Minderverbrauch	DE	2000	[71]
Schuckert, M.	Lebenszyklus Pkw	Herstellung, Modellierung von Bauteilen, Vergleich mit Bahn	DE	1996	[38]
Dreier, T.	Systemanalyse biogener Kraftstoffe	Kraftstoffe aus erneuerbaren Ressourcen und deren Potentiale	DE	2000	[86]
Schindler, J.	Lebenszyklus Analyse von Wasserstoff	GHG ¹³ Emissionen und PE ¹⁴ Bedarf, Abschätzung für Fahrzeugherstellung (Pkw)	DE	2003	[88]
Röder, A.	Lebenszyklus Pkw	Methodenkombination Ökobilanzierung/ energie-wirtschaftliche Prognosemodelle, Vergleich versch. Antriebstechnologien/ Kraftstoffkombinationen	CH	2001	[92]
Delluchi, M.	Lebenszyklus motorisierter Verkehr; Stromversorgung und Wärmebereitstellung	GHG Emissionen und PE Bedarf (berücksichtigt aber auch andere Emissionen, z.B. SO ₂ , PM, NMHC, CO)	US	2003	[89]
Wang, M. et al.	Lebenszyklus von erdgasbasierten Kraftstoffen	PE Bedarf und Emissionen aus Herstellung und Nutzung der untersuchten Kraftstoffe in Pkw	US	1999	[114]
Unnasch, S. et al.	Lebenszyklus ausgewählter Kraftstoffe (einschl. Diesel, CNG und H ₂)	Herstellung und Nutzung Kraftstoffe in leichten und schweren Kfz	US	2000	[93]

¹³ GHG, Greenhouse gasses entspricht Treibhauseffekt verursachenden Gasen (siehe Fußnote 14)

¹⁴ PE: Primärenergie

3.2 Well-to-wheel Studien

Als weitere Untersuchungen im Bereich der ökologischen Analyse von Verkehrsträgern sind die sogenannten Well-to-Wheel Studien (übersetzt „vom Bohrloch bis zum Rad“, abgekürzt WtW) zu nennen.

Das kennzeichnende Merkmal der WtW Studien ist neben der Verwendung bzw. Anlehnung an die Methode der Ökobilanzierung die Fokussierung auf den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen¹⁵ der Kraftstoffbereitstellung und des Fahrzeugbetriebes [115]. Dabei werden verschiedenste konventionelle und alternative Kraftstoff-Antriebstechnologie Kombinationen betrachtet. Sämtliche weitere Emissionsgruppen wie z.B. NO_x oder Partikel bleiben unberücksichtigt. Üblicherweise setzt sich eine WtW Analyse aus drei Teilen zusammen:

1. Well-to-Tank (Betrachtung der Kraftstoffbereitstellung)
2. Tank-to-Wheel (Nutzung des Kraftstoffs während des Fahrzeugbetriebes)
3. Well-to-Wheel (Synthese aus den ersten beiden Teilen).

WtW Studien wurden von verschiedenen Institutionen mit jeweils unterschiedlichem geographischen Fokus durchgeführt. So führte die Ludwig Bölkow Systemtechnik GmbH (LBST) eine WtW Studie mit Partnern aus der Automobil- und Mineralölindustrie auf deutscher Ebene durch [4]. Sie war auch beteiligt an zwei europäischen Studien, die von General Motors [84] und gemeinschaftlich von Concawe¹⁶, EUCAR¹⁷ und JRC¹⁸ [85] veröffentlicht wurden. WtW Studien mit nordamerikanischen Randbedingungen führten zum einen General Motors mit Unterstützung des Argonne National Laboratory (ANL) und weiteren Partnern aus der Mineralölbranche [94] und zum anderen das MIT [95] durch. Im japanischen Kontext wurde eine WtW Studie von Toyota, zusammen mit dem Mizuho Information & Research Institute [96] erstellt. Allen Studien gemeinsam ist die jeweilige regionsspezifische Abbildung der Kraftstoffbereitstellung und die Nutzung der Kraftstoffe in Mittelklasse-Pkw. Für den Kfz-Betrieb wurden Verbrauchs- und Emissionswerte entsprechend den regional gesetzlich geltenden Fahrzyklen verwendet, d.h. dass technologiebedingte Variationen der Verbrauchs- und Emissionswerte Eingang in die Analysen fanden, aber eben nur jeweils für einen Testzyklus. Eine WtW Analyse für Nahverkehrbusse wurde nach Kenntnis des Autors noch nicht durchgeführt.

3.3 Studien zu einzelnen Modulen

Während sich Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 mit Studien auseinandersetzen, die zumindest die Kraftstoffbereitstellung und den Betrieb unterschiedlicher Kfz-Klassen gemeinsam berücksichtigen, gibt dieses Kapitel einen Überblick über Untersuchungen, die sich jeweils mit einem einzelnen der vier Systemmodule befassen. Der Schwerpunkt liegt auf dem Busbetrieb (siehe Kapitel 3.3.1). Hier gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen und Projekten, in denen Messungen an

¹⁵ zu den Treibhausgasen, die den Treibhausgaseneffekt verursachenden Gasen zählen entsprechend IPCC [97] CO₂, CH₄, SF₆, N₂O, HFC, PFC

¹⁶ Europäischer Mineralverband

¹⁷ Forschungsvereinigung der europäischen Automobilhersteller

¹⁸ Forschungszentrum der Europäischen Kommission

Omnibussen durchgeführt wurden. Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe von Modellen, mit deren Hilfe sich je nach Zielsetzung, die Emissionen von Einzelfahrzeugen, Fahrzeuggruppen oder des gesamten motorisierten Straßenverkehrs über Emissions- und Verbrauchsfaktoren berechnen lassen, ohne dafür aufwendige Messkampagnen durchführen zu müssen. Kapitel 3.3.2 fasst Studien zur Bereitstellung unterschiedlicher Kraftstoffe zusammen und Kapitel 3.3.3 behandelt schließlich die Themen Fahrzeugherstellung und –entsorgung.

3.3.1 Busbetrieb

Verbrauchs- und Emissionsuntersuchungen von Bussen

Obwohl für Omnibusse von gesetzlicher Seite her keine Notwendigkeit für fahrzeugbasierte Verbrauchs- und Emissionsmessungen besteht, sind von Herstellern, Betreiberverbänden und Umweltorganisationen einige Untersuchungen und Forschungsvorhaben in diesem Bereich initiiert worden.

Bei diesen Untersuchungen dient der Dieselantrieb als Referenztechnologie. Meistens wird in den Untersuchungen ein dieselpetriebener Bus (mit oder ohne Abgasnachbehandlungsmaßnahmen) mit einem oder mehreren Erdgas (CNG) Bussen verglichen, da die CNG-Technologie eine Möglichkeit zur Senkung der NO_x - und Partikelemissionen des busbasierten ÖPNV darstellt. Da jedoch höhere Investitionskosten und geringere Reichweiten für die CNG Busse in Kauf genommen werden müssen, werden beide Antriebstechniken auf ihre Vorteile hin überprüft. So vergleicht in [98] das Flemish Institute for Technological Research, VITO, einen Dieselpbus mit einem stöchiometrisch verbrennenden CNG Bus und einem im Magermix betriebenen CNG Bus von verschiedenen Herstellern auf unterschiedlichen Zyklen (Stadt-, Überlandverkehr, CBDC (Central Business District Cycle)) mit variierenden Beladungen. Es werden wie bei [99] der Verbrauch und die CO_2 , CO, HC und NO_x Emissionen betrachtet. Die in [100] durch die TÜV Automotive GmbH und die Forschungsstelle für Energiewirtschaft durchgeführte Untersuchung betrachtet einen Dieselpbus ohne Abgasbehandlung, einen Dieselpbus mit CRT-System und einen CNG Bus auf einem Stadtzyklus (Münchner Linie 66) und auf dem FIGE Zyklus. Eine Studie des VTT Energy (Technical Research Center of Finland) [101] betrachtet einen Dieselp-, einen LPG Bus stöchiometrisch und einen Erdgasbus im Magermix auf der Buslinie 23 in Helsinki und auf einem künstlich entwickelten Zyklus, dem Otaniemi Zyklus. Kohlenwasserstoff-Emissionen wurden hier nicht berücksichtigt. Schließlich wird in einem Forschungsprojekt der TU Wien [102] ein Dieselpbus mit einem LPG Bus unterschiedlichen Fabrikats mittels Konstantfahrten und dem Durchfahren verschiedener Zyklen (Wiener Bus Zyklus, ECE R15) auf der Straße und auf der Rolle mit verschiedenen Beladungen untersucht. Das australische Umweltministerium führte im Rahmen von [103] ebenfalls Rollenprüfstandsversuche mit Dieselp- und Erdgasbussen durch.

Bei den betrachteten Studien lässt sich folgendes feststellen: Es werden in fast allen Fällen Busse unterschiedlicher Hersteller, die die Euro 2 Norm erfüllen¹⁹, auf unterschiedlichen Zyklen mit teilweise unterschiedlicher Beladung miteinander verglichen. Das erschwert eine Vergleichbarkeit der einzelnen Untersuchungen untereinander erheblich. Tabelle 3.2 gibt die Schwankungsbreite der Emissions- und Verbrauchswerte für die Antriebstechnologien Diesel und Erdgas²⁰ wieder. Sie enthält neben den minimalen (Min) und maximalen (Max) Werten, die Standardabweichung (Stabw) und die Anzahl der berücksichtigten Werte (Anzahl).

Tabelle 3.2 Schwankungsbreite der Literaturwerte für Verbrauchs- und Emissionswerte von untersuchten Diesel und CNG Bussen [98]- [105],[64]

Wert	Einheit	Diesel				CNG			
		Min	Max	Stabw	Anzahl	Min	Max	Stabw	Anzahl
Verbrauch	[l DÄ./ 100 km]	36,0	62,8	8,3	9	43,0	83,2	14,4	9
CO ₂	[g/km]	840,0	1737,0	267,8	13	824,0	1634,0	246,1	13
CO	[g/km]	0,9	7,7	1,9	14	0,1	5,3	1,4	14
NO _x	[g/km]	7,8	21,3	3,3	15	1,1	25,5	8,1	15
HC	[g/km]	0,6	2,2	0,4	12	0,3	12,7	3,4	12
CH ₄	[g/km]	0	0,1	0,01	3	0,7	2,5	0,8	3
NMHC	[g/km]	1,1	2,1	0,4	3	0,1	2,8	1,2	3
PM	[g/km]	0,02	0,8	0,2	8	0,001	0,2	0,01	8

Anhand der aufgeführten Werte lässt sich der Einfluss des jeweils für die einzelnen Untersuchungen gewählten Testzyklus ablesen. So liegt zwischen der Strecke mit dem minimalen und maximalen Verbrauch ein Faktor von fast zwei. Hinsichtlich der berechneten Standardabweichungen zeigt sich ein uneinheitliches Bild. Während bei den HC und NO_x-Werte die CNG Busse höhere Standardabweichungen im Vergleich zu den Dieseln aufweisen, verhält es sich für die CO und Staub (PM) Emissionen genau umgekehrt. Eine Ermittlung sinnvoller Emissionsfaktoren auf Basis der in Tabelle 3.2 genannten Emissionswerte ist nicht möglich, da die jeweiligen Testrandbedingungen nicht berücksichtigt werden. Sinnvoller ist es in diesem Zusammenhang einen relativen Vergleich der Technologien untereinander innerhalb der einzelnen Untersuchungen durchzuführen, da diese jeweils auf denselben Fahrzyklen bei gleicher Beladung miteinander verglichen werden. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die relativen Veränderungen gegenüber dem jeweiligen Dieselreferenzfahrzeug. Das geometrische Mittel bietet sich zur Berechnung des Mittelwertes an, da es das geeignete Lagemaß für Verhältnisse ist. Der Vollständigkeit halber wurde auch das arithmetische Mittel angegeben.

¹⁹ nicht immer ist aus den Studien ersichtlich welche Euro Norm von den untersuchten Bussen erfüllt wird. Zumindest bei den Dieseln handelt es sich immer um Euro 2 Busse

²⁰ Die Tabellen enthält nur Werte für CNG Busse mit Mager-Motorkonzept, da hier eine höhere Datenverfügbarkeit gegeben ist und dieses Konzept vorwiegend von den europäischen Busbauern eingesetzt wird.

Tabelle 3.3 Relativer Vergleich der Verbrauchs- und Emissionswerte verschiedener Studien und Untersuchungen [98]- [105],[64]

	CNG zu Diesel			
	Min	Max	Geometr. Mittel	Arithm. Mittel
Verbrauch	1,01	1,88	1,38	1,40
CO ₂	0,76	1,42	1,01	1,03
CO	0,05	0,9	0,28	0,35
NO _x	0,14	2,66	0,73	0,99
HC	0,5	10,58	2,81	3,96
CH ₄	18,86	125,0	44,64	60,53
NMHC	0,05	2,5	0,24	0,88
PM	0,02	0,11	0,046	0,054

Generell sind bei diesen Werten immer die jeweiligen Randbedingungen (Fahrzeughersteller, Zyklus, Beladung) zu berücksichtigen. Die Verwendung von Bussen unterschiedlicher Hersteller ergibt z.B. einen gewissen Streufaktor, da die Fahrzeuge nicht auf demselben Grundfahrzeug aufbauen, d.h. sie haben unterschiedliche Konzepte bei Rohbau, Nebenantrieben etc. Dies schlägt sich dann z.B. in unterschiedlichem Verbrauch bei ähnlichem Gewicht bzw. in unterschiedlichem Fahrzeuggewicht bei gleicher Antriebstechnologie nieder.

Modelle zur Bestimmung von Verbrauchs- und Emissionsfaktoren von Nahverkehrsbussen - Stand der Technik

In der Literatur finden sich mehrere Modelle mit unterschiedlichen Verbrauchs- und Emissionsfunktionen, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

In den letzten Jahren wurden von einer Reihe verschiedener Institutionen Modelle entwickelt, mit denen sich die Verbräuche und Emissionen von Fahrzeugen und Fahrzeugflotten bestimmen lassen. Mit Hilfe von Funktionen werden der Verbrauch und die Emissionen in Abhängigkeit unterschiedlicher Streckenparameter, wie z.B. Länge, Steigung und Geschwindigkeit zum einen sowie verschiedener Antriebstechnologien zum anderen ermittelt.

Es kann zwischen reinen Simulationstools und auf aggregierten Emissionsfaktoren basierenden Modellen unterschieden werden. Simulationsprogramme basieren auf Emissionskennfeldern der verwendeten Motoren und berechnen je nach Fahrzustand zeitaufgelöste Emissionswerte. Derartige Programme wurde z.B. an der TU Graz, Modell „**PHEM**“ [107] und am IST Lissabon, Modell „**EcoGest**“ [108], entwickelt. Dabei werden Drehzahl und Drehmoment über vorhandene Fahrzyklen simuliert und über Motorkennfelder die entsprechenden Verbrauchs- und Emissionsdaten errechnet. Diese Motorkennfelder müssen zuvor experimentell ermittelt werden.

Emissionsfaktoren ergeben sich in der Regel aus einer Vielzahl von Untersuchungen und Emissionsmessungen. Im Folgenden werden die wichtigsten Modelle, die auf Emissionsfaktoren basieren, vorgestellt.

Das Handbuch Emissionsfaktoren **HBEFA 2.1** [74], herausgegeben vom Umweltbundesamt Berlin, dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern und dem Umweltbundesamt, Lebensministerium und dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, wurde bereits 1995 in einer ersten Version veröffentlicht. Die Daten sind nach zahlreichen technischen und verkehrsbezogenen Parametern gegliedert. Nach Eingabe der Fahrleistung können die im Straßenverkehr freigesetzten Schadstoffmengen berechnet werden. Im April 2004 wurde die neueste Version HBEFA 2.1 veröffentlicht. Sie beinhaltet Datensätze aus Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Die Aristotle University of Thessaloniki hat bereits 1989 das Modell COPERT [109] entwickelt. **COPERT III**, „Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport“, ist die neueste Version eines Softwareprogramms, das vom Europäischen Umweltamt im Rahmen des CORINAIR Programms finanziert wurde. COPERT funktioniert ähnlich wie HBEFA, ist allerdings stärker auf die Ermittlung nationaler Emissionsinventare ausgerichtet. Es ist frei erhältlich und kann von jedem für weitere Anwendungen eingesetzt werden. Copert III basiert auf mehreren Projekten des CORINAIR-Programms, wie z.B. dem COST319-Projekt [72] und dem MEET-Projekt [75]. COPERT schätzt alle regulierten und einige nicht regulierten Emissionen (CO_2 , CO, NO_x , HC, PM, CH_4 , N_2O , NH_3 , SO_2 , NMHC), die von verschiedenen Fahrzeugkategorien produziert werden, auf Basis des Kraftstoffverbrauchs ab. Die Emissionsfaktoren können in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ermittelt werden. Die Softwareanwendung COPERT wurde entwickelt, um jährliche Emissionsinventare zu erstellen.

Die US EPA - Environmental Protection Agency - hat das Modell **MOBILE6** [110] entwickelt. Dieses Programm ist in der Lage, Kohlenwasserstoffe HC, Kohlenmonoxid CO, Stickoxide NO_x , Kohlendioxid CO_2 , Partikelemissionen PM und weitere Schadstoffe von Kraftfahrzeugen, Nutzfahrzeugen und Motorrädern unter verschiedenen Einsatzbedingungen abzubilden. MOBILE6 bietet im Vergleich zu anderen Modellen die Möglichkeit, erdgasbetriebene Busse mitzubetrachten. Die Emissionsdaten für die CNG-Busse basieren jedoch nicht auf Motorkennfeldern bzw. Emissionsmessungen, sondern werden über Faktoren bezüglich der Dieselemissionen berechnet. Die Daten des eher komplex zu bedienenden Programms beziehen sich meist auf amerikanische Hersteller und die US Emissionsgesetzgebung.

TREMOT, Transport Emission Estimation Model, ist das bisher vom Umweltbundesamt [111], den Bundesministerien, dem Verband der Deutschen Automobilindustrie, dem Mineralölwirtschaftsverband sowie der Deutschen Bahn AG genutzte, öffentlich nicht zugängliche Experten-Modell zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland. In TREMOD werden alle in Deutschland betriebenen Personenverkehrsträger (Pkw, motorisierte Zweiräder, Busse, Bahnen, Flugzeuge) und Güterverkehrsträger (Lkw, Bahnen, Schiffe) ab dem Basisjahr 1980 in Jahresschritten bis zum Jahr 2020 erfasst. Die Basisdaten reichen von Fahr-, Verkehrsleistungen und Auslastungsgraden bis hin zu den spezifischen Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren. Als Emissionen werden Stickstoffoxide, Kohlenwasser-

stoffe, differenziert nach Methan und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen sowie Benzol, Kohlenmonoxid, Partikel, Ammoniak, Distickstoffoxid, Kohlendioxid und Schwefeldioxid erfasst. Bilanziert werden die direkten Emissionen einschließlich der Verdunstungsemissionen und diejenigen Emissionen, die in der dem Endenergieverbrauch vorgelagerten Prozesskette entstehen. Es dient zum Teil auch als Datengrundlage für HBEFA.

Bei **TREMOVE** handelt es sich um ein weiteres Softwareprogramm zur Unterstützung der Behörden der Europäischen Union bei der Entscheidung über neue Emissionsstandards und Kraftstoffnormen, das von der Universität Leuven [112] entwickelt wurde. Es können für verschiedene Jahre Transportszenarien mit Kostenunterschieden berechnet und miteinander verglichen werden. Darüber hinaus werden die Größe und Zusammensetzung der Fahrzeugflotte, die Fahrzeugnutzung, Emissionen und Durchschnittsgeschwindigkeiten auf verschiedenen Straßenkategorien berechnet. Die neueste Version TREMOVE 2.2 ist im Oktober 2004 erschienen. In diese Version fanden Datensätze über die Fahrzeugflotten aus 15 europäischen Ländern Eingang.

Das Modell **GREET** wurde im Auftrag der US EPA vom Argonne National Laboratory entwickelt [113]. Das Modell GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation) hat das Ziel, die Auswirkungen des Energieverbrauchs und der Emissionen über den ganzen Lebenszyklus des Brennstoffs und des Fahrzeugs zu bewerten. Die Brennstoffe werden „well-to-wheel“ berücksichtigt und die Fahrzeuge werden von der Gewinnung des Rohstoffs bis zu deren Entsorgung („cradle-to-grave“) betrachtet. Das mehrdimensionale Excelmodell liegt in der aktuellen Version GREET 1.6 vor. Berechnet werden der Gesamtenergieverbrauch (erneuerbar / nicht erneuerbar), die Emissionen von Treibhausgasen (CO₂, CH₄ und N₂O) sowie die Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (HC), Kohlenmonoxid, Stickoxiden, Schwefeldioxid und Partikelemissionen. Es erfolgt keine Betrachtung und Simulation von strecken- und lastabhängigen Verbräuchen und Emissionen. Für alle Werte wird lediglich ein Mittelwert angenommen. Standortspezifische Betrachtungen und Bewertungen bezüglich Verbrauch und Emissionen sind daher nicht möglich. Das Modell ist frei verfügbar und für jeden zugänglich.

Vergleicht man die beschriebenen sechs Modelle zur Ermittlung der Kraftstoffverbräuche und Emissionen, so ist offensichtlich, dass sich für das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Modell HBEFA als die geeignetste Quelle zur Ermittlung vergleichbarer Verbrauchs- und Emissionsdaten für Dieselbusse erweist. Die Vorteile liegen in der öffentlichen Verfügbarkeit, der hohen Aktualität und großen Breite der Daten und der Anlehnung an die in der EU gültigen Abgasnormen. Der Nachteil ist die mangelnde Verfügbarkeit von Daten für erdgasbetriebene und andere alternativ angetriebene Fahrzeuge.

Beschreibung des Handbuchs Emissionsfaktoren (HBEFA)

Zum besseren Verständnis der verwendeten Emissions- und Verbrauchsfaktoren für Dieselbusse gibt dieser Abschnitt, basierend auf [74] einen kurzen Überblick über das Handbuch Emissionsfaktoren und wie die Faktoren berechnet wurden.

Das HBEFA führt mehrere Europäische Messprogramme zusammen und ergänzt diese wo erforderlich. Es stellt für verschiedene Fahrzeugkategorien (z.B. Pkw, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), schwere Nutzfahrzeuge (SNF), Reise und Linienbusse u.a.) Emissionsfaktoren je Kilometer oder Verkehrssituation zur Verfügung. Berücksichtigte Emissionsfaktoren sind die Schadstoffkomponenten CO, HC, NO_x, Partikel, CO₂, Blei, SO₂, CH₄, NMHC, Benzol, Toluol, Xylol, NH₃, N₂O sowie der Kraftstoffverbrauch (mKr). Differenziert werden die Emissionsfaktoren nach Emissionsart, d.h. „warme“ Emissionen, Kaltstartzuschläge und Verdampfungsemissionen, wobei die beiden letztgenannten Emissionsarten, entsprechend Kapitel 2.5.2 im Rahmen dieser Arbeit für Busse nicht berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu Pkw und LNF, die auf Rollenprüfständen vermessen werden, untersucht man die Motoren von SNF auf dynamischen Motorenprüfständen. So können mit Hilfe der Emissionswerte des Motors und eines mathematischen Fahrzeugmodells die Emissionsfaktoren für alle Fahrzeugtypen, in denen der Motor eingesetzt wird, berechnet werden. Außerdem erlaubt dieses Vorgehen sowohl dynamische Messungen als auch Messungen im negativen Drehmomentbereich, wodurch eine genauere Erfassung der Emissionsdaten ermöglicht wird. Die Motoren unterschiedlicher Hersteller werden entsprechend eines Messprogramms vermessen, das sieben verschiedene Testzyklen (u.a. ECE 13 Stufentest, FIGE Zyklus, zwei instationäre Tests, zwei stationäre Tests) umfasst. Daraus ergeben sich normierte mittlere Motorenkennfelder, die die Emissions- und Verbrauchswerte in Abhängigkeit des Drehmomentes und der Motordrehzahl enthalten [117]. Für Euro 4 und Euro 5 Motorkonzepte liegen noch keine reellen Messwerte vor, daher sind Kennfelder erstellt worden, die verschiedene Annahmen bezüglich technischer Aspekte, wie z.B. Motormanagement, Abgasnachbehandlungsstrategie, Verbrennungskonzept etc. berücksichtigen. Ausgangspunkt sind die vorhandenen Euro 3 Kennfelder.

Mit Hilfe von Fahrmustern, die typische Fahrzustände beschreiben, werden die Emissionsfaktoren für bestimmte Verkehrssituationen berechnet. Unter einem Fahrmuster ist ein typisches Fahrverhaltensmuster zu verstehen, das sich anhand kinematischer Größen wie mittlerer Geschwindigkeit und Dynamik für die einzelnen Fahrzeugkategorien beschreiben lässt. Eine Verkehrssituation ist eine Kombination von Fahrmustern, die sich auf alle Fahrzeugkategorien anwenden lässt und einer verkehrstypischen Situation entspricht. Mit Hilfe von Fahrverhaltensuntersuchungen wurde ermittelt, welche Fahrmuster in welcher Verkehrssituation mit welchem Anteil vorkommen [118]. Die Fahrmustergruppen und die Definition der Verkehrssituationen können den Tabellen E.1 und E.2 in Anhang E entnommen werden.

3.3.2 Kraftstoffbereitstellung

Für die Kraftstoffbereitstellung können die Werte aus den Lebenszyklusanalysen und den Well-to-Wheel Studien herangezogen werden. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die Werte aus einer Auswahl der in Kapitel 3.1 und 3.2 genannten Studien für den Well-to-tank Teil, d.h. für den Teil von der Ressource bis zum Tank. Die Tabelle konzentriert sich auf die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Kraftstoffe Diesel, Erdgas und Wasserstoff. Es ist zu berücksichtigen,

dass die aufgrund des unterschiedlichen geografischen Bezugs voneinander abweichenden Randbedingungen bei der Ermittlung der Emissionswerte und des Energieverbrauchs einen direkten Vergleich der Zahlen untereinander nur sehr eingeschränkt erlauben. Die Zahlen sind als Anhaltswerte zu verstehen, die die Bandbreite aufzeigen, in der sich die Werte für die Bereitstellung der drei Kraftstoffe bewegen.

Tabelle 3.4 Energieverbrauch und Emissionswerte der Kraftstoffbereitstellung²¹

Literatur	Bezugsraum	Bezugsjahr	Kurzbeschreibung	η %	PE gesamt MJ/l DÄ	PE nicht ern. MJ/l DÄ	PE ern. MJ/l DÄ	CO ₂ Äquiv. g/l DÄ	CO ₂ g/l DÄ	CO g/l DÄ	NO _x g/l DÄ	SO ₂ g/l DÄ	CH ₄ g/l DÄ	NMVOG g/l DÄ	PM g/l DÄ	N ₂ O g/l DÄ
140	DE	2000	Diesel 50 ppm S	85,9%	41,5	41,5	0	506,1	434,3	0,5	1,4	2,4	3,0	0,6	0,2	0,01
67	RER	2010	Diesel 10 ppm S	86,6%	41,1	41,1	0	505,5	505,5				0			0
76	US	2005	Diesel 10 ppm S	82,3%	43,3	43,1	0,14	637,9								
98	US	2000	Diesel					478,7	410,9	1,5	2,2	2,0	4,4	0,7	0,8	0,02
78	JP	2000	Diesel 50 ppm S	91,4%	38,9			62122								
140	DE	2000	CNG	86,1%	41,3	41,3	0,1	423,3	286,7	0,7	1,2	0,1	5,8	0,1	0,1	0,01
67	RER	2010	CNG, EU Mix	89,3%	39,9	39,9	0	299,0	195,8				4,6			0
76	US	2005	CNG	86,3%	41,3	40,9	0,33	563,8								
98	US	2000	CNG					546,1	345,7	1,1	2,7	0,9	10,6	0,2	0,2	0,01
78	JP	2000	LNG	86,1%	41,3			49017								
70	DE		H ₂ onsite St. Ref., 700bar	54,9%	64,8			3681								
67	RER	2010	H ₂ onsite St. Ref., EU Mix, 700 bar	54,3%	65,5	65,5	0	3731	3535				7,832			0,036
76	US	2005	H ₂ onsite St. Ref., 450 bar	55,9%	63,7	63,0	0,69	3860								
98	US	2000	H ₂ onsite St. Ref.					3100	2882	1,8	5,5	3,4	12,8	0,3	0,4	0,05
78	JP	2000	H ₂ city gas St. Ref., 400 bar	62,5%	57,0			17323								
70	DE/GLO		H ₂ ons. Elektr, Wind offsh, 700 bar	60,0%	61,7			247,2								
67	RER	2010	H ₂ ons. Elektr, EU Mix, 700 bar	21,6%	164,5	156,3	8,2	7408	6928				16,73			0,32
76	US	2005	H ₂ onsite Elektr. US Mix, 450 bar	24,5%	145,7	131,3	14,4	9667								
76	US/GLO	2005	H ₂ onsite Elektr. Hydro, 450 bar	62,9%	56,6	0	56,6	0								
78	JP	2000	H ₂ onsite Elektr., JP Mix, 400 bar	15,6%	227,5			8206								

3.3.3 Fahrzeugherstellung und -entsorgung

Untersuchungen, die sich mit dem Umweltprofil der Herstellung und Entsorgung von Omnibussen beschäftigen, sind dem Autor nicht bekannt. Im Bereich der Pkw gibt es dagegen eine ganze Reihe von Studien, die sich mit der Herstellung und der von der Herstellung bestimmten Altfahrzeugentsorgung bzw. -verwertung auseinandersetzen [140], [141]. Die beispielhaft genannten Studien greifen dabei auf die Methode der Ökobilanzierung zurück.

Gerade im Bereich der Fahrzeugentsorgung bzw. -verwertung befassen sich in Europa, nicht zuletzt aufgrund der 2001 in Kraft getretenen Altautoverordnung [81], [132], vermehrt Studien mit der Untersuchung der Recyclingfähigkeit einzelner Baugruppen [135], [142] und Materialien [136], bis hin zur Verwertung eines kompletten Pkw [137] und daraus abgeleitet dem recyclinggerechten Konstruieren von Baugruppen [130]. Weitere relevante Themenbereiche bezüglich Verwertung und Entsorgung von Kraftfahrzeugen sind beispielsweise die Aufbereitungs- und Verwendungsmöglichkeiten der einzelnen Stofffraktionen, z.B. Shredderleichtfraktion oder Elektronikteile [128]. Dabei hat sich klar die Erkenntnis durchgesetzt, dass eine Optimierung des Recyclings immer mit der Herstellung des zu rezyklierenden Produktes beginnt [130], [36], [143].

Für weiterführende Literatur und Information zur Altautoverwertung sei auf die Arbeitsgemeinschaft ARGE Altauto [131] als Ausgangspunkt für weitere Recherchen verwiesen.

²¹ Die Begriffe und Abkürzungen sind im Abkürzungsverzeichnis erläutert.

Die Verwertung/Entsorgung des BZ Antriebes und seiner Komponenten wird ebenfalls in mehreren Arbeiten behandelt. So werden in Nordamerika beispielsweise bereits Recyclingrichtlinien entwickelt [138]. Auch in Europa gab es schon Überlegungen zur Altautoverwertung von BZ Fahrzeugen [139] statt. In diesen und weiteren Studien [161] zum Brennstoffzellenrecycling liegt der Fokus wegen seiner umweltlichen Relevanz, aber vor allem aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen auf dem Recycling des verwendeten Edelmetalls Platin.

3.4 Zusammenfassung

Eine Studie, die sich mit dem gesamten Lebenszyklus des Systems Omnibus beschäftigt, ist dem Autor nicht bekannt. Es gibt Studien, die sich mit Teilaspekten des Systems Omnibus beschäftigen, im Wesentlichen Kraftstoffbereitstellung und Busbetrieb. Die Nutzungsphase findet bisher nur statisch Berücksichtigung, d.h. es stehen Verbrauchs- und Emissionsdaten für einen oder einige wenige definierte Strecken bzw. Zyklen zur Verfügung. Außerdem ist die Buserstellung und-entsorgung noch nicht näher betrachtet worden. Im Hinblick auf die Brennstoffzellentechnologie gibt es wenige Untersuchungen, die mit Hilfe der Methode der Ökobilanzierung den Lebenszyklus der Technologie im Pkw-Bereich betrachten. Zur Wasserstoffbereitstellung bzw. zur Kraftstoffbereitstellung im allgemeinen gibt es viele Studien, aber keine analysiert explizit den länderspezifischen Einflüsse, beispielsweise die der Energieträgerbereitstellung auf die einzelnen Bereitstellungsrouten. Die Studien gehen im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzelle von Auslegungswerten aus und nutzen in den seltensten Fällen real gemessene Betriebsdaten, da bisher nur eine sehr geringe Anzahl an Demonstratoren, sowohl im Fahrzeug wie auf im Kraftstoffbereich, verfügbar war [187]. Außerdem sind viele der Studien als WtW Studien angelegt, d.h. sie haben den Fokus auf Primärenergieverbrauch und auf Emissionen, die für den Treibhauseffekt relevant sind. Sie berücksichtigen nicht Emissionen, die zu anderen wichtigen Umweltwirkungen auf Mensch und Natur beitragen wie z.B. Partikel, SO₂ oder NO_x. Daher haben sie nur eine begrenzte Aussagefähigkeit, weil sie wesentliche umweltliche Aspekte des Systems Omnibus bzw. des Verkehrs vernachlässigen.

Eine Berücksichtigung der Produktionsanlagen zur Kraftstoffbereitstellung, speziell zur Wasserstoffproduktion in kleinen dezentralen Anlagen, erfolgte bisher nicht.

4 Anforderungen an die Arbeit

Die Ausführungen zu den Grundlagen und dem Stand der Technik bei der umweltlichen Analyse und Optimierung von Bustechnologien und städtischen Busflotten ergeben die folgenden inhaltlichen und methodischen Anforderungen an die vorliegende Arbeit:

- ◆ Es ist ein Modell zu entwickeln, das Entscheidungsträgern sowohl auf Bushersteller- als auch auf Busbetreiberseite ermöglicht, die umweltlichen Chancen und Risiken unterschiedlicher Nahverkehrsbussysteme unter den stadtspezifischen Einsatzbedingungen zu erfassen und ihr Umweltprofil bei Entscheidungsprozessen zu berücksichtigen.
- ◆ Eine übergeordnete Anforderung ist die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Systems „Nahverkehrsbus“, um alle relevanten Auswirkungen des Systems zu erfassen und die Verschiebung von Umweltlasten zwischen den verschiedenen Lebenszyklusphasen zu vermeiden.
- ◆ Das entwickelte Modell soll den Vergleich sowohl einzelner Bustechnologien, einschließlich der jeweiligen Kraftstoffe, als auch gesamter Busflotten mit eventuell unterschiedlichen Antriebstechnologien ermöglichen.
- ◆ Die Berücksichtigung der standortspezifischen Einsatzrandbedingungen, speziell während der Nutzungsphase, ist in zweierlei Hinsicht relevant.
 - Bei der Kraftstoffbereitstellung sind sowohl die länderspezifischen Energieträgermische, einschließlich deren Energieträgerförderung, als auch die nationalen Verarbeitungsstrukturen und Herstellungsrouten der einzelnen Kraftstoffe zu erfassen und im Modell abzubilden.
 - Für die Modellierung der Buseinsatzbedingungen ist innerhalb des Lebenszyklusmodells ein Nutzungsphasenmodul zu entwickeln, welches die umweltlichen Lasten des Betriebes eines oder mehrerer Busse in Abhängigkeit der Einsatzrandbedingungen abbildet, und zwar ohne die Durchführung von zeit- und kostenintensiven Messfahrten. Das soll heißen, dass die Modellierung unter Verwendung von technologie- und betriebsspezifischen Emissionsfaktoren erfolgt. Hierzu sind die relevanten Parameter zur Ermittlung der Emissionsfaktoren zu bestimmen und, falls möglich, funktionelle Abhängigkeiten zu bestimmen.
- ◆ Der Vergleich soll sowohl auf Einzelrouten wie auch auf Basis des gesamten Routennetzes durchführbar sein.

- ◆ Die quantitative Bestimmung der umweltlichen Lasten des Systems „Nahverkehrsbus“ soll über einen frei wählbaren Zeitraum bzw. eine frei wählbare Laufleistung erfolgen. Die Umweltwirkungen sollen beispielsweise vom einmaligen Durchfahren einer bestimmten Route mit einem einzelnen Bus über die Jahresemissionen einer Busflotte bis hin zu den Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Busses bzw. einer ganzen Busflotte bestimmbar sein.
- ◆ Zur Analyse der Auswirkung verschiedener Kombinationen von Kraftstoff und Antriebstechnologien sollen die Erstellung und der Vergleich verschiedener Szenarien möglich sein.
- ◆ Schließlich ist das zu entwickelnde Instrumentarium als offenes System auszulegen, d.h. es soll möglich sein, neue Kraftstoffe bzw. unterschiedliche Kraftstoffbereitstellungsrouten sowie alternative Antriebstechnologien in das Modell zu integrieren.

5 Modellentwicklung zur Lebenszyklusanalyse von Bussystemen

Die Datengrundlage bilden u.a. die von der Europäischen Union geförderten Demonstrationsvorhaben CUTE und ECTOS. Die entwickelte Vorgehensweise ermöglicht die Ermittlung des Umweltprofils des busbasierten öffentlichen Personennahverkehrs und kann z.B. durch die Betrachtung unterschiedlicher Flottenzusammensetzungen zur umweltlichen Optimierung des öffentlichen Nahverkehrs eingesetzt werden. Es leistet somit einen Beitrag zu den Bemühungen der Kommunen, gerade in Ballungsgebieten eine nachhaltige Mobilität zu implementieren.

Der modulare Aufbau, wie er in Kapitel 2.4 umrissen wurde, gibt im Wesentlichen die Struktur für dieses Methodenkapitel vor. Zunächst wird in Kapitel 5.1 das zu untersuchende System und seine Grenzen in Anknüpfung an Kapitel 2.4 detaillierter beschrieben. Die anschließenden Abschnitte befassen sich mit den vier Systembausteinen Busherstellung, Kraftstoffbereitstellung, Busbetrieb und Busentsorgung.

5.1 Systembeschreibung und -grenzen

5.1.1 Allgemeine Systembeschreibung

Betrachtet man das System „Nahverkehrsbus“ mit all seinen Modulen über den gesamten Lebenszyklus, so lässt sich das System zunächst in verallgemeinerter Form entsprechend Abbildung 5.1 darstellen. Das System ist im Wesentlichen zweigeteilt, in einen Kraftstoffteil (linker Teil der Abbildung) und in einen Fahrzeugteil (rechter Teil der Abbildung). Der Kraftstoffteil deckt die Kraftstoffbereitstellung ab. Er beinhaltet die Förderung des Primärenergieträgers, gefolgt von einem oder mehreren Weiterverarbeitungs- bzw. Umwandlungsschritten. Zwischen den einzelnen Prozessschritten sind je nach Energieträger und Region Transportvorgänge erforderlich. Der Fahrzeugteil deckt die drei Lebenszyklusphasen des Busses ab.

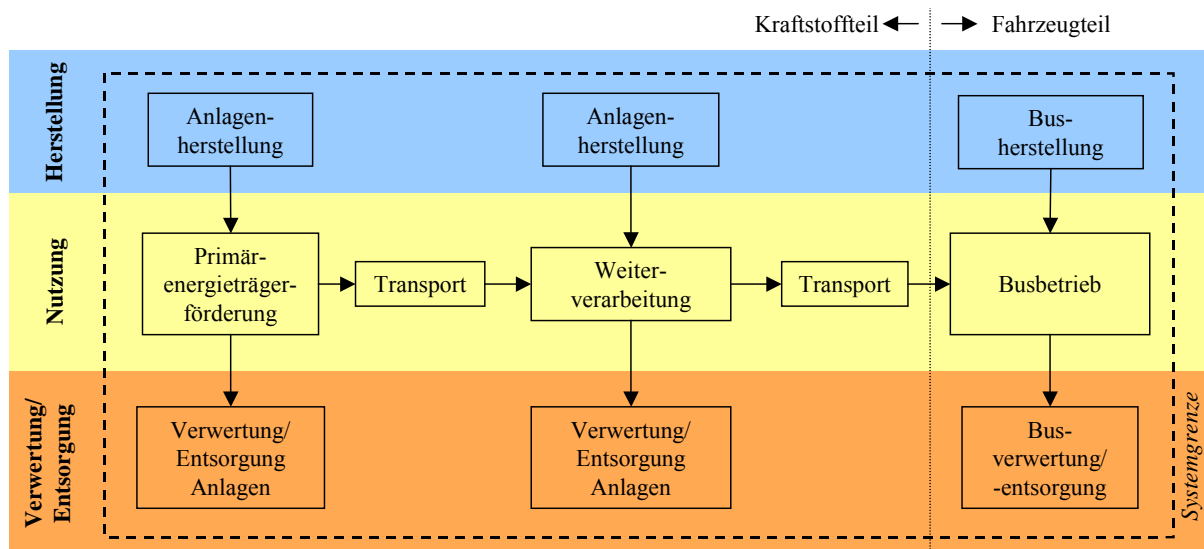


Abbildung 5.1 Allgemeine Systembeschreibung

Jeder einzelne Prozessschritt der Kette ist über seinen Lebenszyklus zu betrachten, d.h. Herstellung, Betrieb und Entsorgung bzw. Rückbau der Anlage ist zu berücksichtigen. Die Systemgrenze umfasst zunächst alle Prozessschritte über ihren gesamten Lebenszyklus (siehe Abbildung 5.1).

Abhängig von der ökologischen Relevanz werden einige Lebenszyklusphasen bestimmter Prozessschritte vernachlässigt. Die folgenden Beschreibungen der untersuchten Bussysteme gehen auf dieses Abschneiden einzelner Prozesse bzw. Prozesslebenszyklusphasen näher ein.

5.1.2 Dieselbussystem

Der Dieselbus dient als Referenzsystem, da er mit einem Anteil von über 97 % in Deutschland und Europa den Stand der Technik im busbasierten ÖPNV repräsentiert [11]. Entsprechend der allgemeinen Systembeschreibung ergibt sich für den Dieselbus folgendes Systembild (siehe Abbildung 5.2). Dabei stellt die Erdölförderung die Primärenergieträgerförderung dar und die Weiterverarbeitung besteht aus Erdölaufbereitung und Raffinerie. Dazwischen werden die jeweiligen Transporte der Zwischenprodukte berücksichtigt. Entscheidend für die Wahl des Transportmittels ist die jeweilige regionale Situation, ob beispielsweise der Transport von Erdöl per Pipeline oder per Tanker erfolgt. Funktionelle Einheit ist ein Fahrzeugkm, d.h. die Ökobilanzergebnisse werden auf einen gefahrenen km bezogen.

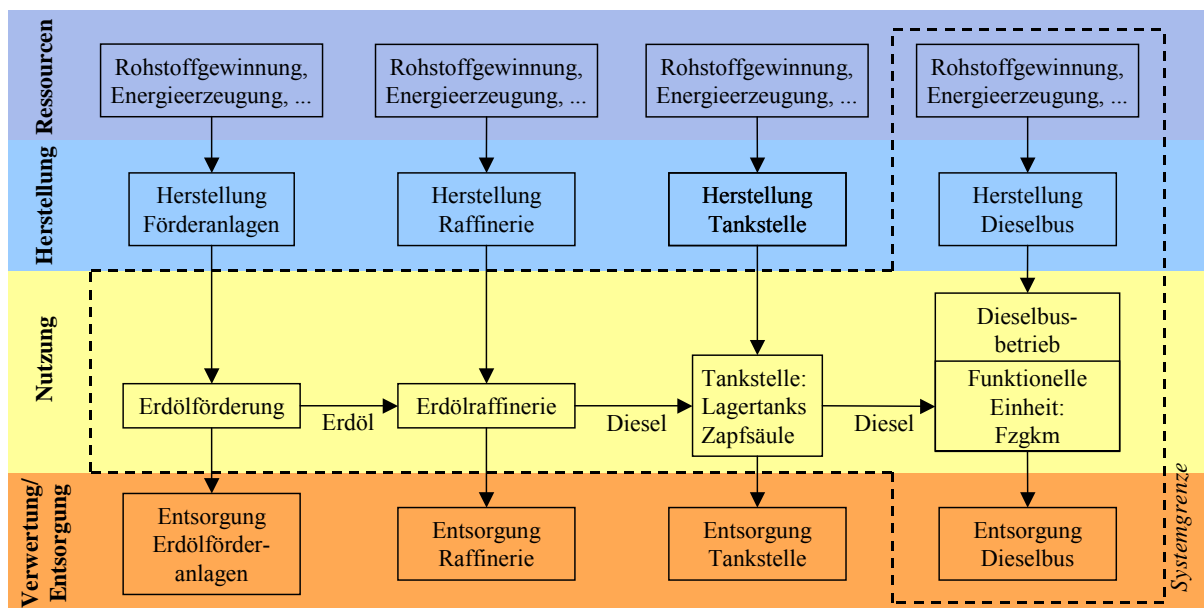


Abbildung 5.2 Systembeschreibung Dieselbus

Die Abbildung ist aus Gründen der Übersicht vereinfacht dargestellt. So sind zum Beispiel die verschiedenen Transportvorgänge des Erdöls und des Diesels nicht im Bild abgebildet. Die lokalen Randbedingungen sind besonders relevant bei der Förderung von Primärenergieträgern (Wie

setzt sich der Erdöl-Mix²² zusammen? Welche Fördertechnologien kommen jeweils zum Einsatz?), bei der Weiterverarbeitung in der Raffinerie (Welche Konfiguration²³ hat die Raffinerie?) und schließlich für die Nutzungsphase des Busses. Die Systemgrenze ist gestrichelt in Abbildung 5.2 eingetragen. Sie ergibt sich aus bisherigen Untersuchungen im Bereich der Dieselmotortreibstoffbereitstellung [144], [145]. Dabei hat sich gezeigt, dass hauptsächlich die Nutzungsphase die umweltlich relevanten Prozesse beinhaltet. Die Herstellung und Entsorgung der Anlagen zur Förderung, zum Transport und zur Weiterverarbeitung des Erdöls sind aufgrund der großen durchgesetzten Massenströme von untergeordneter Bedeutung. Sie bewegen sich zum Beispiel für Primärenergie im Bereich $<1\%$ [144] und liegen damit zum einen im Bereich der Datenungenauigkeit und bieten zum anderen auch kein Optimierungspotential aus Sicht des Modells. Sie können daher bei den Untersuchungen vernachlässigt werden. Das gleiche gilt für die Anlagen zur Herstellung und Entsorgung des Busses. So werden die Errichtung und Demontage der Montagehallen zur Busherstellung und –entsorgung nicht betrachtet. Alle unmittelbaren Aufwendungen zur Fertigung des Busses werden hingegen berücksichtigt. Beispielsweise werden alle Aufwendungen, die sich aus dem Energiebedarf für Beleuchtung, Heizung der Hallen und Montagegeräte ergeben, in die Ökobilanz miteinbezogen.

5.1.3 Erdgasbussystem (CNG)

Der Erdgasbus (CNG Bus) stellt eine Alternative zum Dieselbus dar. Als vorteilhaft gilt, dass er sich durch niedrigere Schadstoffemissionen, gerade bei den Partikeln und Stickoxiden auszeichnet. So sind bereits Fahrzeuge erhältlich, die den „Enhanced Environmental friendly Vehicle“ (EEV) Standard der Europäischen Union einhalten. Der Marktanteil von CNG Bussen beträgt zur Zeit in Deutschland mit steigender Tendenz ca. 3% [14]. Analog zum Dieselbus ergibt sich ein schematisches Systemschaubild (siehe Abbildung 5.3) für den Erdgasbus. Auch hier sind die Transportprozesse nicht abgebildet, werden aber berücksichtigt. Unter Weiterverarbeitung des Kraftstoffes ist hier im mittleren Teil der Abbildung die Verdichtung des Erdgases auf ein Druckniveau zwischen 200 und 250 bar zu verstehen. Die Systemgrenze (gestrichelte Linie) wird analog zum Dieselbussystem gezogen.

²² Der Erdöl-Mix beschreibt die geografische Herkunft des in einer Raffinerie verarbeiteten Erdöls und setzt sich aus der Erdöleigenförderung eines Landes (falls vorhanden) und dem länderspezifischen Erdölimportmix (falls erforderlich) zusammen.

²³ Unter Raffineriekonfiguration versteht sich die Anordnung der verschiedenen verfahrenstechnischen Prozesse, z.B. Destillations- und Crackanlagen, die sich hauptsächlich aus dem gewünschten Produktspektrum ergibt. Als Daumenregel gilt: je mehr „leichte“ Produkte (z.B. Benzin, Gase, Aromaten) gewünscht werden, desto komplexer wird die Anlagenstruktur einer Raffinerie. Mehr Informationen zum Thema Raffinerie beinhalten Kapitel 5.4.1 und Anhang F.

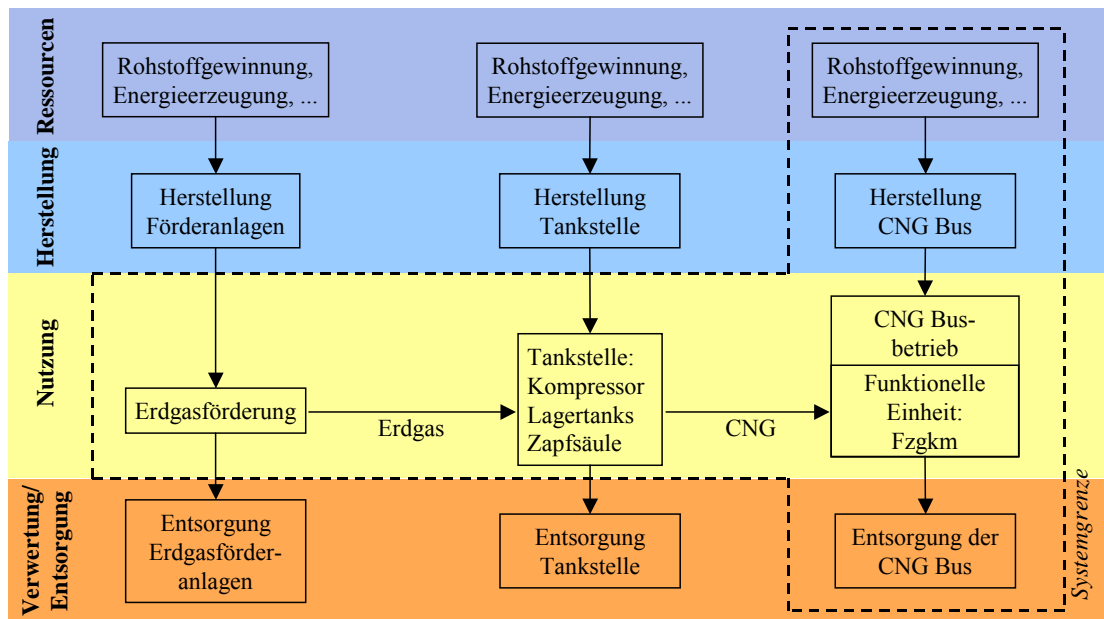


Abbildung 5.3 Systembeschreibung Erdgasbus (CNG)

5.1.4 Brennstoffzellenbussystem (BZ)

Als weitere Alternative zu Dieselnbussen präsentieren sich in jüngster Vergangenheit Busse mit Brennstoffzellenantrieb. Die Brennstoffzellentechnologie ist zwar aus technischer Sicht und vor allem wegen der momentan noch sehr hohen Kosten eher als langfristige Alternative zu sehen, bietet aber aufgrund ihres bis auf Wasserdampf emissionslosen Betriebs besonders in dichtbesiedelten und schadstoffbelasteten Innenstädten Vorteile. Gerade aber wegen ihres emissionslosen Betriebes ist es wichtig, das Gesamtsystem zu betrachten, da hier die Betriebsemissionen der Busse auf die Kraftstoffbereitstellung, in diesem Fall Wasserstoff, verlagert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird besonderes Augenmerk auf das BZ-Bussystem gelegt, um entwicklungsbegleitend festzustellen, ob die Technologie aus Lebenszyklussicht ökologisch wettbewerbsfähig mit den konventionellen Systemen ist und in welchem Umfang noch Potentiale in der Brennstoffzellen-, aber auch in der CNG und Diesel-Bustechnologie, stecken.

Abbildung 5.4 zeigt das Brennstoffzellensystem und seine Systemgrenzen. Für die Wasserstoffbereitstellung werden im Rahmen dieser Arbeit entsprechend Kapitel 5.4.3 zwei Routen betrachtet. Die erste ist die Herstellung durch die Elektrolyse von Wasser, die zweite Route ist die Wasserstoffgewinnung durch die Dampfreformierung von Erdgas. Da es sich bei den hier betrachteten Routen um dezentrale Erzeugungsanlagen mit einer geringen Produktionskapazität im Vergleich zu großen Raffinerien (500 t/a zu 15 Mio. t/a) handelt, werden die Herstellung, Wartung und Entsorgung der zur Wasserstoffherstellung erforderlichen Anlagen mitberücksichtigt. Hierzu liegen nach Kenntnis des Autors noch keine Untersuchungen vor.

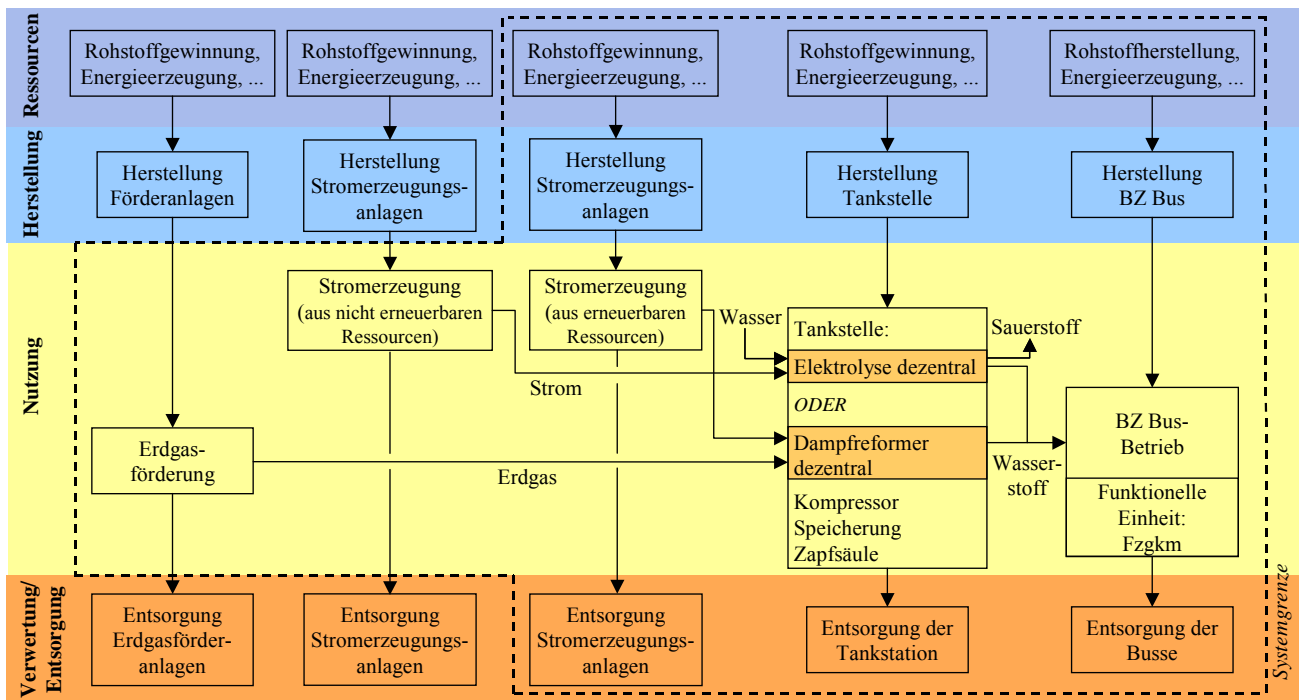


Abbildung 5.4 Systembeschreibung Brennstoffzellenbus (BZ)

5.1.5 Berücksichtigte Sachbilanzwerte

Die im Rahmen des Modells im Detail analysierten Sachbilanzwerte orientieren sich an den in [74] als ökologisch relevant identifizierten Emissionen. Im einzelnen sind das:

- Kohlendioxid (CO₂)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Stickoxide (NO_x)
- Kohlenwasserstoffe (HC)
 - Methan (CH₄)
 - Nichtmethankohlenwasserstoffe (NMHC)
 - Benzol
 - Toluol
 - Xylol
- Partikel (PM)
- Schwefeldioxid (SO₂)
- Lachgas (N₂O)
- Ammoniak (NH₃)
- Blei (Pb)

Außerdem wird als Indikator für den Ressourcenverbrauch der Primärenergiebedarf aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen berücksichtigt.

Der europäischen Gesetzgebung folgend, liegt der Fokus auf den limitierten Emissionen sowie auf den unlimitierten Emissionen CO₂ und SO₂. Die Anforderung nach Erweiterbarkeit erfüllend,

können dem Modell prinzipiell jederzeit weitere Sachbilanzwerte hinzugefügt werden, wobei der gewählte Umfang hinreichende Analysemöglichkeiten gestattet. Nähere Informationen zu den einzelnen Emissionen und ihren Wirkungen finden sich u.a. in [172],[173] und [174].

Entsprechend der in Kapitel 2.4 und 5.1.1 gemachten Einteilungen wird für die einzelnen Module Fahrzeugherstellung, -entsorgung, Kraftstoffbereitstellung und Fahrzeugbetrieb in den vier nachfolgenden Abschnitten das methodische Vorgehen entwickelt und beschrieben.

5.2 Buserstellung

Die Ökobilanz der Herstellungsphase beinhaltet, ausgehend von den Ressourcen, alle relevanten Abbau-, Aufbereitungs-, Transport- und Verarbeitungsprozesse der einzelnen Materialien und Bauteile sowie die Fahrzeugendmontage (siehe Abbildung 5.5).

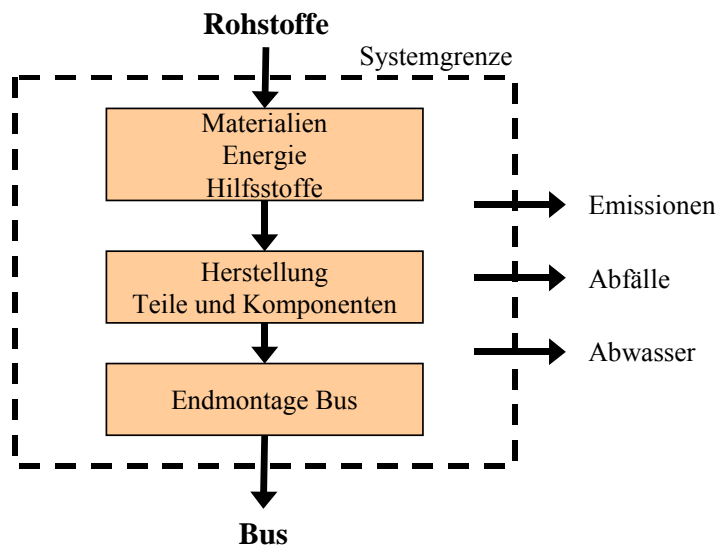


Abbildung 5.5 Buserstellung

Als erster Schritt werden Stücklisteninformationen des Buserstellers und verfügbare Informationen zu den Verarbeitungsprozessen, die das untersuchte Fahrzeug betreffen, ausgewertet.

Da alle drei Bustypen auf dem Dieselfahrzeug als Basischassis aufbauen, bietet es sich an, ein modulares Strukturmodell zunächst für den Dieselbus aufzubauen. Dieses dient dann als Basis für den CNG und den BZ Bus.

Die in Abbildung 5.6 gezeigte Struktur orientiert sich an Fahrzeugteilen bzw. Baugruppen des hier untersuchten Bustyps Citaro der Firma EvoBus. Sie kann prinzipiell als repräsentativ für alle modernen Nahverkehrsomnibusse angesehen werden. Durch Austausch oder Ergänzung der veränderten bzw. zusätzlichen Baugruppen je Bustyp wird eine einfache Modellierung und gute Vergleichbarkeit der Fahrzeugtypen ermöglicht.

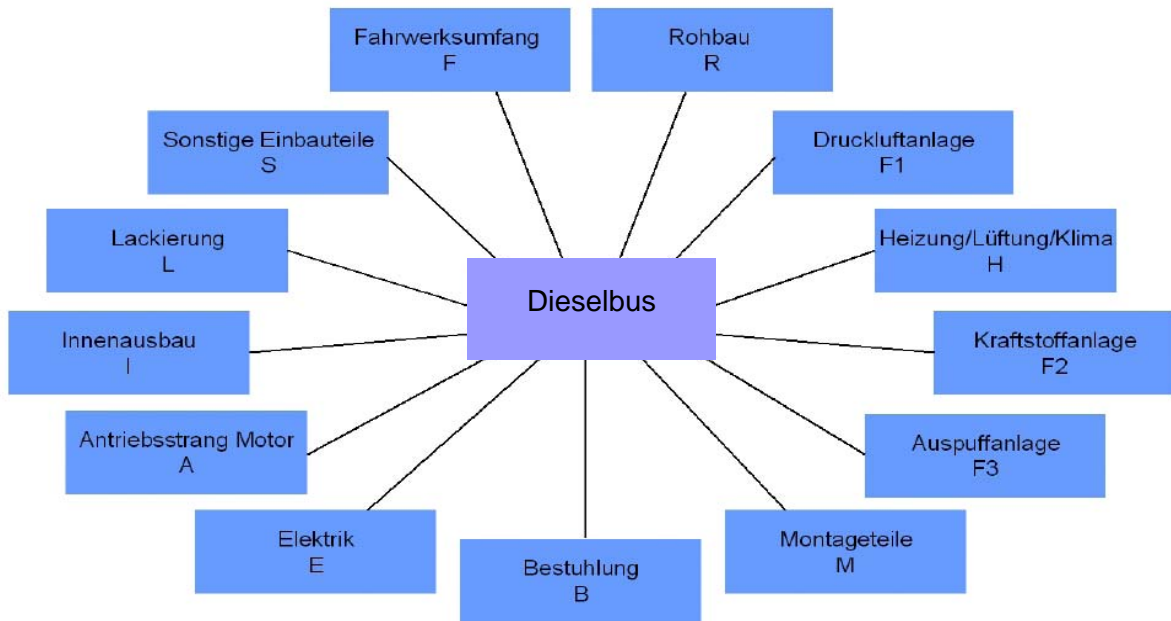


Abbildung 5.6 Strukturmodell eines Dieselmotors

Während sich beim Erdgasbus lediglich Änderungen an Motor, Tankanlage und Dach ergeben, weist der Brennstoffzellenbus eine ganze Reihe zusätzlicher Bauteile und Veränderungen am Basischassis auf. In Kapitel 6.1.1 wird näher darauf eingegangen.

Ist die Auswertung der technischen Informationen und die Baugruppeneinteilung erfolgt, wird mit Hilfe von Material-, Energie- und Verarbeitungsdatensätzen aus kommerziell verfügbaren Datenbanken (z.B. GaBi 4 [83]) die Ökobilanzierung der Busherstellung durchgeführt.

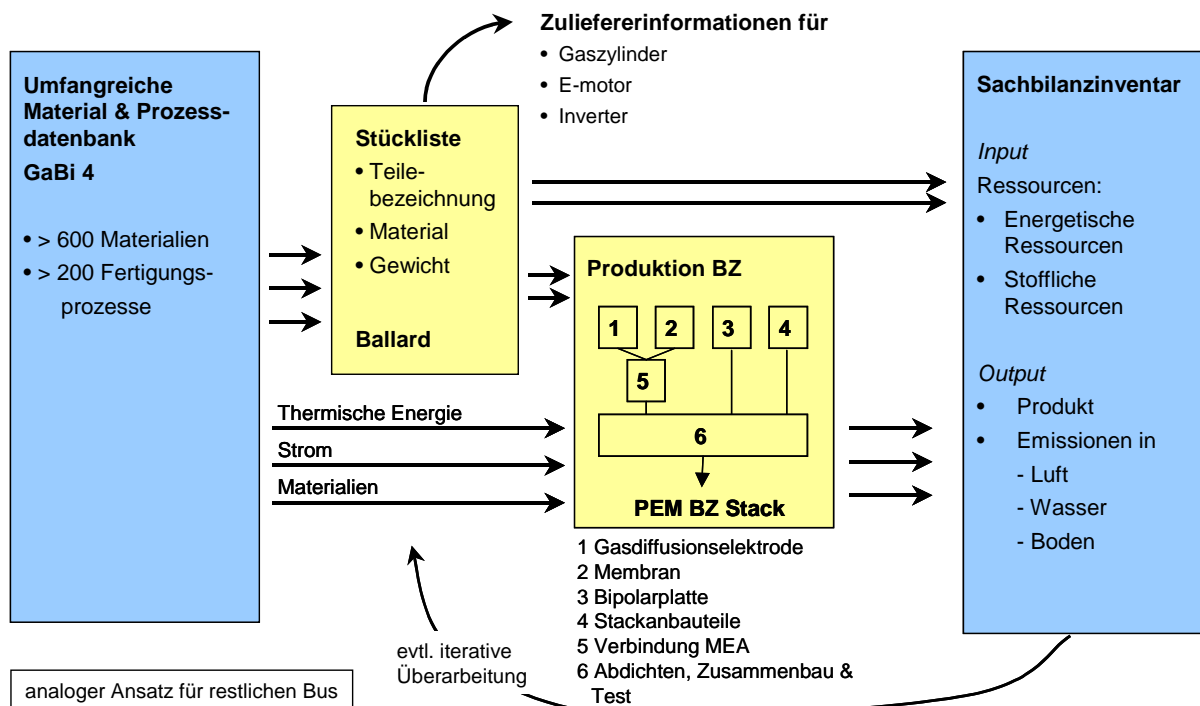


Abbildung 5.7 Datenerhebung am Beispiel Brennstoffzellenantrieb

Der gesamte Ablauf zur Datenerhebung mit ihrem iterativen Vorgehen, der Einbindung von Zulieferern und Verwendung von bestehenden Ökobilanz-Datensätzen wird schematisch am Beispiel des Brennstoffzellenantriebes in Abbildung 5.7 dargestellt. Für die anderen Busse wird nach demselben Schema vorgegangen.

Eventuell auftretende Datenlücken z.B. bei Verarbeitungsprozessen werden iterativ durch eine erneute Datenaufnahme geschlossen. Sollte das nicht möglich sein, kann die Lücke mit entsprechendem technischen Know how durch Schätzung geschlossen und per Sensitivitätsanalyse die Relevanz der Abschätzung überprüft werden

5.3 Busentsorgung

Da es in diesem Zusammenhang noch keine Untersuchungen zur Fahrzeugentsorgung von Nahverkehrsomnibussen gibt, erfolgt die Abbildung dieser Lebenszyklusphase in Anlehnung an die Altfahrzeugentsorgung wie sie im Pkw Bereich durchgeführt wird.

Nach dem Erreichen des Endes seiner Lebensdauer wird der Bus außer Dienst gestellt und einer Entsorgung zugeführt wie sie in Abbildung 5.8 dargestellt ist.

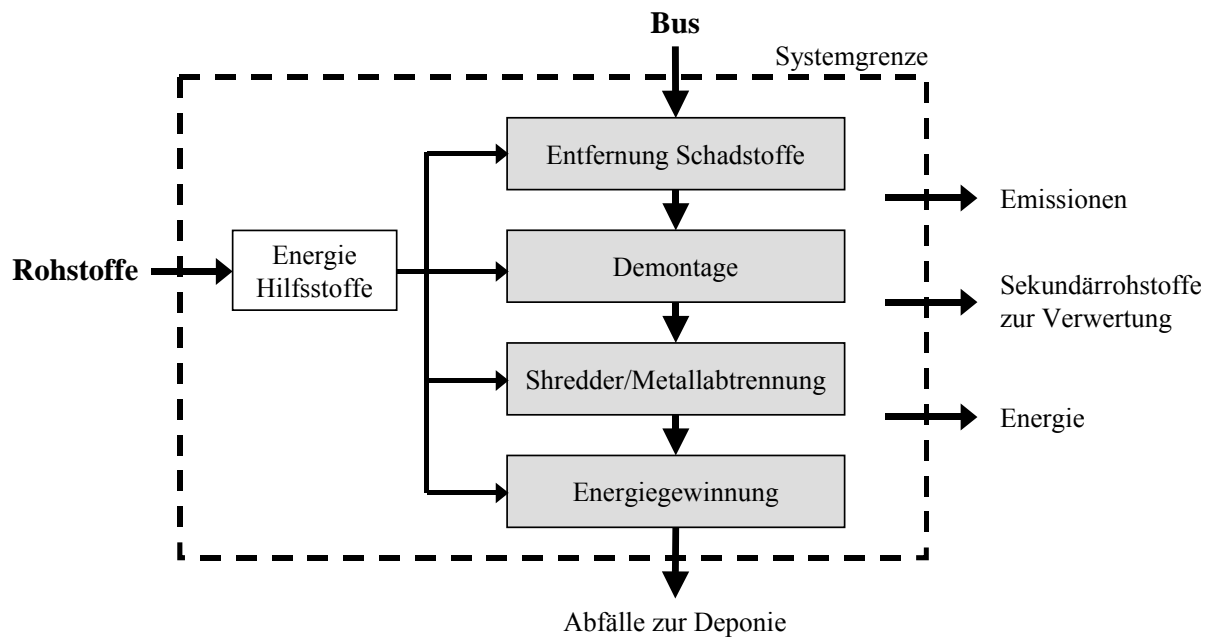


Abbildung 5.8 Entsorgung des Busses

Der Entfernung von Schadstoffen, z.B. Bleibatterien und Kühlmittel, folgt die Demontage des Fahrzeugs, d.h. im Anschluss an die Trockenlegung des Fahrzeugs erfolgt die Zerlegung in seine Bauteile bzw. in Fahrzeugteile mit möglichst gleichen oder ähnlichen Materialien. Nicht weiter auftrennbare Stofffraktionen werden dem Shredder zur Zerkleinerung und anschließenden einer stofflichen Fraktionierung, z.B. durch magnetische und gravimetrische Trennverfahren, zugeführt. Ziel ist es, möglichst sortenreine Materialfraktionen zu gewinnen, die anschließend über eine Aufbereitung als Sekundärmaterial möglichst hoher Güte wieder in den Materialmarkt eingespeist werden können. Diese Sekundärmaterialien werden als Substituierungspotentiale in

Form von Gutschriften ausgewiesen (siehe Kapitel 2.8). Stofflich nicht weiter verwertbare Fraktionen werden einer energetischen Verwertung zugeführt. Durch die zurückgewinnbare nutzbare Energie entsteht ein weiteres Substitutionspotential, für das ebenfalls eine Gutschrift ausgewiesen wird. Der Energieverbrauch und die Emissionen, die als Aufwendungen während der Entsorgungsprozesse und der Aufbereitung der Stofffraktionen entstehen, werden entsprechend berücksichtigt.

Zunächst werden drei Stofffraktionen unterschieden: die Eisen-, die Nichteisen- und die Shredderleichtfraktion (SLF). Die Nichteisenfraktion untergliedert sich in Aluminium, Kupfer und weitere Buntmetalle und im Falle des Brennstoffzellenbusses noch in die Edelmetalle. Eine stoffliche Verwertung der Kunststoffe wird hier nicht berücksichtigt, da von einer thermischen Verwertung durch die Verbrennung der Shredderleichtfraktion ausgegangen wird.

Entsprechend der in der Herstellung eingesetzten Materialien werden diese Stoffströme unter Berücksichtigung der jeweiligen Materialerfassungsgrade in die oben genannten Stofffraktionen eingeteilt. Tabelle 5.1 nennt die verwendeten Materialerfassungsgrade und das für die jeweilige Fraktion gutgeschriebene Material. Das Modell ist so aufgebaut, dass diese Werte jederzeit anpassbar sind.

Tabelle 5.1 Materialerfassungsgrad und Substitutionspotentiale in der Fahrzeugentsorgung

Fraktion	Material	Erfassungsgrad	Substitutionspotential für
Eisen	Stahl	98 %	Stahl Knüppel
	Stahl legiert	98 %	Stahl Knüppel (24 CrMo 10)
	Edelstahl	98 %	Stahl Knüppel (X2 CrNiMo 17 12 2)
Nichteisen	Aluminium	95 %	Aluminiummassel (sekundär)
	Kupfer	95 %	Elektrolytkupfer
	Edelmetall	95 %	Edelmetall (primär)
SLF	Kunststoffe	95 %	Thermische Energie
	Holz	95 %	Thermische Energie
Flüssigkeiten aus Trockenlegung	Öl	100 %	Thermische Energie
	Sonstige		Thermische Energie

Das Recycling der Brennstoffzelle ist aufgrund des Edelmetallgehaltes nicht zuletzt aus wirtschaftlicher Sicht von besonderem Interesse. In [189] fanden erste Überlegungen zum Recycling von Brennstoffzellen im großtechnischen Maßstab statt. In Anlehnung an diese Untersuchungen und dem aus dem Autoabgaskatalysatorrecycling bekannten Prozess zur Edelmetallrückgewinnung erfolgt die Rückgewinnung des in den Brennstoffzellen eingesetzten Platins in dieser Arbeit durch einen nasschemischen Fällungsprozess.

Zum Themenkomplex des Recyclings, nicht nur der Brennstoffzelle, sondern des gesamten BZ Antriebsstranges sind aber noch weitere Untersuchungen erforderlich, um die stoffliche Rückgewinnung des eingesetzten Edelmetalls, sowie der anderen Materialien zu optimieren.

5.4 Kraftstoffbereitstellung

Die Kraftstoffbereitstellung stellt entsprechend Abbildung 2.4 einen der beiden Bestandteile der Nutzungsphase dar. Die Unterteilung erfolgt nach Kraftstoffart (z.B. Diesel, Erdgas, Wasserstoff) und nach Herstellungsrouten (z.B. Wasserstoff aus Elektrolyse oder Dampfreformierung). Weiterhin ist die Berücksichtigung des Standortes der Kraftstoffbereitstellung in verschiedener Hinsicht relevant, zum einen hinsichtlich der Primärenergieträgerversorgung und Kraftstofflogistik (z.B. landesspezifischer Erdölmix) und zum anderen hinsichtlich der verwendeten Technologie (z.B. Fördertechnologie und Raffineriekonfiguration). Betrachtet werden entsprechend den untersuchten Fahrzeugtypen die Diesel-, Erdgas- und Wasserstoffbereitstellung.

5.4.1 Diesel

Über 98 % des gesamten Transportaufkommens beruht auf erdölbasierten Kraftstoffen [146]. 24 % bzw. 22 % des jährlich in deutschen [148] bzw. europäischen²⁴ [149] Raffinerien umgesetzten Erdöls wird zu Dieseldieselkraftstoff verarbeitet. Die Anforderungen an Diesel sind über die Jahre stetig gestiegen. So wurden im europäischen Auto Oil Programm (AOP) zur Verringerung der Umweltauswirkungen des Verkehrssektors in Zusammenarbeit mit Automobilherstellern und Mineralölfirmen die Spezifikationen für Dieseldieselkraftstoffe in einem Stufenplan festgelegt [49], [6].

Tabelle 5.2 Anforderungen an Dieseldieselkraftstoffe

Spezifikation		1999	AOP I 1.1.2000	BRD 1.11.2001	BRD 1.1.2003	AOP II 1.1.2005
Cetanzahl	min.	-	51	51	51	>51
Dichte	max. kg/m ³		845	845	845	<845
Aromaten	max. Masse %	-	-	-	-	-
PAK ²⁵	max. Masse %	-	11	11	11	11
Schwefel	max. ppm (m)	500	350	50 ²⁶	10 ²²	50 (10) ²⁷

Zur Bestimmung der Umweltwirkungen von an der Tankstelle verfügbarem Dieseldieselkraftstoff wird zunächst ein kurzer Überblick über die Prozesskette der Dieseldieselproduktion gegeben und einzelne Prozesse näher erläutert. Im Anschluss wird anhand eines beispielhaften Vergleichs der Dieseldieselproduktion in drei Ländern bzw. Regionen in einem ersten Schritt die Relevanz einzelner Prozesskettenschritte innerhalb der jeweiligen länderspezifischen Prozessketten analysiert. Der zweite Schritt beinhaltet den Vergleich der Umweltprofile untereinander. Dieses Vorgehen erfolgt ebenfalls für die Kraftstoffe Erdgas und Wasserstoff (siehe Kapitel 5.4.2 und 5.4.3).

Betrachtet man die Herstellungskette des Dieseldiesels vom Bohrloch bis zur Lieferung an die Tankstelle, so ergibt sich die in Abbildung 5.9 vereinfacht dargestellte Prozesskette. Relevante Prozessschritte sind entsprechend [147], [53] und [83] die Raffinerie, die Erdölförderung einschließlich Aufbereitung und je nach Region die Erdölexploration.

²⁴ EU 15

²⁵ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

²⁶ Steuerpräferenz

²⁷ stufenweise bis 2009

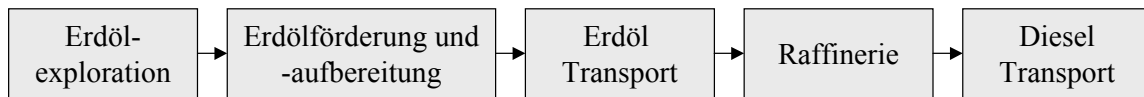


Abbildung 5.9 Produktionskette Diesel

Erdölbereitstellung

Unter der Erdölbereitstellung ist die gesamte Prozesskette von der Exploration mit Hilfe von Probebohrungen über die Erdölförderung und –aufbereitung bis hin zum Transport über den Land- oder Seeweg zur Raffinerie zu verstehen. Zunächst ist zwischen onshore und offshore²⁸ Förderung zu unterscheiden. Je nach Lagerstätte bzw. dem Ausbeutungsgrad der Lagerstätte ist der benötigte Energiebedarf zur Förderung des Erdöls unterschiedlich hoch. Je nach Zusammensetzung des geförderten Erdöls findet eine Aufbereitung statt, bei der mitgefördertes Wasser, Erdölgas und ein Teil des Schwefels abgeschieden werden. Entscheidenden Einfluss haben die im Förderland angewendeten Umweltstandards: Wird z.B. eventuell anfallendes Erdölgas oder Erdgas genutzt, abgefackelt oder unverbrannt in die Atmosphäre entlassen²⁹, wie hoch sind die Abwässer belastet oder wie hoch ist die Leckagerate etc. Die Leckagerate ist relevant beim Ferntransport, wobei zunächst die Entfernung und davon abhängig die Art des Transportes die wesentlichen Parameter sind. Landtransport z.B. aus Russland oder innerhalb des europäischen Festlandes erfolgt vorwiegend über Pipelines. Der Transport aus dem Mittleren Osten, Mittel- und Südamerika erfolgt per Seeweg mit Hilfe von Tankern, die mittlerweile eine Transporttonnage von bis zu 300.000 t aufweisen [54]-[56], [144]. Zum Thema Erdölförderung sind bereits umfangreiche Studien durchgeführt worden, deren Ergebnisse in die vorliegende Arbeit Eingang finden [83], [144].

Raffinerie

Eine Erdölraffinerie ist eine komplexe verfahrenstechnische Anlage, in der durch Trenn-, Umwandlungs- und Nachbehandlungsprozesse je nach Anlagenkonfiguration bis zu über 20 verschiedene Stoffe produziert werden. Je nach Produktspektrum wird die Raffinerie mit verschiedenen Trennanlagen (z.B. Destillationskolonnen), Konversionsanlagen (z.B. verschiedene Cracker) und Nachbehandlungsanlagen (Entschwefelung) konfiguriert. Abbildung 5.10 zeigt das vereinfachte Anlagenschema einer modernen deutschen Großraffinerie. Auf nähere Ausführungen zur Raffinerietechnologie sei an dieser Stelle verzichtet und auf [49]-[52] verwiesen.

Neben der Anlagenkonfiguration, die sich aus dem gewünschten Produktspektrum ergibt, ist das eingesetzte Rohöl mit seinen spezifischen Stoffeigenschaften (z.B. Schwefelgehalt) und die Betriebsweise der Einzelanlagen entscheidend für die letztendlich produzierte Menge der einzelnen Raffinerieprodukte. Sämtliche Prozessstufen hängen aufgrund der Vernetzung voneinander ab, d.h. zur Erstellung des Umweltprofils eines Raffinerieproduktes (z.B. Diesel) ist die Betrachtung der gesamten Raffinerie als Verbund erforderlich.

²⁸ onshore Förderung entspricht Förderung auf dem Festland und offshore Förderung der Förderung auf dem Meer

²⁹ auch Abblasen genannt

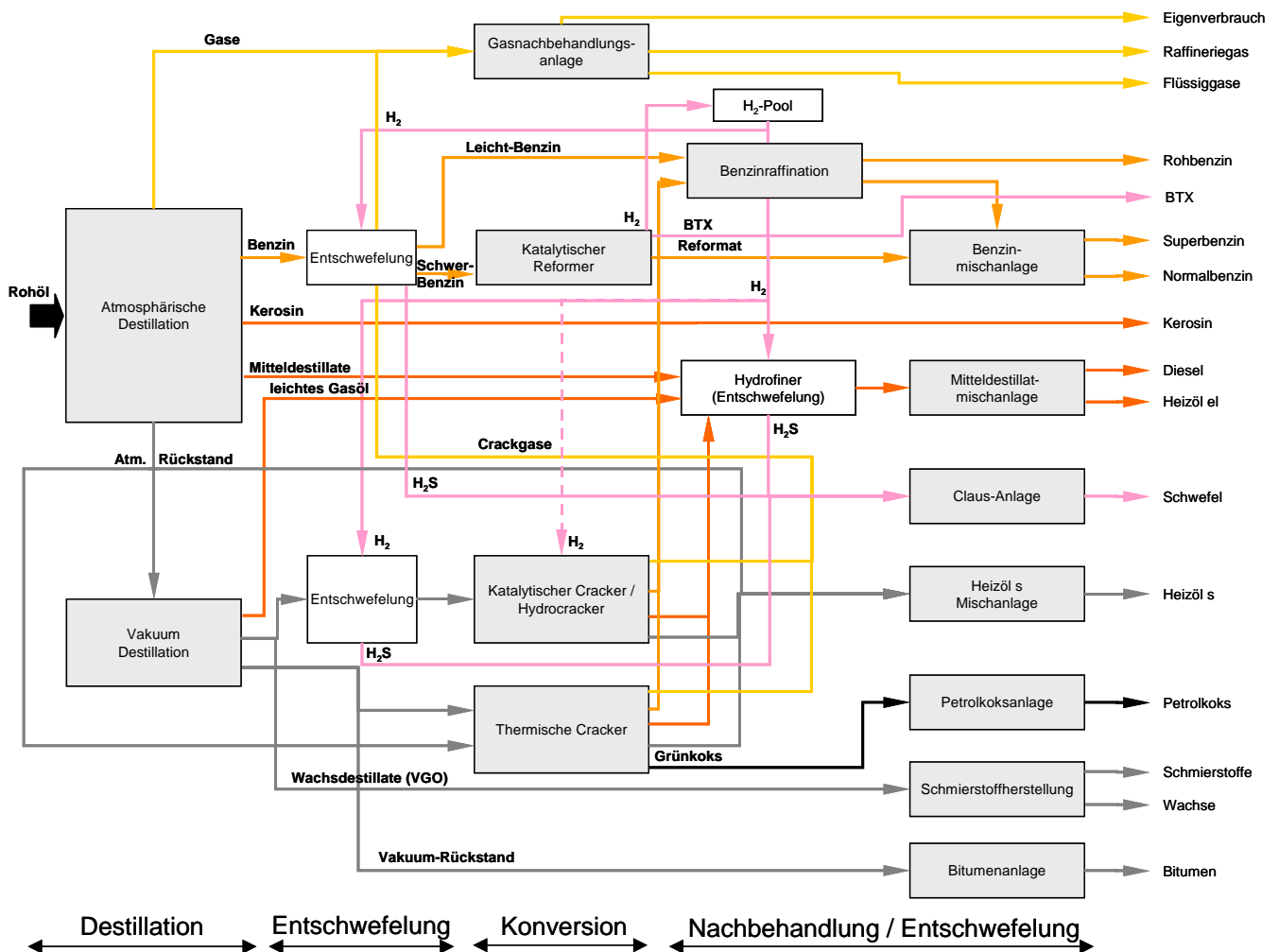


Abbildung 5.10 Vereinfachtes Verfahrensschema einer deutschen Raffinerie

Entsprechend der Aufgabenstellung dieser Arbeit ist für die länderspezifische Analyse von erdöl-basierten Kraftstoffen, im Fall von Bussen Dieselkraftstoffe, ein Raffineriemodell zu erstellen, das folgende Anforderung erfüllt:

- ◆ Abbildung der Prozesskette einer Raffinerie mit allen relevanten Einzelprozessen
- ◆ Modellierung aller wesentlichen Stoff- und Energieströme und deren Emissionen
- ◆ Repräsentativität des Modells zur Abbildung verschiedener regions-/länderspezifischer Technologiestandards
- ◆ Aufbau eines parametrisierten Modells, d.h. es ist möglich, Veränderungen in der Ausbeute einzelner Prozesse (z.B. aufgrund verbesserter Katalysatortechnik), im Produktspektrum der gesamten Raffinerie (z.B. durch veränderte Nachfrage) oder bei den Energieverbräuchen einzelner Anlagen (z.B. durch effizienteres Energiemanagement) darzustellen

Eine detaillierte Beschreibung des entwickelten Modells findet sich in [53].

Relevanzanalyse

Mit Hilfe der Erdölbereitstellungsdaten aus [83] und des entwickelten Raffineriemodells kann nun für die Bereitstellung von Dieselkraftstoff eine Relevanzanalyse der einzelnen Prozessschritte erfolgen. Sie wird hier beispielhaft für drei verschiedene Länder bzw. Regionen durchgeführt. Abbildung 5.11 zeigt neben der Erdgasmixzusammensetzung, den Primärenergiebedarf und ausgewählte Emissionen für die Bereitstellung frei Tankstelle³⁰ in Deutschland, Portugal und Westeuropa³¹.

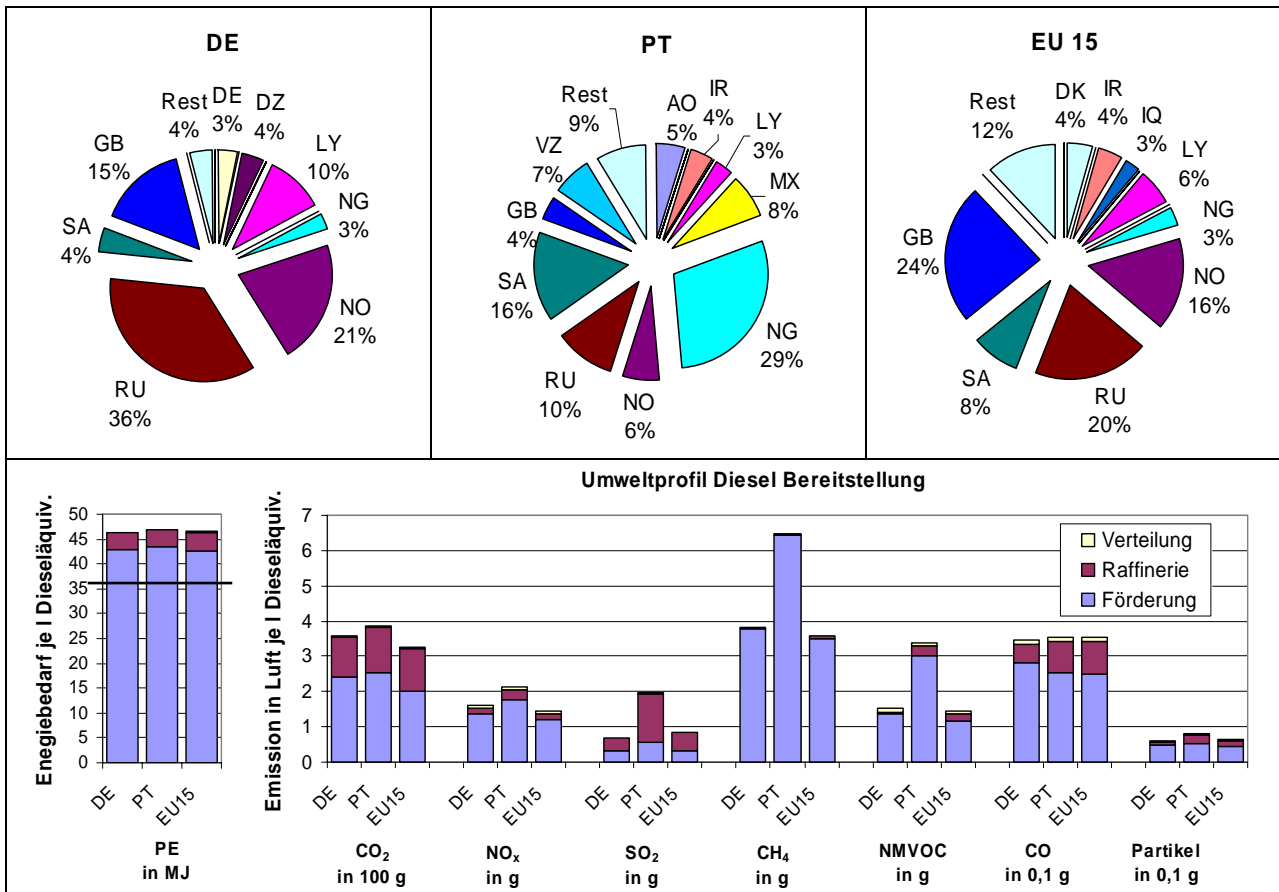


Abbildung 5.11 Erdölmix und Umweltprofil der Dieselkraftstoffbereitstellung in Deutschland, Portugal und Europa (EU 15), Bezugsjahr 2001

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass die Erdölförderung bei den meisten Emissionen dominiert. Bei den SO₂ Emissionen verursacht die Verarbeitung des Erdöls in der Raffinerie den Großteil der Emissionen, vor allem in Portugal. Die hohen Kohlenwasserstoffemissionen des portugiesischen Diesels sind auf Abblasvorgänge von Erdgas bzw. Erdölgas bei der Förderung des vorwiegend aus dem Mittleren Osten stammenden Erdöls zurückzuführen. Bei der Betrachtung des Primärenergiebedarfs, der praktisch ausschließlich aus nicht erneuerbaren Ressourcen stammt, ist zu berücksichtigen, dass der Förderungsbalken den als Linie angedeuteten Heizwert eines Liters Diesel beinhaltet. Dieser beträgt 35,6 MJ und dieser Energieinhalt ist gleichzeitig die

³⁰ Bereitstellung frei Tankstelle beinhaltet analog zu Erdöl frei Raffinerie die gesamte Prozesskette der Dieselbereitstellung einschließlich der Lieferung an die Tankstelle

³¹ EU 15

Bezugseinheit für die Darstellung der Umweltprofile aller hier betrachteten Kraftstoffe, d.h. die Emissionen und der Primärenergiebedarf werden für die Bereitstellung, 0,8-0,86 kg Erdgas³² (Kapitel 0) und 0,3 kg Wasserstoff (Kapitel 5.4.3) angegeben.

5.4.2 Erdgas

Die Prozesskette der Erdgasbereitstellung, genauer des komprimierten Erdgases (CNG – Compressed Natural Gas) lässt sich entsprechend Abbildung 5.12 zusammenfassen.

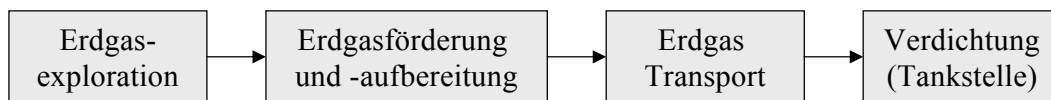


Abbildung 5.12 Prozesskette Erdgas

Verfolgt man analog zum Diesel die Kette vom Bohrloch bis zur Tankstelle, so gehen der Verdichtung lokal an der Tankstelle der Transport, die Förderung und Aufbereitung des Erdgases voraus. Am Beginn der Kette steht die Exploration, also die Suche nach Erdgasvorkommen. Die Exploration und Förderung ähnelt der von Erdöl, nicht zuletzt, weil Erdöl und Erdgas oft gemeinsam vorkommen und gefördert werden. Die Aufbereitung besteht im Wesentlichen aus der Abtrennung von Verunreinigungen, wie zum Beispiel Schwefel, CO₂ und längerkettigen Kohlenwasserstoffverbindungen. Der Transport erfolgt hauptsächlich per Pipeline. Für den Transport über größere Distanzen per LNG³³-Tanker wird das Erdgas durch Abkühlen verflüssigt, am Zielhafen wieder entspannt und von dort per Pipeline weiter verfrachtet. Zur Erhöhung der gespeicherten Menge an Bord der erdgasbetriebenen Fahrzeuge wird das Erdgas an der Tankstelle auf 200-250 bar verdichtet.

Relevanzanalyse

Abbildung 5.13 zeigt am Beispiel des deutschen, portugiesischen und europäischen Erdgasmixes den Beitrag der verschiedenen Prozessschritte zu den relevanten Emissionen in Luft. Die Daten stammen aus [83] und beziehen sich auf das Jahr 2001.

Die Darstellung des nahezu ausschließlich auf nicht erneuerbaren Ressourcen basierenden Primärenergiebedarfs beinhaltet in Übereinstimmung mit Abbildung 5.11 den Heizwert eines Liters Diesel (35,6 MJ). Je nach betrachteter Emission ist die Erdgasförderung und Aufbereitung bzw. die Verdichtung der bedeutendste Kontributor. Analog zum Erdöl ist bei der Förderung entscheidend, welche Energie zur Förderung des Erdgases aufgebracht werden muss, welche Emissionen, vor allem in Luft, aus Leckagen, Abblasvorgängen und Fackeln resultieren. Für die Verdichtung ist ausschlaggebend, wie der benötigte Strom erzeugt wird. Hier zeigt sich, dass der portugiesische Strom mit relativ hohen Emissionen behaftet ist (siehe auch Abbildung 5.15). Der Transport des Erdgases ist im Hinblick auf die Kohlenwasserstoffemissionen (CH₄/NMVOC)

³² 1 l Diesel Äquivalent mit einem Energieinhalt von 35,6 MJ entspricht 0,835 kg Diesel bzw. 0,81 kg portugiesischem Erdgas, 0,86 kg deutschem Erdgas und 0,83 kg europäischem Erdgas

³³ LNG: Liquefied Natural Gas

ökologisch relevant, vor allem für den deutschen Erdgasmix. Hier kommt die Leckage des über sehr lange Strecken in Pipelines transportierten russischen Erdgases zum Tragen [178].

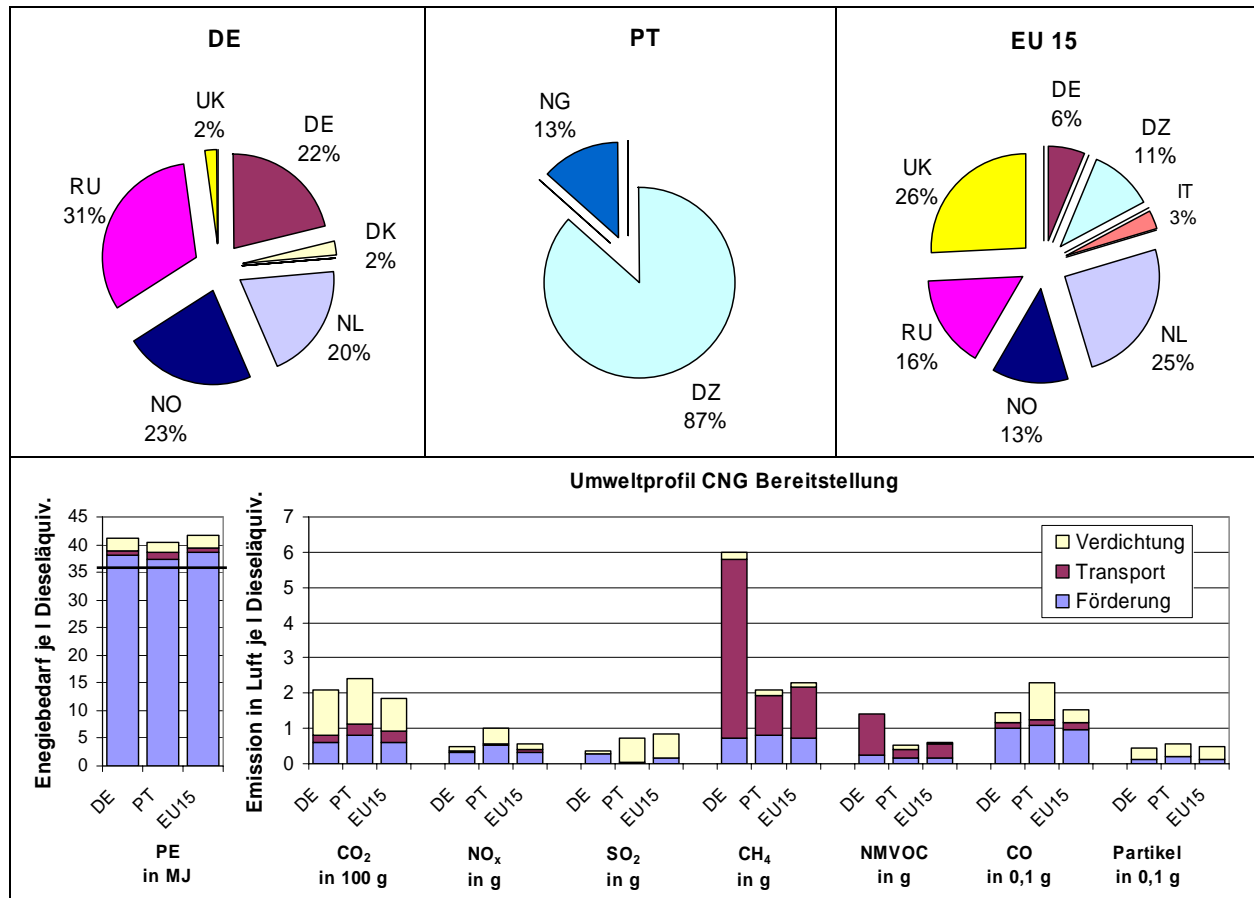


Abbildung 5.13 Erdgasmix und Umweltprofil der CNG Kraftstoffbereitstellung in Deutschland, Portugal und Europa (EU 15), Bezugsjahr 2001

5.4.3 Wasserstoff

Wie bereits in Abbildung 2.1 gezeigt, lässt sich Wasserstoff über eine Vielzahl von Routen herstellen. Entsprechend Abbildung 5.14 ist die Produktion über Dampfreformierung von Erdgas (englisch: Steam reforming) weltweit am bedeutendsten. Die Erzeugung über die Elektrolyse von Wasser, d.h. Wasser wird elektrochemisch in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten, spielt zur Zeit eine untergeordnete Rolle. Im Zusammenhang mit Wasserstoff als Kraftstoff für den Transportsektor jedoch wird sie als relevant angesehen, da sich die Elektrolysetechnologie für die dezentrale Erzeugung von Wasserstoff in Anlagen mit kleinen Kapazitäten (bis zu einige 100 Nm³/h) anbietet. Zudem ist der so erzeugte Wasserstoff prozessbedingt von sehr hoher Reinheit, wie sie für Brennstoffzellen-Anwendungen erforderlich ist. Die Herstellung von Wasserstoff aus Erdöl und Kohle erfolgt vorwiegend für den industriellen Bedarf, v.a. in der erdölverarbeitenden Industrie, der Elektronik, Stahl- und Lebensmittelindustrie sowie der Düngerindustrie [150]. Nähere Erläuterungen zu den genannten Herstellungsrouten finden sich in [152] und im Anhang B.1. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf diese beiden für kleine Anlagenkapazitäten wirtschaftlichsten Herstellungsrouten [150], zumal sich bei diesen Routen durch die Wahl des Pri-

märenergieträgers (Erdgas oder Biogas bzw. Strom aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Ressourcen) eine Vielzahl von Herstellungsvarianten ergeben. Informationen zu weiteren Herstellungsmöglichkeiten, z.B. Wasserstoff aus schnellwachsenden Algenkulturen finden sich in der Literatur [151]. Weitere Wasserstoffherzeugungsrouten können dem Modell jederzeit hinzugefügt werden.

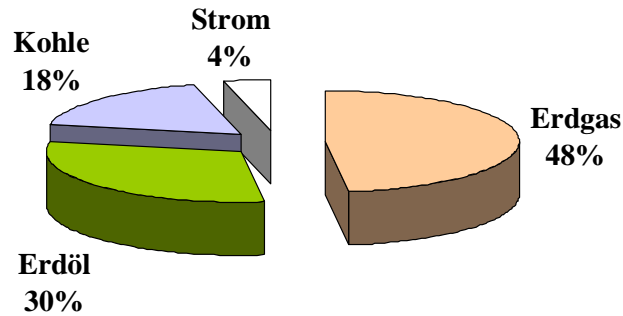


Abbildung 5.14 Anteil verschiedener Energieträger an der weltweiten Wasserstoffproduktion in 2000 [56]

Zentrale und dezentrale Wasserstoffherzeugung

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal bei der Wasserstoffherstellung ist die zentrale oder dezentrale H_2 Erzeugung. Zentral bedeutet, dass der Wasserstoff in Anlagen mit großen Kapazitäten (Anlagen mit $100.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ sind Standard) [150] erzeugt und per Lkw in flüssiger oder gasförmiger Form oder per Pipeline in gasförmiger Form zum Verbraucher, sprich zur Tankstelle, transportiert wird. Dezentrale Erzeugung heißt, dass der Wasserstoff direkt beim Verbraucher, also bei der Tankstelle in Anlagen mit kleinerer Kapazität produziert wird. So sind beispielsweise für den ersten Großflottenversuch mit wasserstoffbetriebenen BZ-Omnibussen sieben Anlagen mit einer Kapazität von $50\text{-}100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ in sieben Städten Europas zur Versorgung von jeweils drei BZ-Bussen errichtet worden.

Effizienz der Wasserstoffherzeugungsanlagen η_{Anlage}

Diese kleinen dezentralen Anlagen sind im Falle der Dampfreformertechnologie technisches Neuland, d.h. hier sind aufgrund des Prototypencharakters Effizienzdefizite gegenüber Großanlagen zu erwarten, die über Jahrzehnte optimiert wurden. Im Bereich der Druckelektrolyseure gibt es bisher nur eine relativ geringe Anzahl installierter Anlagen. Diese weisen im Vergleich zu Elektrolyseuren, die bei atmosphärischem Druck arbeiten, schlechtere Wirkungsgrade auf. Zu berücksichtigen ist, dass zurzeit bei den Anlagen mit „großen“ Kapazitäten zwischen Elektrolyseuren und Dampfreformern mehrere Größenordnungen ($500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ gegenüber $100.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$) liegen. Eine Quantifizierung dieser Effizienzunterschiede ist Tabelle 5.3 zu entnehmen. Zu beachten ist, dass die in Tabelle 5.3 gezeigten Anlageneffizienzen sich auf den Endenergiebedarf beziehen, d.h. es gilt für

die Effizienz des Dampfreformers:
$$\eta_{Anlage} = \frac{m_{H_2} * H_{H_2}}{m_{Erdgas} * H_{Erdgas} + E_{Strom}} \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

mit m_{H_2} : Masse produzierter Wasserstoff
 H_{H_2} : Heizwert Wasserstoff
 m_{Erdgas} : Masse verbrauchtes Erdgas
 HW_{Erdgas} : Heizwert Erdgas
 E_{Strom} : Menge elektrischer Strom,

Für die Effizienz des Elektrolyseurs gilt:
$$\eta_{Anlage} = \frac{m_{H_2} * H_{H_2}}{E_{Strom}} \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

mit m_{H_2} : Masse produzierter Wasserstoff
 H_{H_2} : Heizwert Wasserstoff
 E_{Strom} : Menge elektrischer Strom

Die so berechneten Wirkungsgrade aktueller Anlagen in Abhängigkeit der Anlagenkapazität stehen in Tabelle 5.3 in der Spalte η_{heute} . Die Tabelle enthält außerdem neben den theoretischen, d.h. den maximal erreichbaren Wirkungsgraden je Route noch die Potentiale für die Anlagenwirkungsgrade, wie sie sich aus Gesprächen mit Herstellern und einer Literaturrecherche ergeben [56],[152],[162], [163].

Tabelle 5.3 Anlagenwirkungsgrade heute und in Zukunft

Verfahren	Kapazität	$\eta_{theoret.}$	η_{heute}	η_{2007}	η_{2010}
Dampfreformer	<1000 Nm ³ /h	94 %	61 %	66 %	70 %
	> 1000 Nm ³ /h		74 %	76 %	78 %
Elektrolyseur	< 100 Nm ³ /h	84,7 % (3,54 kWh/ Nm ³ H ₂)	59 %	65 %	72 %
	> 100 Nm ³ /h		75 %	76 %	77 %

Effizienz der gesamten Wasserstofferzeugungskette η_{gesamt}

Sind für Betreiber der Wasserstofferzeugungsanlagen die Wirkungsgrade derselben hinsichtlich der Betriebskosten relevant, so ist aus Sicht des Lebenszyklus der Gesamtwirkungsgrad von entscheidenderer Bedeutung. Neben dem reinen Anlagenwirkungsgrad zur Herstellung und Komprimierung des Wasserstoffs ist hierzu auch die als Vorketten bezeichnete Bereitstellung der eingesetzten Energieträger zu berücksichtigen. Für den Dampfreformer sind das Erdgas und Strom; für den Elektrolyseur ist es ausschließlich Strom.

Erdgasreformer

Den in Abbildung 5.16 ermittelten Gesamteffizienzen liegen neben den in Tabelle 5.3 genannten Anlagenwirkungsgraden und der Erdgasbereitstellung, entsprechend Kapitel 5.4.2, die jeweiligen länderspezifischen Strommixe zugrunde. Die Strombereitstellung hat aufgrund des relativ hohen

spezifischen Stromverbrauchs (siehe Tabelle 5.4) für Wasserstoffherstellung und Verdichtung einen relevanten Einfluss auf das Umweltprofil. Tabelle 5.4 enthält die gemittelten Kenndaten der im Rahmen des CUTE Projektes installierten Prototypen.

Tabelle 5.4 Kenndaten der H₂ Herstellung mittels dezentraler Dampfreformierung von Erdgas

	Heute
Wirkungsgrad Reformer (eingesetztes Erdgas/ Heizwert produzierter H ₂)	61 %
Strombedarf (Dampfreformer + Verdichtung auf 440 bar)	0,44 kWh / Nm ³ H ₂ + 0,4 kWh / Nm ³ H ₂
Wasserbedarf	1,4 kg / Nm ³ H ₂
Luftbedarf	3,03 kg / Nm ³ H ₂
Standzeit Reformer	20 Jahre
Stillstandsdauer	15 Tage pro Jahr
CO pro Nm ³ Abluft	80 mg pro Nm ³ Abluft
NO _x pro Nm ³ Abluft	125 mg pro Nm ³ Abluft
H ₂ S pro Nm ³ Abluft	5 mg pro Nm ³ Abluft

Abbildung 5.15 stellt zunächst die jeweilige Zusammensetzung der Strommixe und die Emissionen je kWh erzeugten Stroms dar.

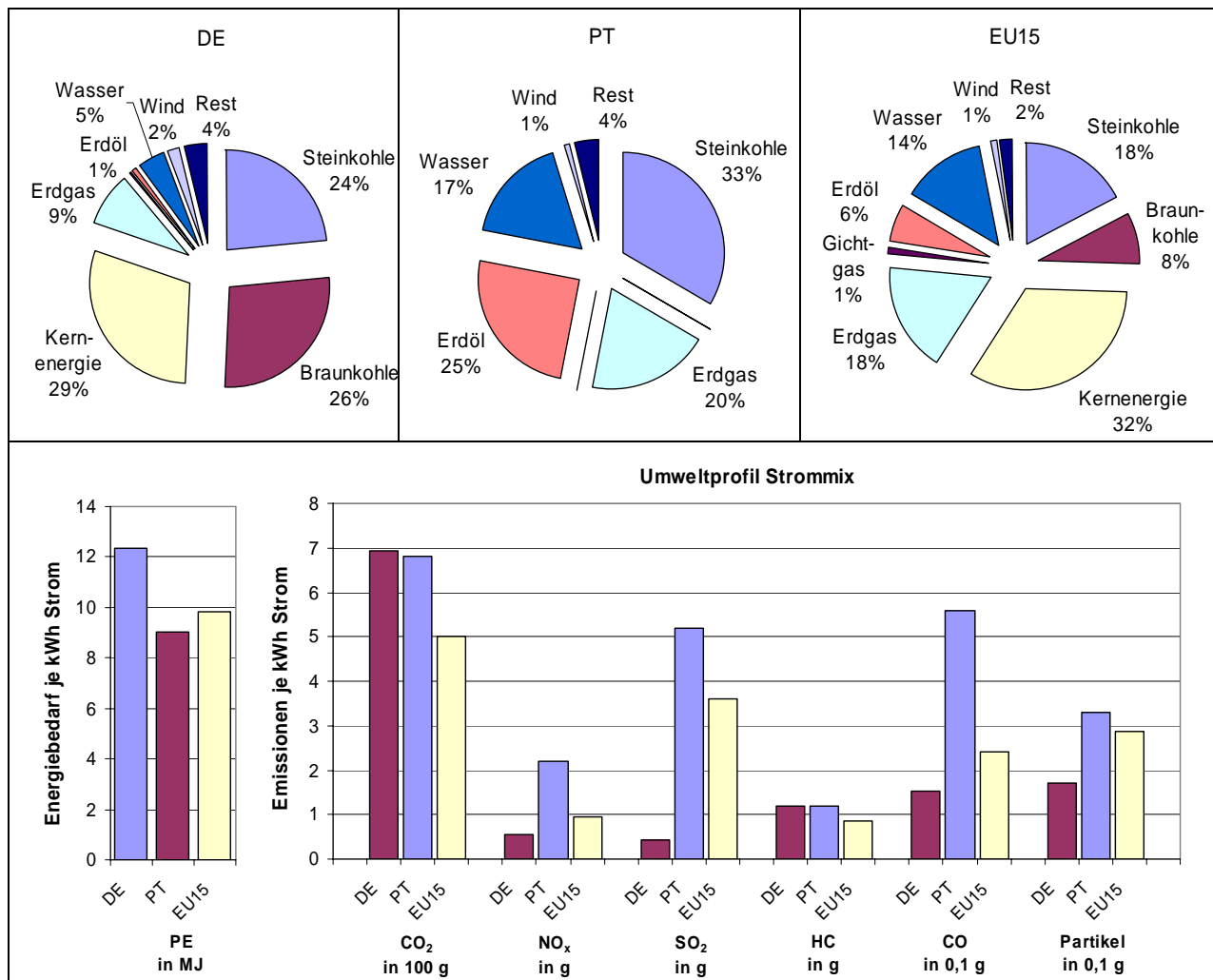


Abbildung 5.15 Strommixzusammensetzung, Primärenergiebedarf und Emissionen für Deutschland, Portugal und Europa (EU15), Bezugsjahr 2001

Wie bei der Erdgasbereitstellung (siehe Abbildung 5.12) sind bei der Stromerzeugung signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Ländern bzw. Regionen erkennbar. Diese sind zum einen bedingt durch die Zusammensetzung des Strommixes und zum anderen durch die installierte Kraftwerkstechnologie (Wirkungsgrad, Abgasreinigungstechnologie etc.). Der Anteil nicht erneuerbarer Energieträger liegt bei allen drei Strommixen über 75 %. Portugal weist bei allen Emissionen bis auf CO₂ die höchsten Werte auf. Dies ist auf den im Vergleich zu Deutschland und Europa noch etwas geringeren Anteil an installierten Rauchgasreinigungsanlagen zurückzuführen bzw. auf deren geringere Effizienz. Deutschland zeichnet sich dagegen speziell bei den NO_x und SO₂ Emissionen durch besonders niedrige Ausstoßmengen aus, da auf die Reduktion dieser Emissionen in den vergangenen Jahren besonderes Augenmerk gelegt wurde.

Abbildung 5.16 zeigt die Gesamteffizienz und den gesamten Primärenergiebedarf der Wasserstoffherstellung³⁴ aus Erdgas mit unterschiedlichem länderspezifischen Erdgas (siehe auch Kapitel 5.4.2) und Strom für die Länder Deutschland, Portugal und Europa. Die Anlage und ihr Verbrauch (siehe Tabelle 5.4) ist jeweils dieselbe. Der geringere Primärenergiebedarf der portugiesischen Strombereitstellung schlägt sich in einer verbesserten Effizienz gegenüber der H₂ Erzeugung unter deutschen bzw. europäischen Randbedingungen nieder.

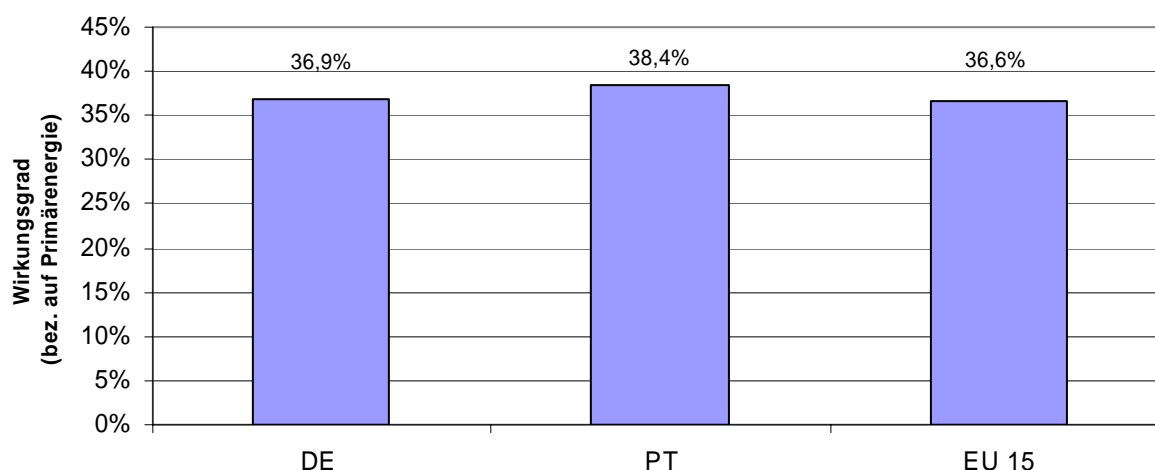


Abbildung 5.16 Effizienz der gesamten Herstellungskette von Wasserstoff aus Erdgas

Noch deutlicher als beim Energieverbrauch wirkt sich der Einfluss der Energieträgerbereitstellung bei den Emissionen der Wasserstoffherstellung aus. Abbildung 5.17 zeigt die Emissionen der Wasserstoffherzeugung mittels derselben Dampfreformeranlage, nur die Energievorketten wurden variiert. So kommt neben Erdgas frei Abnehmer Deutschland und Erdgas frei Abnehmer Portugal, Erdgas entsprechend dem europäischen Verbrauchsmix³⁵ zum Einsatz. Die Zusammensetzung des jeweiligen Erdgasmixes kann Abbildung 5.12 entnommen werden. Der benötigte Strom wird ebenfalls entsprechend dem länderspezifischen Strommix variiert. Beim Strom spie-

³⁴ inklusive Verdichtung auf 440 bar

³⁵ Der europäische Erdgasverbrauchsmix setzt sich hier aus dem innerhalb Europas (EU 15) geförderten und dem nach Europa (EU 15) importierten Erdgas zusammen. Bezugsjahr ist 2001.

len vor allem die Emissionen der energieträgerspezifischen Kraftwerke in Abhängigkeit von der Energieträgerzusammensetzung des Strommixes die Hauptrolle.

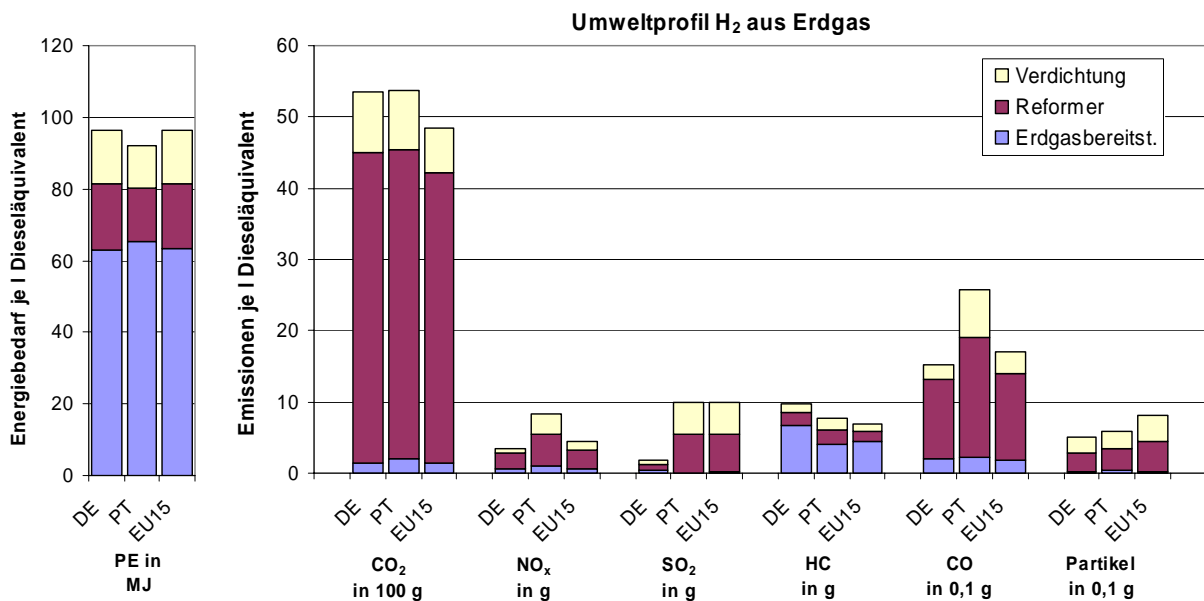


Abbildung 5.17 Primärenergiebedarf und Emissionen in Luft bei der Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas

Abbildung 5.17 zeigt die Überlagerung der Erdgasbereitstellung und Strombereitstellung. Die eigentlichen Prozessemissionen der Reformieranlage sind entsprechend der Randbedingungen identisch. Insgesamt weist der in Portugal erzeugte Wasserstoff die höchsten CO₂, NO_x und CO Emissionen auf. Bei der Betrachtung des Primärenergiebedarfs ist zu berücksichtigen, dass der Teilbalken für die Erdgasbereitstellung den im Wasserstoff gespeicherten Heizwert mitbeinhaltet. Zur besseren Vergleichbarkeit mit der Diesel- und CNG Bereitstellung sind sämtliche Angaben ebenfalls auf 1 Liter Dieseläquivalent³⁶ bezogen. Im Vergleich zu den beiden Kraftstoffen weist die H₂ Bereitstellung einen wesentlich höheren Primärenergiebedarf und wesentlich höhere Emissionen auf. Es ist daher zu klären, ob der schadstofffreie Busbetrieb diesen umweltlichen Nachteil kompensieren kann.

Elektrolyse

Die Relevanz der Energieträger ist für die Herstellung von Wasserstoff über Elektrolyse noch deutlicher, da die Anlage keine weiteren Energieträger außer Strom benötigt und auch keine wesentlichen Prozessemissionen aufweist. Zur Bereitstellung des Stroms stehen verschiedenste Optionen zur Verfügung. Eine Möglichkeit ist, den Strom aus dem Netz entsprechend dem landesüblichen Strommix zu beziehen. Abbildung 5.15 gibt Beispiele für die Zusammensetzung des Strommixes in Deutschland und Portugal sowie für Westeuropa³⁷. Es zeigt sich, dass momentan die Strommixe, zumindest in den meisten Ländern Europas und auch der Welt [57], noch vor-

³⁶ entspricht einem Energienhalt von 35,6 MJ (heizwertbasiert)

³⁷ EU 15

wiegend auf den nicht erneuerbaren Energieträgern Stein-/Braunkohle, Erdgas, Erdöl und Uran basieren.

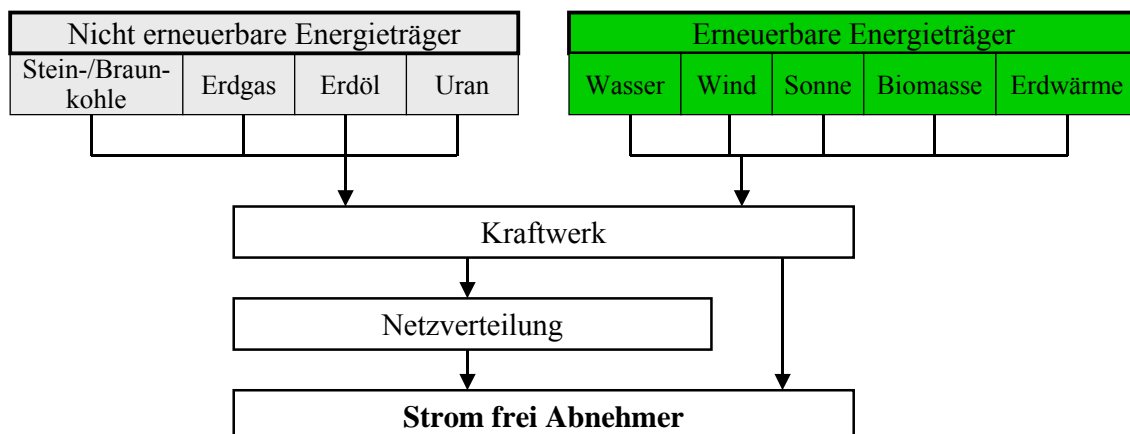


Abbildung 5.18 Vereinfachtes Schaubild der Stromerzeugung

Weitere Möglichkeiten der Stromerzeugung sind entsprechend Abbildung 5.18 die Generierung von Strom aus den erneuerbaren Energieträgern Wasser, Wind, Sonne etc. Die Wahl des Primärenergieträgers bzw. des Primärenergieträgermixes entscheidet über den absoluten Primärenergiebedarf der Stromerzeugung aufgrund der spezifischen Kraftwerkwirkungsgrade, ebenso wie über den jeweiligen Anteil erneuerbarer bzw. nicht erneuerbarer Energieträger. Die gemittelten Kenndaten der Elektrolyseuranlagen zur onsite Wasserstoffherzeugung³⁸ sind in Tabelle 5.5 aufgeführt.

Tabelle 5.5 Kenndaten der H₂ Herstellung mittels dezentraler Elektrolyse von Wasser

	Heute
Wirkungsgrad Elektrolyse (eingesetzter Strom/ Heizwert produzierter H ₂)	62 %
Strombedarf (Elektrolyse + Verdichtung auf 440 bar)	5,1 kWh / Nm ³ H ₂ + 0,4 kWh / Nm ³ H ₂
Wasserbedarf	1 kg / Nm ³ H ₂
Standzeit Elektrolyseur	20 Jahre
Stillstandsdauer	7 Tage pro Jahr

Abbildung 5.19 zeigt die Effizienz der Elektrolyseroute in Abhängigkeit der gewählten Strombereitstellung. Die wasserkraftbasierte Route weist die höchste Effizienz aufgrund ihres Stromerzeugungswirkungsgrades von 84 % auf. Deutlich niedrigere Effizienz weisen die drei Routen auf, die den länder- bzw. regionspezifischen Netzstrom verwenden.

³⁸ Erzeugung des Wasserstoffs direkt am Verbrauchsort

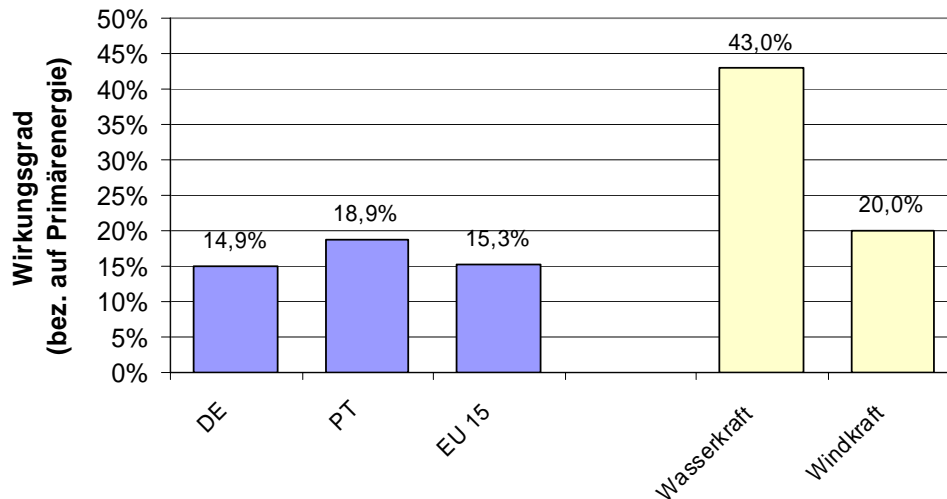


Abbildung 5.19 Effizienz der gesamten Herstellungskette von Wasserstoff aus Elektrolyse³⁹

Entscheidend ist aber nicht so sehr die Effizienz der Kette, sondern vielmehr die Minimierung des Anteils nicht erneuerbarer Energieträger im Hinblick auf eine Steigerung der Nachhaltigkeit bei der Wasserstoffproduktion (siehe Abbildung 5.20).

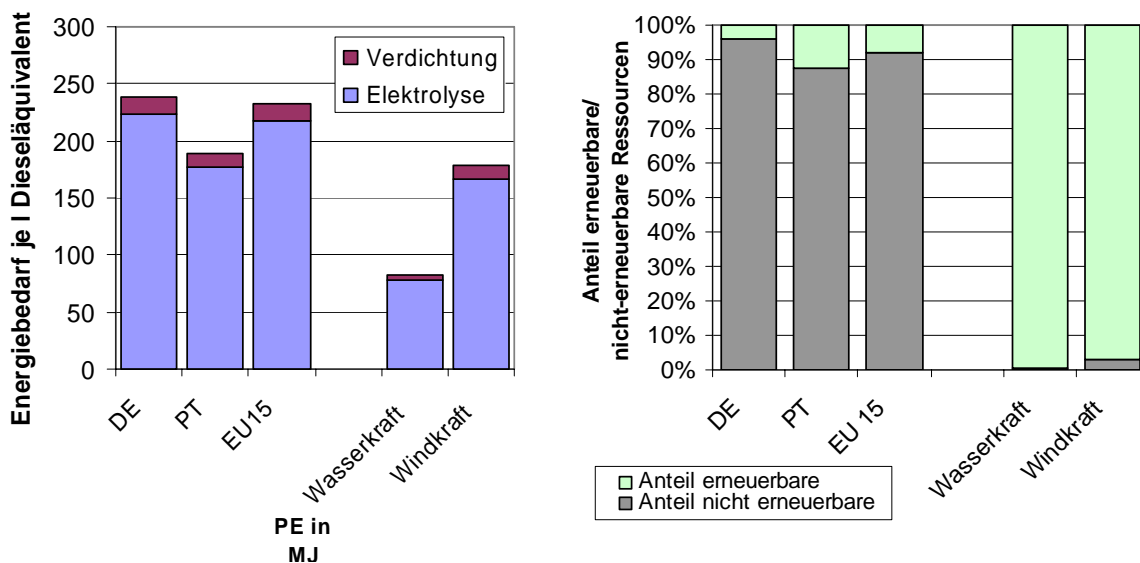


Abbildung 5.20 Primärenergiebedarf und Anteil erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energieträger bei der elektrolysebasierten Wasserstoffherstellung

Beim Vergleich der Wirkungsgrade in Abbildung 5.16 ist erkennbar, dass die elektrolysebasierte Herstellung von Wasserstoff unter Verwendung von Strom aus nicht erneuerbaren Energieträgern energetisch wenig sinnvoll ist.

Die aus Sicht einer gesteigerten Nachhaltigkeit wünschenswerte Maximierung des Anteils erneuerbarer Energieträger, wie er u.a. in [2] und [1] als erklärtes Ziel der europäischen Energie- und Verkehrspolitik formuliert wird, gilt selbstverständlich auch für die beiden anderen bereits diskutierten Kraftstoffe Diesel und CNG. Eine Senkung des Anteils nicht erneuerbarer Energieträger lässt sich über die Substitution der fossilen Basis Erdöl bzw. Erdgas durch Biomasse errei-

³⁹ inklusive Verdichtung auf 440 bar

chen [20]. Diesel lässt sich entweder aus Pflanzenölen oder mittels einer Kombination aus Biomassevergasung und Fischer-Tropsch Synthese (BTL-Verfahren) herstellen. Erdgas lässt sich durch Biogas als SNG (Substitute Natural Gas) ersetzen. Nähere Information hierzu finden sich z.B. in [154], [179] für BTL und in [180] für SNG. Diese Verfahren werden aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Als Ergänzung sind sie in kursiver Schrift in Abbildung 5.23 mit dargestellt.

Bei Betrachtung der Emissionen in Luft in Abbildung 5.21 zeigt sich ein analoges Bild zum nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf, d.h. alle Stromerzeugungspfade mit einem hohen Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen weisen auch hohe Emissionen auf.

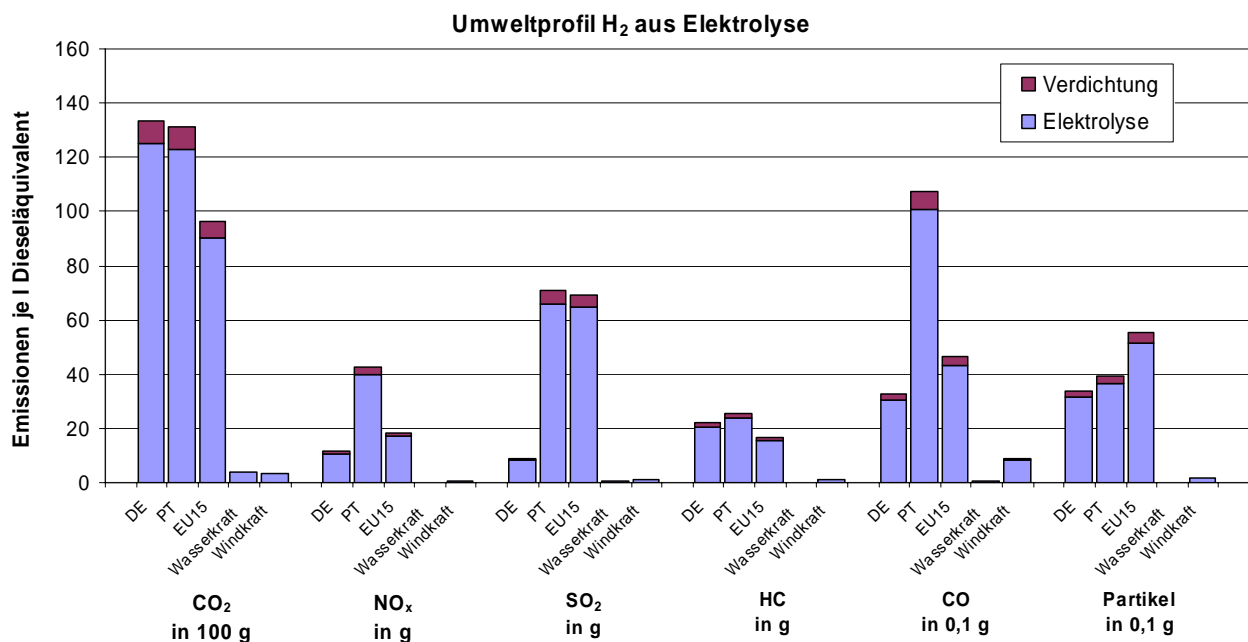


Abbildung 5.21 Emissionen in die Luft bei der Herstellung von Wasserstoff Elektrolyse

Berücksichtigung der Produktionsanlagen

Üblicherweise wird bei Prozessen im großindustriellen Maßstab die Herstellung, Wartung und Entsorgung der Prozessanlagen nicht berücksichtigt, da sie gegenüber den Umweltwirkungen der Nutzungsphase dieser Anlagen nicht ins Gewicht fallen. In der Literatur wird der Anteil dieser Anlageninfrastruktur mit einem Beitrag von kleiner 1-2 % angegeben. So beziffert [144] beispielsweise für ein Kohlekraftwerk den Anteil der Infrastruktur am Primärenergiebedarf einer kWh erzeugten Stroms mit ca. 1 %. Für die Produktion eines Liter Diesels beträgt der Anteil <0,1 %. Dieser geringe Anteil lässt sich durch Verteilung der Aufwendungen für die Anlageninfrastruktur auf die Menge an produziertem Produkt erklären, die sich aus den großen Anlagenkapazitäten (ein Kohlekraftwerk hat eine Kapazität von 1000 oder mehr MW, eine Raffinerie 15 Mio. Jahrestonnen) und Anlagenlebensdauern von 30 und mehr Jahren ergeben. Ein Anteil von wenigen Prozentpunkten liegt im Bereich der Schwankungsbreite der Ergebnisse aufgrund von Datenungenauigkeiten und kann daher vernachlässigt werden. Nun weisen die hier untersuchten

dezentralen Produktionsanlagen deutlich geringere Kapazitäten (60-100 Nm³/h) auf, daher wird an dieser Stelle die Bedeutung der Bereitstellung der Anlageninfrastruktur⁴⁰ für das Umweltprofil des in solchen Kleinanlagen produzierten Wasserstoffs geprüft. Hierzu wird auf Daten aus [60] zurückgegriffen, die im Rahmen des EU geförderten Projektes CUTE ermittelt wurden. Die detaillierten Randbedingungen können dort nachgelesen werden.

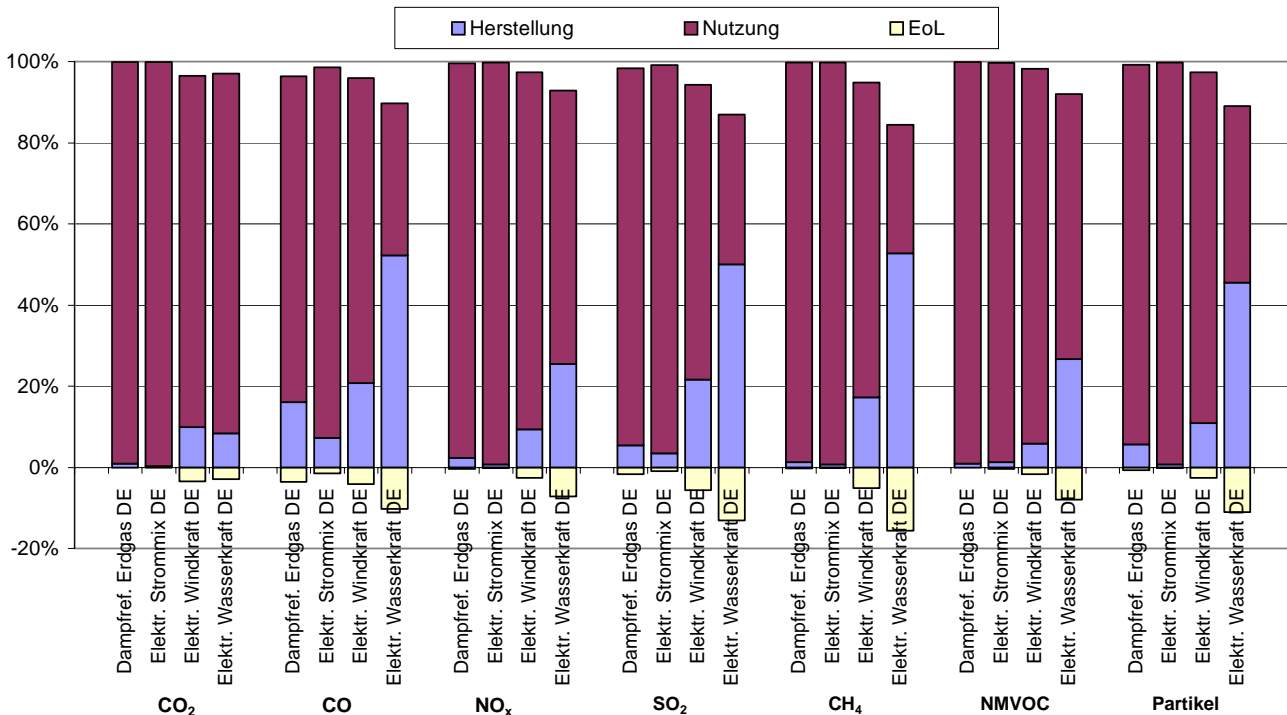


Abbildung 5.22 Anteil der Anlageninfrastruktur bei der Herstellung von Wasserstoff mittels unterschiedlicher Energieträger und Produktionsrouten

Es zeigt sich, dass die Wahl des Primärenergieträgers bestimmend ist für die Relevanz der Anlageninfrastruktur. Ihr Anteil beträgt bei den auf regenerativen Energieträgern basierenden Routen 10 bis 53 % und ist nicht vernachlässigbar. Für die auf nicht regenerativen Energieträgern basierenden Routen ist der Einfluss deutlich geringer (1 bis 5 %), lediglich beim CO erreicht die Herstellung der Anlageninfrastruktur Werte bis zu 18 %. Der Lebenszyklus der Wasserstoffproduktionsanlagen ist folglich zu berücksichtigen, wobei auf das deutlich niedrigere absolute Emissionsniveau der auf regenerativen Energieträgern basierenden Routen hinzuweisen ist. Für Anlagen größerer Kapazität ist mit einer sinkenden Bedeutung der Produktionsanlagen, ähnlich wie z.B. bei den Anlagen zur Dieselherstellung, zu rechnen.

5.4.4 Zusammenfassung Kraftstoffbereitstellung

In den Kapitel 5.4.1 bis 5.4.3 wurden drei verschiedene Kraftstoffe und ausgewählte Herstellungsrouten bezüglich relevanter Einflussfaktoren auf das Umweltprofil des jeweiligen Kraftstoff-

⁴⁰ Die Aufwendungen für die Herstellung und Entsorgung der Anlagen werden anteilig auf die über die Anlagenlebensdauer produzierte H₂ Menge umgelegt und in Abbildung 5.22 als Herstellungs- bzw. EoL Balken dargestellt. Die Wartungsaufwendungen werden zusammen mit der Bereitstellung der Energieträger, den Prozessemissionen etc. in der Nutzung berücksichtigt.

fes analysiert. In Abbildung 5.23 sind die Herstellungsrouten dargestellt und im Sinne der Vollständigkeit noch um einzelne im vorigen Kapitel erwähnte Kraftstoffe ergänzt.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen, sind die Ketten thematisch gegliedert, d.h. sie sind in vergleichbare Prozesse bzw. Operationen unterteilt. Im Rahmen des Modells ergeben sich mit Blick auf das Ziel der Arbeit vier Bereiche, die folgende Faktoren adressieren:

- ◆ Art des Kraftstoffs
- ◆ Gewählte Herstellungsrouten
- ◆ Art des Primärenergieträgers
- ◆ Herkunft des Primärenergieträgers

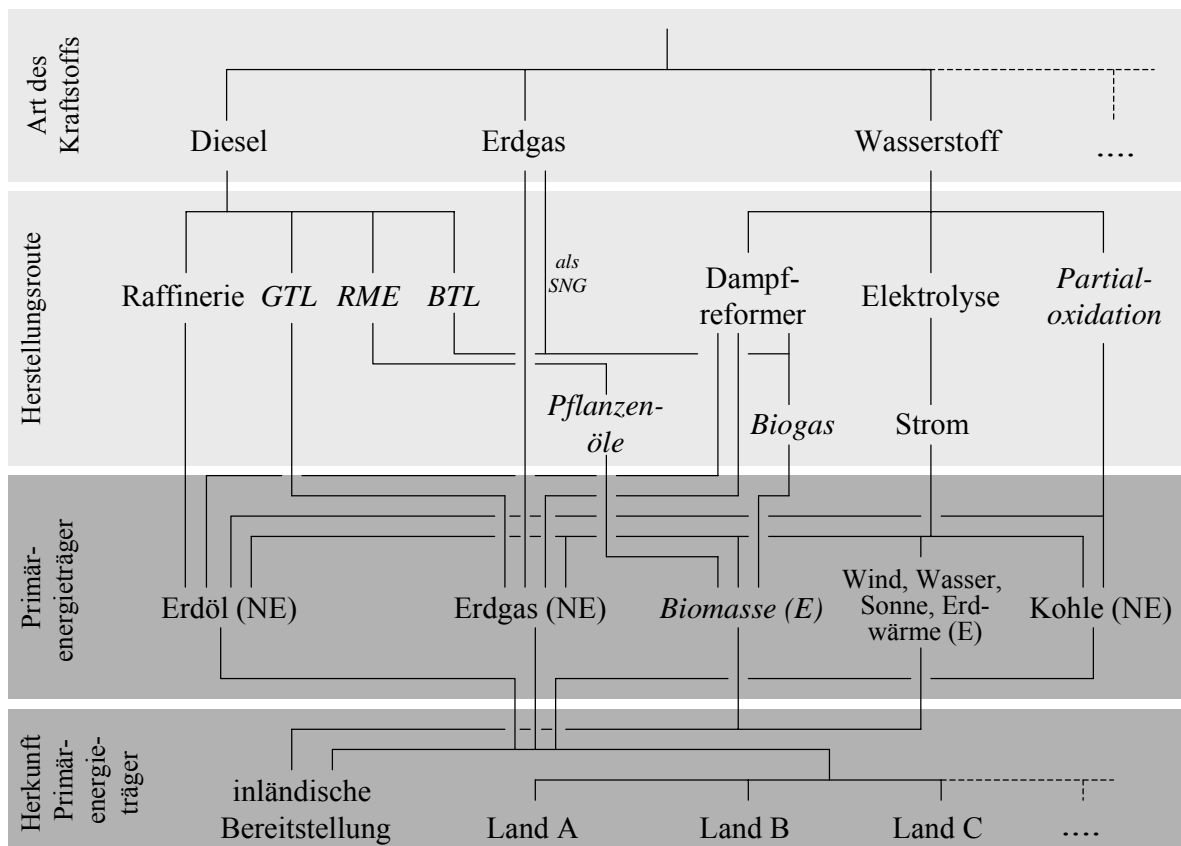


Abbildung 5.23 Gegliederte Übersicht der Kraftstoffe und ihre Herstellungsrouten⁴¹

An erster Stelle steht zunächst die Auswahl des Kraftstoffs. Je nach gewähltem Kraftstoff stehen verschiedene Herstellungsrouten zur Verfügung. Diese weisen bestimmte Effizienzen bzw. Effizienzbereiche auf, die in der Regel wesentlichen Einfluss auf die Gesamteffizienz der Kraftstoffkette haben.

Die Wahl des Primärenergieträgers ist teilweise bereits durch die Wahl der Herstellungsrouten festgelegt. In einigen Fällen besteht immer noch die Möglichkeit, den einzusetzenden Ausgangs-

⁴¹ NE – Nicht erneuerbare Ressource, E- Erneuerbare Ressource

stoff bzw. Energieträger auszuwählen. Beispielsweise können bei der Wasserstoffherstellung im Dampfreformer unterschiedliche flüssige oder gasförmige Stoffe, die wiederum auf verschiedenen Primärenergieträgern basieren, eingesetzt werden. Im Hinblick auf das Umweltprofil macht es einen wesentlichen Unterschied, ob der gewählte Primärenergieträger auf einer erneuerbaren oder einer nicht erneuerbaren Ressource basiert. Bezüglich der Aspekte Ressourcenschonung und CO₂ Emissionen gilt dies für alle erneuerbaren Energieträger. Für die restlichen Schadstoffe (z.B. NO_x, Partikel) trifft dies zumindest für die Routen zu, bei denen die erneuerbaren Energieträger ohne Verbrennung genutzt werden (z.B. Strom aus Wind- oder Wasserkraft).

Der letzte Faktor adressiert die Herkunft des gewählten Energieträgers. Hier ist die Zusammensetzung des Mixes des eingesetzten Energieträgers aufgrund der von Land zu Land bzw. Region zu Region unterschiedlichen Umweltlasten bei der Gewinnung der Primärenergieträger entscheidend. Es ist daher von Interesse, ob der eingesetzte Energieträger aus inländischer Förderung stammt oder ob er importiert wird.

Diese Gliederung nach den vier genannten Faktoren gilt ebenfalls für alle weiteren Kraftstoffe und Herstellungsrouten, die hier nicht näher betrachtet werden (z.B. LPG, Biodiesel, Bioethanol) und in Abbildung 5.23 in kursiver Schrift angegeben sind.

Insgesamt zeigt sich, dass für das Umweltprofil der einzelnen Kraftstoffe nicht der eigentliche Herstellungsprozess entscheidend ist, sondern die Bereitstellung der eingesetzten Energieträger.

Die Relevanz der Herstellung, Wartung und Entsorgung der Anlagen zur Kraftstoffproduktion richtet sich bei dezentralen Anlagen mit geringen Kapazitäten (Bereich <100 Nm³/h) nach dem gewählten Primärenergieträger. Kommen nicht erneuerbare Energieträger zum Einsatz, spielen die Anlagen keine wesentliche Rolle, beim Einsatz von regenerativen Energieträgern spielen sie relativ gesehen eine Rolle, wenn auch absolut betrachtet auf niedrigem Niveau.

5.5 Busbetrieb

Nachdem das voran gegangene Kapitel die Modellierung der Kraftstoffbereitstellung behandelt hat, widmet sich dieses Kapitel dem zweiten Teil der Nutzungsphase, dem eigentlichen Betrieb der Nahverkehrsbusse. Entsprechend den an diese Arbeit gestellten Anforderungen, ist ein Modul zu entwickeln, das es ermöglicht, den Busbetrieb auf unterschiedlichen Routen möglichst realitätsnah bezüglich Kraftstoffverbrauch und Emissionen abzubilden. Es gilt also, spezifische Verbrauchs- und Emissionsfaktoren für die drei untersuchten Antriebstechnologien Diesel, Erdgas und Brennstoffzelle zu ermitteln. Hierzu sind die relevanten Einflussparameter zu bestimmen und zu berücksichtigen.

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 3.3.1 kann für Dieselbusse hierzu auf das HBEFA-Modell zurückgegriffen werden. Über eine Analyse der dort hinterlegten Verbrauchs- und Emissionswerte werden in Kapitel 5.5.1 die wesentlichen Einflussparameter ermittelt. Eine Erweiterung des Modells ist hinsichtlich der in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Abgasnachbehandlungstech-

nologien erforderlich, da diese im HBEFA bisher nicht berücksichtigt werden. Eine Validierung der berechneten Werte erfolgt in Kapitel 5.6.4 mittels im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Verbrauchs- und Emissionsmessfahrten auf zwei realen Testzyklen.

Da Verbrauchs- und Emissionswerte für CNG Busse in vergleichbarer Detailtiefe wie für Dieselsebuse noch nicht verfügbar sind, werden sie für diese Arbeit anhand einer umfangreichen Literaturstudie in Kapitel 5.5.2 näherungsweise ermittelt. Eine Validierung erfolgt über die oben genannten, gemeinsam mit einem Diesel- und Brennstoffzellenbus durchgeführten Messfahrten auf zwei realen Zyklen.

Für brennstoffzellenbetriebene Busse sind nur die Verbrauchswerte von Bedeutung, da als Betriebsemissionen nur Wasser bzw. Wasserdampf⁴² entsteht. Aufgrund der noch sehr jungen Technologie und der sehr geringen Anzahl an Prototypen mangelt es an verfügbaren Betriebsdaten. Daher wird in Kapitel 5.5.3 auf Basis der bereits erwähnten Messfahrten eine Verbrauchsformel erstellt, welche die in Kapitel 5.5.1 identifizierten Einflussparameter soweit wie möglich für den BZ Bus berücksichtigt.

5.5.1 Ermittlung Einflussparameter Diesel

Der Kraftstoffverbrauch hängt entsprechend Gleichung 2.3 in Kapitel 2.5.2 von einer Reihe von Faktoren ab. Die vorhandenen Daten im HBEFA erlauben es, für dieselbetriebene Busse den Einfluss der Parameter Steigung, Geschwindigkeit und Masse zu analysieren. Die Parameter Roll- und Luftwiderstand sind aufgrund des hohen Reifenluftdrucks bzw. der niedrigen Geschwindigkeiten, die üblicherweise bei Bussen im Nahverkehrsbereich auftreten, von untergeordneter Bedeutung. Außerdem sind sie für die aktuellen Nahverkehrsbusse, unabhängig vom Hersteller und der Antriebstechnologie sehr ähnlich. Indirekt werden der Beschleunigungs- und der Bremswiderstand über die Parameter Masse und Geschwindigkeit berücksichtigt. Die antriebsspezifischen Parameter Motor- und Triebstrangwirkungsgrad werden ebenfalls über verschiedene Motoren und Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller als konstant angenommen. Die Abhängigkeit des Verbrauchs wird nachfolgend für jeden Parameter einzeln dargestellt (siehe Abbildung 5.24 bis Abbildung 5.27). Eine Überlagerung der einzelnen Effekte ist möglich und wird in Abbildung 5.28 beispielhaft dargestellt.

Die bestimmende Größe für Verbrauch und Emissionen ist die eingesetzte Antriebsleistung. Besonders die Längsneigung der Strecke, d.h. die Fahrbahnsteigung, beeinflusst den Fahrwiderstand und damit die eingesetzte Leistung. Aus Abbildung 5.24 ist ersichtlich, dass der Kraftstoffverbrauch bei positiver Steigung linear ansteigt. Für negative Steigungen ist der Zusammen-

⁴² Wasserdampf hat eine Relevanz hinsichtlich des Treibhauseffektes. Untersuchungen beispielsweise in [119] indizieren einen sehr geringen Einfluss (~0,005 %) der energiebedingten Wasserdampfemissionen einer Wasserstoffenergiewirtschaft auf die Wasserdampfbilanz der Erde, die vom natürlichen Wasserkreislauf dominiert wird. Außerdem weist die Endenergieerzeugung in einer Wasserstoffenergiewirtschaft im Vergleich zur fossilbasierten Endenergieerzeugung mit einem hohen Kühlwasserbedarf niedrigere spezifische Wasserdampfemissionen auf. Der klimarelevante Einfluss von anthropogen verursachtem Wasserdampf kann also nach heutigem Wissen vernachlässigt werden.

hang ab einem gewissen Gefälle nicht mehr linear, da der Bus einen gewissen Leistungsenergiegrundbedarf hat, der dazu führt, dass sich der Verbrauch ab einer gewissen negativen Steigung nicht mehr weiter reduziert.

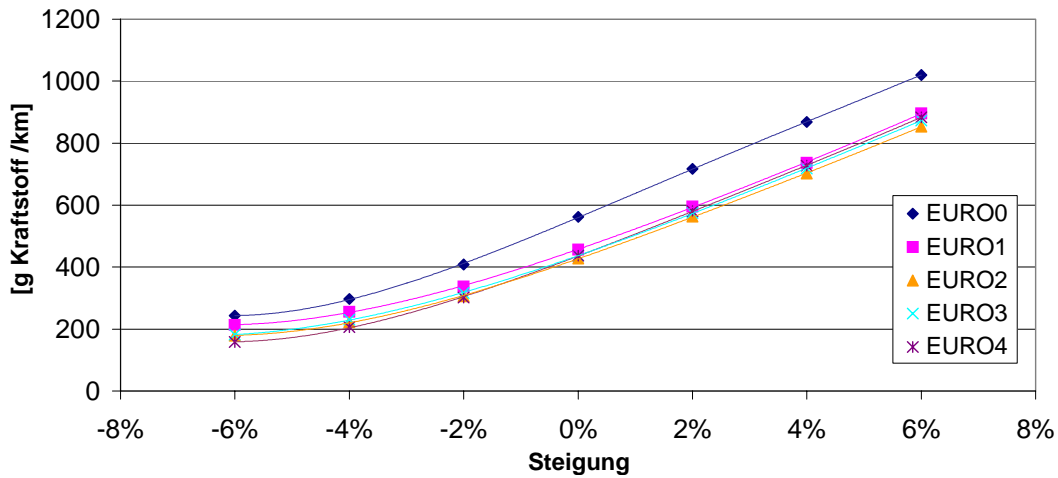


Abbildung 5.24 Dieselverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrbahnneigung für Linienbusse (15-18t), Stop & Go Verkehr, 50 % Beladung

Die eingesetzte Leistung steigt nicht nur mit der Fahrbahnlängsneigung, sondern auch mit der Anzahl der Beschleunigungsvorgänge. Gerade der Busbetrieb im innerstädtischen Verkehr weist eine Vielzahl an Stopps auf, sei es an Haltestellen, Ampeln oder im stockenden Verkehr. Die häufigen Stopps führen zum einen zu einer großen Anzahl an Beschleunigungsvorgängen, zum anderen bedeutet Fahrzeugstillstand Kraftstoffverbrauch, ohne dass dabei eine Wegstrecke zurückgelegt wird, d.h. der streckenbezogene Verbrauch steigt. Mit der Anzahl der Stopps sinkt auch die Durchschnittsgeschwindigkeit. Abbildung 5.25 zeigt die Korrelation zwischen Durchschnittsgeschwindigkeit und Anzahl der Stopps [120].

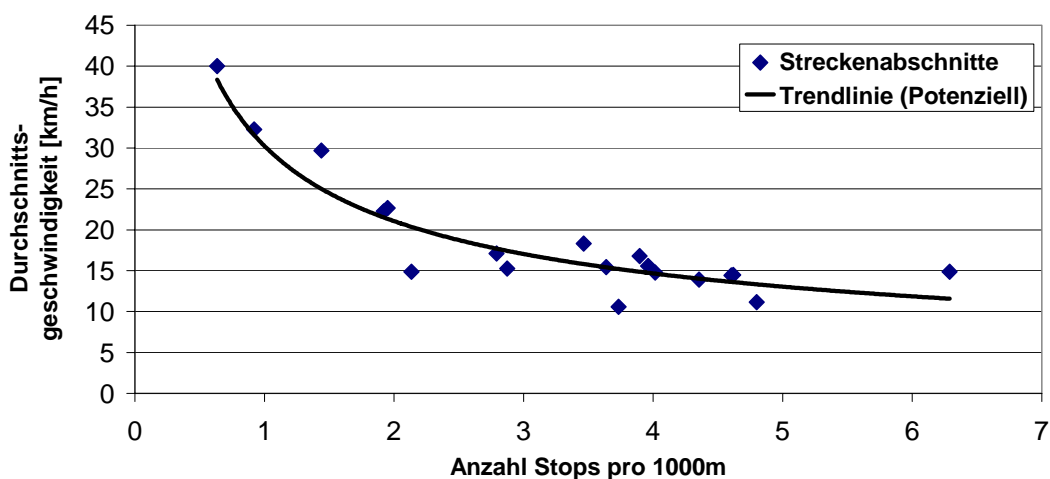


Abbildung 5.25 Korrelation Durchschnittsgeschwindigkeit zu Anzahl Stopps

Daraus folgt, dass sich die Anzahl der Stopps über die Betrachtung der Durchschnittsgeschwindigkeit berücksichtigen lässt. Aus Abbildung 5.26 ist ersichtlich, dass sich der Verbrauch im Geschwindigkeitsintervall 5 km/h bis 40 km/h in etwa linear verhält und kontinuierlich sinkt. Zu

berücksichtigen ist außerdem, dass der Verbrauch für $v = 0$ km/h unendlich wird, daher wird im Stillstand der Verbrauch nicht auf die Wegstrecke sondern auf die Stillstandszeit bezogen.

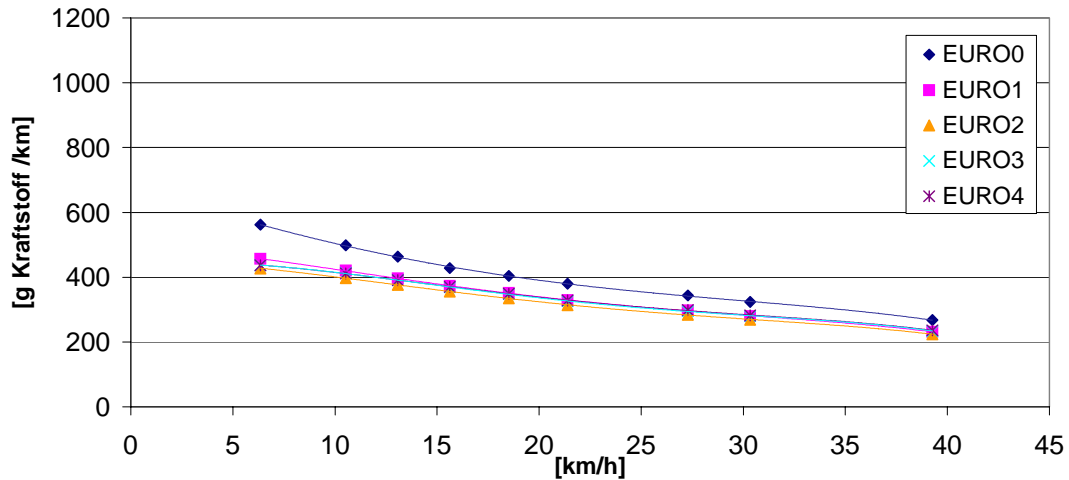


Abbildung 5.26 Dieserverbrauch in Abhängigkeit von der Durchschnittsgeschwindigkeit für Linienbusse (15-18t), Stop & Go Verkehr, 50 % Beladung

Entsprechend Gleichung 2.5 ergibt sich für die Masse bzw. für die Beladung ebenfalls ein linearer Zusammenhang (siehe Abbildung 5.27). Auch hier ist die über Drehmoment und Drehzahl angeforderte Leistung entscheidend. Eine höhere Masse zu bewegen, benötigt entsprechend mehr Energie. Dieser Zusammenhang gilt prinzipiell für alle Geschwindigkeiten und Fahrbahnneigungen.

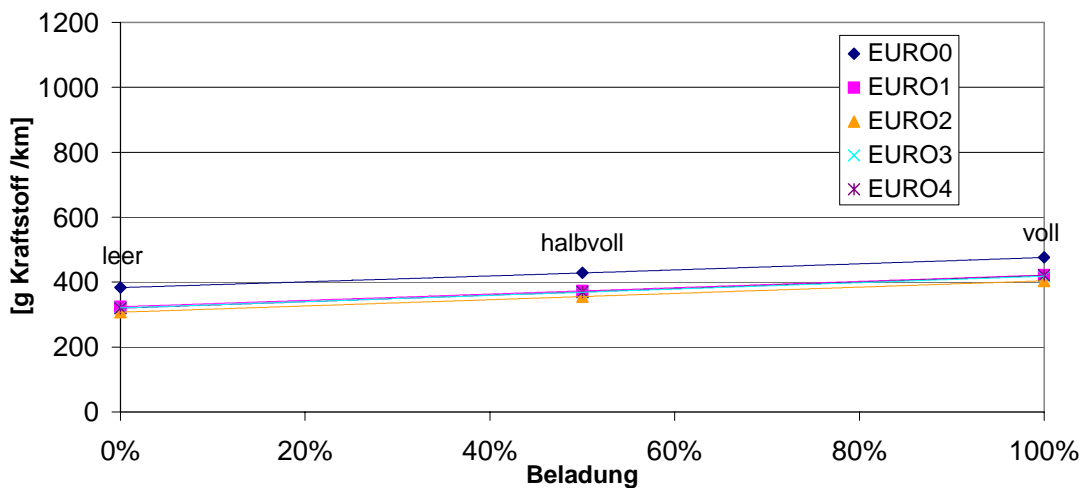


Abbildung 5.27 Dieserverbrauch in Abhängigkeit von der Beladung für Linienbusse (15-18t), Verkehrssituation „Innerorts Stadtkern“ (\bar{v} 16 km/h), ebene Fahrbahn

Eine Überlagerung der einzelnen vorgestellten Parameter ist ebenfalls möglich. Abbildung 5.28 liefert zum Beispiel den Zusammenhang zwischen Steigung und Beladung für einen Euro 3 Diesbus.

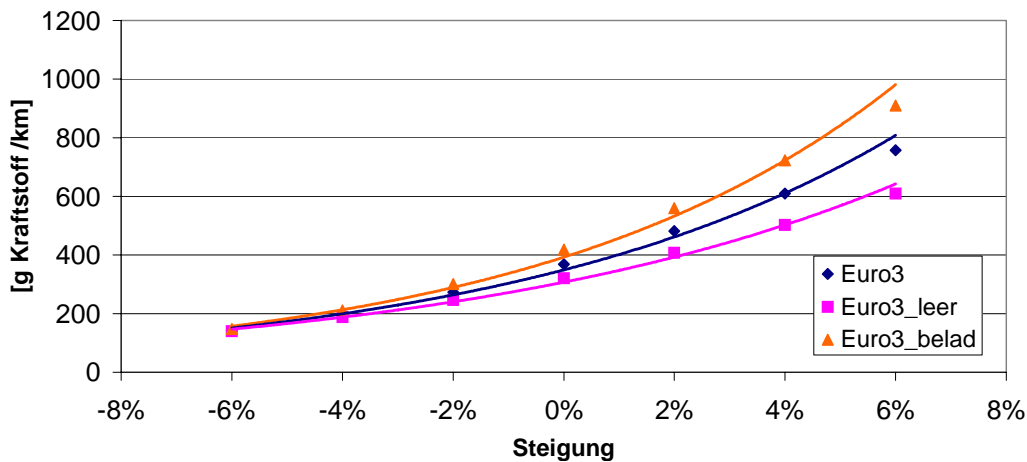


Abbildung 5.28 Dieselverbrauch in Abhängigkeit von der Steigung und Beladung für Linienbusse Euro 3 (15-18t), „Innerorts Stadtkern“ (\bar{v} 16 km/h),

Analog zum Verbrauch können die übrigen Emissionsfaktoren (EFA) in Abhängigkeit der untersuchten Parameter dargestellt werden. Grundsätzlich ergeben sich für die Emissionen ähnliche funktionale Abhängigkeiten wie beim Kraftstoffverbrauch. Abbildung 5.29 zeigt dies beispielhaft für die NO_x Emissionen.

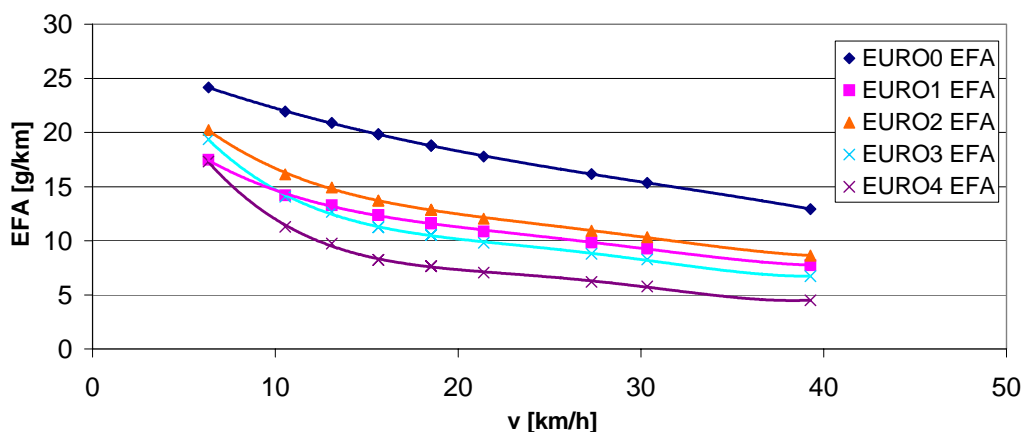


Abbildung 5.29 NO_x Emissionen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für Linienbusse Euro 3 (15-18t), 0 % Steigung, 50 % Beladung

Auffallend in Abbildung 5.29 ist die Erhöhung der NO_x Emissionen von Euro 1 nach Euro 2. Dies liegt nach [107] daran, dass die Motoren für den damals noch gültigen 13 Stufentest in den Testbetriebspunkten emissionsseitig optimiert wurden. Im realen Betrieb führte die üblicherweise verbrauchsoptimierte Abstimmung aber zu höheren Emissionen. Das gilt auch für die meisten anderen Emissionen. Als Konsequenz daraus wurde das Zertifizierungsverfahren mit dem Inkrafttreten der Euro 3-Stufe geändert. Entsprechend ergeben sich ab Euro 3 sinkende Emissionsfaktoren. Der Grad der Reduktion für die einzelnen Euro Stufen ist je Emission unterschiedlich und wird entsprechend im Modell berücksichtigt.

Der Einfluss von eventuell eingesetzten Abgasnachbehandlungstechnologien wird entsprechend Tabelle 2.3 in Kapitel 2.5.2 mit linearen Reduktionsfaktoren berücksichtigt. Die für das Modell ermittelten Faktoren gibt Tabelle 5.6 wieder. Ein Wert von 0,1 entspricht dabei einer Emissions-

reduktion um 90 %. Für Euro 4 und Euro 5 gehen die meisten Fahrzeughersteller davon aus, dass zur Einhaltung dieser Abgasnormen ein Abgasnachbehandlungssystem zwingend erforderlich ist [74]. So kommt bei den meisten europäischen Busherstellern das SCR System zum Einsatz. Einige Hersteller setzen auf ein Konzept aus verstärkter Abgasrückführung, in Verbindung mit einem Partikelfilter, wobei dieses System meist nur bei den leistungsärmeren Motoren (<200 kW) zum Einsatz kommt.

Tabelle 5.6 Reduktionsfaktoren für verschiedene Abgasnachbehandlungssysteme

Berechneter Faktor	Schadstoff	CRT	SCR	SCRT
Diesel Euro 0-3	NO _x	1	0,2	0,2
	PM	0,1	0,7	0,1
	CO	0,1	1	0,1
	HC	0,1	1	0,1
	mKr	1	0,95	0,95
Diesel Euro 4/5	NO _x , PM CO,HC mKr	1		

Wie in Kapitel 2.5.2 angegeben, existieren für das SCRT-System noch keine zuverlässigen Reduktionswerte. Daher gibt Tabelle 5.6 für das SCRT System den jeweils besseren Wert von CRT und SCR System an. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass das SCRT System eine Kombination aus CRT und SCR System ist⁴³.

5.5.2 Ermittlung Verbrauchs- und Emissionsfaktoren CNG

Für Erdgasbusse liegen bisher keine, nach einzelnen Parametern wie Längsneigung, Beladung etc. aufgelösten, Verbrauchs- und Emissionsfaktoren vor, die mit den Dieseldaten aus dem HBEFA vergleichbar wären. Es gibt meist nur Daten für unterschiedlichste Fahrzyklen, die im Vergleich mit Dieselnissen durchfahren werden und entweder absolute oder relativ zu Dieselnissen bezogene Emissionsfaktoren je Strecke ergeben (siehe Kapitel 3.3.1). Um eine ähnliche Differenzierung wie für Dieselnisse zu bekommen, die realistische Emissions- und Verbrauchswerte liefert, sind möglichst genaue Abschätzungen zu treffen. Hierzu wurde in Kapitel 3.3.1 eine umfangreiche Literaturstudie von Diesel- / Erdgasbusvergleichen durchgeführt. Die Tatsache, dass die Werte unter unterschiedlichsten Randbedingungen aufgenommen wurden, erschwert die Bestimmung von realistischen, verkehrssituationsspezifischen Faktoren. Es lassen sich allerdings allgemeingültige Faktoren ableiten, die für alle Verkehrssituationen auf die nach Steigung, Beladung und Durchschnittsgeschwindigkeit differenzierten Dieselnisse zur Anwendung kommen. Eine Unterscheidung nach Euro Stufen erfolgt nicht. Aus Datenverfügbarkeitsgründen werden entsprechend Kapitel 3.3.1 nur CNG Busse mit Magermixmotor berücksichtigt. Da diese Technologie aus Leistungs- und Verbrauchsgründen aber überwiegend in modernen Fahrzeugen zum Einsatz kommt, ist diese Vereinfachung gerechtfertigt.

⁴³ Sobald Messwerte vorliegen, kann diese Annahme überprüft und entsprechend korrigiert werden.

Zunächst wird die Bezugsbasis für Dieselbusse bestimmt. Hierzu werden die durchschnittlichen Verbrauchs- und Emissionsfaktoren über alle Verkehrssituationen und Längsneigungen für Euro 2 und 3 mit 50 % Beladung berechnet (Spalte 1 und 2 in Tabelle 5.7). Diesen werden dann die Bandbreite und die Mittelwerte der einzelnen Emissionswerte für CNG gegenübergestellt (Spalte 3 und 4). Die Spalte 5 und 6 geben die auf Diesel Euro 3 bzw. Euro 2 bezogenen relativen CNG Faktoren wieder.

Tabelle 5.7 Emissionswerte CNG (Magermixmotor) aus Literatur [98]- [105],[64] im Vergleich zu Diesel HBEFA Werten

Spalte Nr.	1	2	3	4	5	6	7
g/km	Diesel Euro 2 Ø-Wert HBEFA	Diesel Euro 3 Ø-Wert HBEFA	CNG _{mager} Literaturwerte	CNG _{mager} Mittelwerte	CNG _{mager} – Faktor aus Mittelwert bez. auf Diesel Euro 3 HBEFA	CNG _{mager} – Faktor aus Mittelwert bez. auf Diesel Euro 2 HBEFA	CNG Faktor aus Tabelle 3.3 (arithmet. Mittel)
CO ₂	1028	1066	824 - 1634	1215,3	1,14	1,18	1,03
CO	2,21	2,69	0,1 – 5,3	1,0	0,37	0,45	0,35
NO _x	12,39	10,14	1,1 – 25,5	13,0	1,28	1,05	0,99/0,73 ⁴⁴
HC	0,589	0,552	0,3 - 12,7	4,6	8,3	7,8	3,96
CH ₄	0,014	0,013	0,7 – 2,5	1,7	130,8	121,4	60,5
NMHC	0,575	0,539	0,1 – 2,8	1,0	1,86	1,74	0,88
Partikel	0,216	0,268	0,001 – 0,2	0,02	0,07	0,09	0,054
SO ₂ ⁴⁵	0,0052	0,0054	~0	0	0	0	n/a
N ₂ O	0,016	0,008	n/a	n/a	0,01 (aus [121])		n/a
NH ₃	0,005	0,005	n/a	n/a	0,1 (aus [121])		n/a
Benzol	0,01	0,009	0	0	0	0	n/a
Toluol	0,0019	0,0018	0	0	0	0	n/a
Xylol	0,0047	0,0044	0	0	0	0	n/a
mKr [l DÄ/km]	39,01	40,46	52 – 73	67,9	1,68	1,74	1,4

Aufgrund der teilweise sehr unterschiedlichen Fahrzyklen, auf denen die Werte ermittelt wurden, ergeben sich relativ große Schwankungsbreiten für Verbrauch (siehe letzte Zeile) und Emissionen. Zusätzlich haben wegen der relativ geringen Anzahl verfügbarer Messdaten (3-15 Werte) extreme Messwerte einen großen Einfluss auf den berechneten Mittelwert. Um eine Berücksichtigung der Randbedingungen, unter denen die Messwerte erfasst wurden, und eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden die CNG Faktoren für jede einzelne Studie bezüglich der verfügbaren Emissions- und Verbrauchswerte der jeweils eingesetzten Dieselbusse gebildet und

⁴⁴ Geometrisches Mittel

⁴⁵ Die SO₂ Emissionen hängen rein vom Schwefelgehalt (S-Gehalt) des Kraftstoffs ab. Die Werte für Diesel Euro 2 und 3 in HBEFA wurden mit Dieselkraftstoff mit einem S-Gehalt von 350 ppm ermittelt. Mittlerweile ist der S-Gehalt durch das AutoOil Programme (siehe Tabelle 5.2) auf 50 ppm festgelegt. Einige Länder, darunter z.B. Deutschland und Schweden, bieten bereits schwefelfreien Diesel, d.h. Diesel mit einem S-Gehalt von 10 ppm, an. Damit entspricht der Diesel-S-Gehalt dem von Erdgas. Erdgas darf laut [181] einen maximalen natürlichen S-Gehalt von 5 ppm haben. Der Erdgas-S-Gehalt wird evtl. durch schwefelhaltige Odorierungsmittel nochmals um 5-8 ppm erhöht [182]

daraus der Mittelwert berechnet (siehe Spalte 7 in Tabelle 5.7). Diese ermittelten Faktoren werden mit den CNG Faktoren, bezogen auf die HBEFA Dieselwerte für Euro 2 und 3 (siehe Tabelle 5.7) abgeglichen. Aus diesen drei Spalten wird für jede Emission ein Faktor für das Modell bestimmt. Sie sind in Tabelle 5.8 aufgelistet.

Tabelle 5.8 CNG Faktoren für Modell

CNG	CO ₂	CO	HC	CH ₄	NMHC	NO _x	Partikel	mKr
gewählter Faktor bezogen auf Diesel HBEFA	1,1	0,4	4,0	60,5	1	0,7	0,07	1,5

Die Faktoren liegen bis auf den NO_x Wert alle im erwarteten Bereich. Lediglich der in Tabelle 5.7 aufgeführte arithmetische Mittelwert für den NO_x Faktor zeigt einen unerwartet hohen Wert, gekoppelt mit einer großen Standardabweichung (siehe Tabelle 3.3). Die Extremwerte in Tabelle 3.3 stammen aus [99]. Berechnet man den arithmetischen Mittelwert ohne diese Literaturstelle, ergibt sich ein CNG Faktor für NO_x von 0,52. Ein Vergleich dieses Wertes mit den NO_x Reduktionswerten aus der Literatur in Tabelle 5.9 zeigt, dass der ebenfalls in Tabelle 5.7 angegebene geometrische Mittelwert für NO_x, der auch gleichzeitig dem Median der Faktoren entspricht (siehe Tabelle 3.3), realistischer erscheint. Er wird daher in Tabelle 5.8 als Faktor für NO_x gewählt.

Tabelle 5.9 Reduktion der NO_x Emissionen von CNG Bussen gegenüber Diesel Euro 2

Quelle	Ikonen [101]	Beer [103]	IAGNV [104]	IZT [105]
von	-26,6 %	-42,8 %	-18,2 %	-80 %
bis	-38,5 %	-52,4 %	-28,6	-89 %

Generell sollen und können die hier ermittelten Faktoren nicht die messtechnische Ermittlung spezifischer⁴⁶ Emissionsfaktoren ersetzen, sondern lediglich deren derzeitiges Fehlen näherungsweise kompensieren. So würden detaillierte Messdaten zum Beispiel eine Unterscheidung nach Euro-Abgasstufen erlauben.

5.5.3 Ermittlung Verbrauchsfaktoren Brennstoffzellenbus

Für den Brennstoffzellenbus ist die Datenlage, wie bereits eingangs in Kapitel 5.5 erwähnt, aufgrund der geringen Anzahl an Prototypenfahrzeugen sehr gering. In Europa wurden etwa zehn Brennstoffzellenbusse unterschiedlicher Größe von verschiedenen Busherstellern aufgebaut [187]. Im Rahmen des EU geförderten CUTE Projektes und dieser Arbeit ist erstmalig ein BZ Bus mit einem Diesel- und einem CNG Bus in Verbrauchs- und Emissionsmessfahrten auf mehreren Strecken verglichen worden. Aus Sicht einer möglichst guten Vergleichbarkeit ist von Vorteil, dass alle drei Antriebstechnologien auf derselben Fahrzeugplattform, dem CITARO Nah-

⁴⁶ Unter „spezifische Faktoren“ sind hier Faktoren in Abhängigkeit der Abgasnorm und der Faktoren Fahrbahnneigung, Beladung und Durchschnittsgeschwindigkeit zu verstehen.

verkehrsbus der Firma EvoBus basieren. Im Fokus steht aufgrund des „emissionsfreien“ Betriebes des BZ-Busses der Verbrauch, der in Abhängigkeit der Parameter Fahrbahnsteigung, Beladung und Durchschnittsgeschwindigkeit bestimmt wird.

Die Verbrauchsdaten des BZ Busses wurden für zwei Strecken im Großraum Stuttgart [47] aufgenommen. Weiterhin standen Messdaten von drei weiteren Strecken in Porto, Reykjavik und Stockholm zur Verfügung. [164], [188], [165].

Der Wasserstoffverbrauch eines BZ Busses kann auf unterschiedliche Weise gemessen werden. Für diese Arbeit wurde in Abstimmung mit dem Hersteller des Brennstoffzellenantriebs [124] der Verbrauch über die Berechnung des Stackstromes bestimmt. Mit Hilfe des Faraday'schen Gesetzes kann der für die Stromerzeugung erforderliche elektrochemische Wasserstoffumsatz in den einzelnen Zellen berechnet werden. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$\dot{m}_{H_2} = 1,045 \cdot 10^{-8} \cdot i \cdot n \quad (\text{Gleichung 5.3})$$

mit: \dot{m}_{H_2} = Massenstrom des Wasserstoffs in kg/s
 i = gemessene Stromstärke
 n = Anzahl Zellen (960 je Stack)

Neben dem Verbrauch zur Stromerzeugung ist der Wasserstoffverluststrom \dot{m}_p durch Purgung⁴⁷ zu berücksichtigen. Dieser lässt sich über den Druck in der Zelle und die Öffnungsdauer der Ventile abschätzen [186]. Aus der Integration des zeitaufgelösten Verbrauchs ergibt sich der Verbrauch je Strecke:

$$M_{H_2} = \int \dot{m}_{H_2} \cdot dt + \int \dot{m}_p \cdot dt \quad (\text{Gleichung 5.4})$$

Hierfür wird eine Trapezintegration verwendet. Mögliche Fehlerquellen bei dieser Art der Verbrauchsbestimmung ergeben sich bei der Abschätzung der Purgungsverluste, dem über Stromsensoren gemessenen Strom und der zeitlichen Auflösung der Messdaten. Eine einfache Möglichkeit zur Validierung des auf diese Weise berechneten Wasserstoffverbrauchs ist der Abgleich mit den im Versuchszeitraum aufgenommenen Tankdaten.

Nun werden aus den ermittelten Verbrauchsdaten funktionale Abhängigkeiten für die Parameter Steigung, Geschwindigkeit und Beladung ermittelt, um den spezifischen Wasserstoffverbrauch in das Modell zu integrieren. Hierzu wird ein Modell von Cerwenka et al. [123] als Grundansatz gewählt. Dieses Modell adressiert zwei der oben genannten Parameter, wobei die Formel die Abhängigkeit von insgesamt drei Parametern berücksichtigt:

$$k = F(v) * G(s) * H(J) \quad (\text{Gleichung 5.5})$$

⁴⁷ Unter Purgung ist das kurzzeitige Spülen der Anodenseite der Zelle mit reinem Wasserstoff zu verstehen, um das dort gebildete Wasser zu entfernen. Der dabei entweichende Wasserstoff wird über einen Diffusor verdünnt und ins Freie geleitet.

Mit : k = Emissionsfaktor

$F(v)$ = mathematische Funktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

$G(s)$ = mathematische Funktion in Abhängigkeit der Längsneigung

$H(J)$ = mathematische Funktion in Abhängigkeit des Betrachtungsjahres/ Fahrzeugalters

Das Betrachtungsjahr und damit der Einfluss des Fahrzeugalters wird aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt, d.h. $H(J)=1$. Für den Einfluss der Geschwindigkeit gibt [123] folgende Funktion an:

$$F(v) = a_0 + a_1 * v^2 + \frac{a_2}{v}, \quad v > 0 \quad (\text{Gleichung 5.6})$$

a_0 , a_1 und a_2 sind Koeffizienten, die sich aus der Lösung eines linearen Gleichungssystem ergeben, v ist die Geschwindigkeit. Die Abschätzungsfunktion berücksichtigt für höhere Geschwindigkeiten die Dominanz des mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunehmenden Luftwiderstandes⁴⁸. Bei niedrigen Geschwindigkeiten muss hingegen der Verbrauch vom Kehrwert der Geschwindigkeit abhängig sein, da für $v \rightarrow 0$ der Verbrauch je km gegen unendlich geht. Die Abhängigkeit des Verbrauches von der Fahrbahnsteigung wird nicht mit der Funktion aus [123] abgebildet, sondern mit einer e-Funktion, da bei den Messfahrten im realen Stadtverkehr ein stärkerer Einfluss der Steigung beobachtet wurde [47]. Die Funktion lautet:

$$G(s) = e^{c*s} \quad (\text{Gleichung 5.7})$$

Mit: c = Koeffizient, berechnet aus linearem Gleichungssystem (siehe Anhang G)

s = Steigung

Die Berechnung der einzelnen Koeffizienten a_0 , a_1 und a_2 erfolgt durch Lösen eines linearen Gleichungssystem unter der Randbedingung $s=0$, womit $G(s)=1$ wird. Das Gleichungssystem wird aus Verbrauchsmesswerten bei verschiedenen Geschwindigkeiten gebildet. Analog wird aus den Messwerten für konstantes v und variables s der Wert für c berechnet. So ergibt sich Gleichung 5.8 für die Beschreibung des Wasserstoffverbrauchs in Abhängigkeit von Steigung und Geschwindigkeit. Die detaillierte Berechnung der einzelnen Funktionen einschließlich der Ermittlung der Koeffizienten ist Anhang G zu entnehmen.

$$k = F(v) * G(s) = \left(a_0 + a_1 * v^2 + \frac{a_2}{v} \right) * e^{c*s} = \left(44,84 + (-0,017) * v^2 + \frac{424,43}{v} \right) * e^{9,6402*s} \quad (\text{Gl. 5.8})$$

Grafisch lässt sich die Abhängigkeit des Wasserstoffverbrauchs von Steigung und Geschwindigkeit entsprechend Abbildung 5.30 darstellen.

⁴⁸ Entsprechend Kapitel 5.5.1 ist der Luftwiderstand für Nahverkehrsbusse vernachlässigbar. Der Ansatz von Cerwenka ist jedoch für den gesamten Geschwindigkeitsbereich eines Kfz entwickelt worden, also auch für höhere Geschwindigkeiten, bei denen der Luftwiderstand nicht mehr vernachlässigbar ist.

Die ermittelten Abhängigkeiten gelten nur in dem dargestellten Wertebereich. Eine Extrapolation der Kurve auf andere Wertebereiche ist nicht zulässig, da für diese Bereiche keine Messwerte vorliegen. Generell verhält sich die Flächenfunktion analog zu den anderen Antriebstechnologien Diesel und CNG. Mit wachsender Steigung ist eine Erhöhung und mit wachsender Geschwindigkeit eine Senkung des Wasserstoffverbrauches erkennbar. Der überproportionale Verbrauchsanstieg bei höheren Geschwindigkeit und großer Steigung ist darauf zurückzuführen, dass die Flächenfunktion in diesem Bereich auf einigen wenigen Messpunkten beruht und hier von einer analytisch bedingten Überhöhung der Verbrauchsfunktion ausgegangen werden kann. Da dieser Bereich (7,5 % Steigung, Geschwindigkeit > 25 km/h) im realen Betrieb eher selten vorkommt, ist diese Überhöhung von untergeordneter Bedeutung.

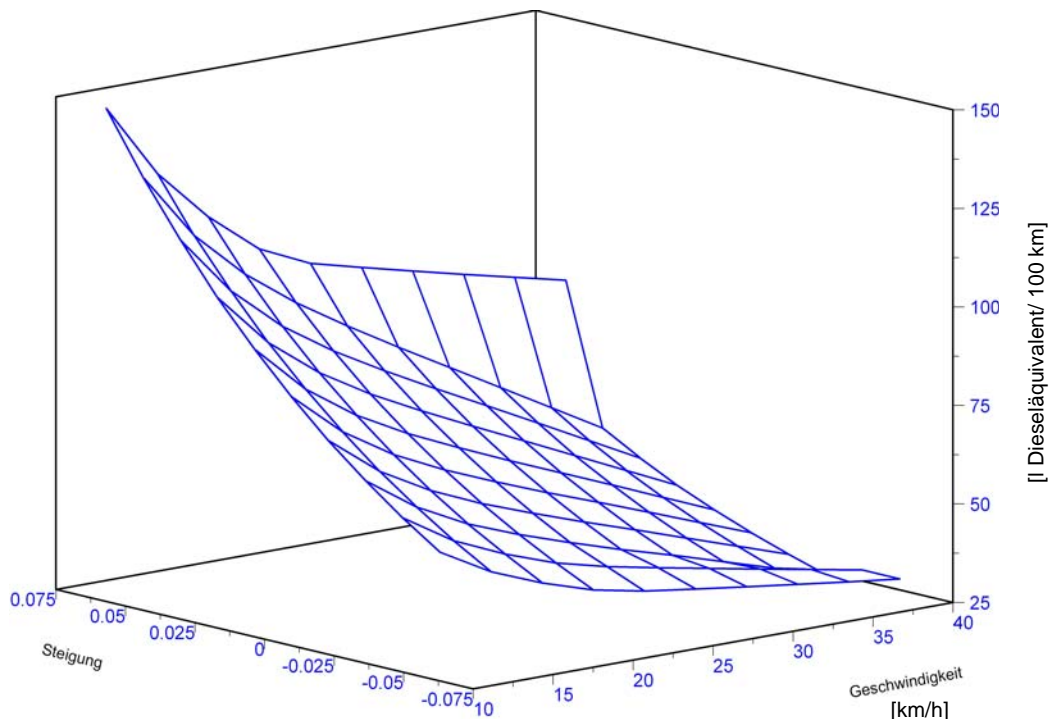


Abbildung 5.30 Wasserstoffverbrauch in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Steigung

Abbildung 5.31 zeigt einen Vergleich des H₂-Verbrauchs des BZ Citaros mit dem Verbrauch eines Diesel Euro 3 Busses nach HBEFA. Während beim Dieselbus der Verbrauch in etwa linear mit steigender Geschwindigkeit sinkt, zeigt der BZ Bus gerade bei niedrigen Geschwindigkeiten einen signifikant höheren Verbrauch, der u.a. auf das spezifische Antriebskonzept⁴⁹ sowie das erhöhte Gewicht des BZ Citaros zurückzuführen ist. Detailliertere Ausführungen hierzu finden sich in [47].

⁴⁹ Der Antriebsstrang des in den CUTE, ECTOS und STEP Projekten eingesetzten BZ Bustyps wurde nicht auf maximale Energieeffizienz ausgelegt, sondern auf eine hohe Verfügbarkeit. So wurden möglichst viele Standardbuskomponenten verwendet, z.B. zentraler Motor mit Getriebe, Lichtmaschinen zur Versorgung des Bordnetzes und mechanisch angetriebene Hilfsaggregate (Lenkhilfpumpe etc.). Dies trägt u.a. dazu bei, dass der BZ Bus speziell im Leerlauf einen hohen Kraftstoffverbrauch aufweist (siehe auch [159]).

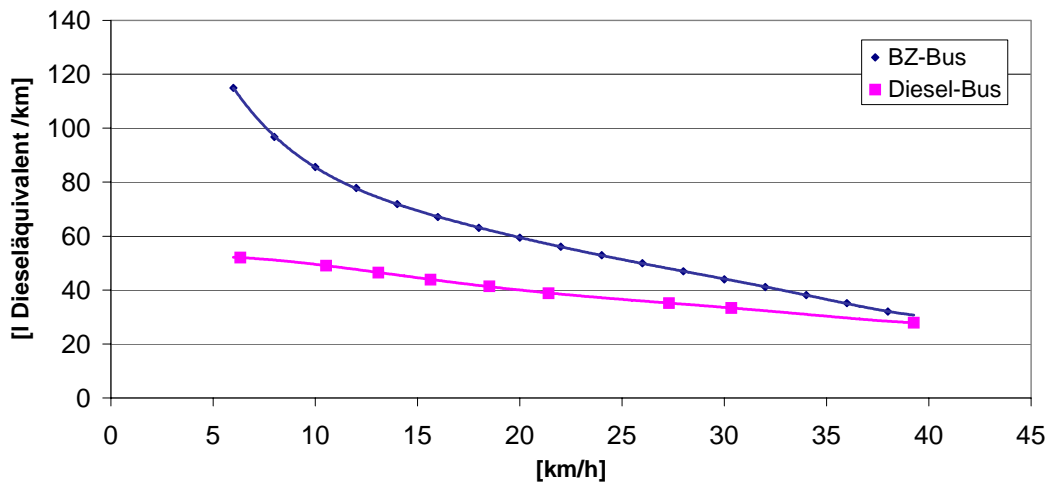


Abbildung 5.31 Wasserstoff und Dieserverbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Die gezeigten Werte sind für eine 50 % Beladung, die 3,5 t Zuladung entspricht, ermittelt worden. Messfahrten mit unterschiedlichen Beladungen wurden bisher nicht durchgeführt. Um den Einfluss der Beladung für BZ Busse abschätzen zu können, werden die Verbrauchsdaten des Dieselbuses aus [74] für 0% und 100 % Beladung jeweils auf den 50 % Verbrauchswert bezogen und die dabei gewonnenen Faktoren auf den 50 % Verbrauchswert des BZ Busses angewendet. Damit ist es möglich, für die BZ Bustechnologie analog zu Diesel und CNG Verbrauchswerte in Abhängigkeit von Steigung, Geschwindigkeit und Beladung im Modell zu berücksichtigen⁵⁰. Aufgrund der momentan noch geringen Verfügbarkeit von Messdaten auf einer kleinen Zahl von Fahrzyklen ist im Gegensatz zum Diesel noch nicht von einer Allgemeingültigkeit der Verbrauchswerte auszugehen.

Grundsätzlich möglich ist auch eine Bestimmung des Wasserstoffverbrauches mit einer Gleichung höherer Ordnung, wie sie zum Beispiel von Hickman in [75] beschrieben wurde (siehe Gleichung 5.9).

$$\varepsilon = K + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad , \quad v > 0 \quad \text{(Gleichung 5.9)}$$

Mit: ε = Basisemissionsfaktor in g/km, bei mittlerer Beladung und Steigung = 0 %.

K = Konstante.

$a-f$ = Koeffizienten, die sich durch das Lösen eines mit Hilfe von Messdaten erstellten linearen Gleichungssystem ergeben.

v = Geschwindigkeit des Fahrzeugs in km/h.

Zur Berücksichtigung von Steigung und Geschwindigkeit gibt es Korrekturfunktionen, die entsprechend der Ausgangsformel ebenfalls von höherer Ordnung sind. Aufgrund des relativ schmalen Geschwindigkeitsbereiches von 5 bis 40 km/h, in dem Nahverkehrsbusse üblicherweise

⁵⁰ Es ist aber ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die modellierten Wasserstoffverbrauchswerte nur anhand der Messwerte eines Bustypen (BZ Citaro der Firma EvoBus) ermittelt wurden und folglich nur für dieses eine Modell gelten. Es können mit der hier vorgestellten Methode die Verbrauchsfunktionen für BZ Busse angepasst werden, sobald mehr und differenziertere Daten verfügbar sind.

operieren, ist eine Anpassung nur in einem verhältnismäßig geringen Bereich erforderlich. Nähere Informationen zu diesem Ansatz finden sich in [75].

Aufgrund der beschriebenen geringen Verfügbarkeit von Messdaten für BZ Busse ist die Genauigkeit des Ansatzes von Cerwenka zum gegenwärtigen Zeitpunkt als völlig ausreichend anzusehen.

Zusammenfassung

Als Ergebnis all dieser Überlegungen lässt sich schließlich für das zu entwickelnde Modell eine Tabelle erstellen, die sämtliche Faktoren für alle untersuchten Emissionen enthält. Sie beinhaltet genau einen Emissionsfaktor für jede beliebige Kombination aus

- ◆ Antriebskonzept
- ◆ Schadstoffkategorie
- ◆ Steigungsklasse
- ◆ Verkehrssituation und
- ◆ Beladung
- ◆ Abgasnachbehandlungsmaßnahme

Die Tabelle weist folglich einen gewissen Umfang auf und ist im MS Excel basierten Nutzungsphasenmodell dieser Arbeit implementiert. In Anlehnung an das Handbuch Emissionsfaktoren wird der Verbrauchsfaktor „mkr“ auch als Emissionsfaktor, kurz EFA⁵¹, bezeichnet.

5.6 Entwicklung eines Modells zur ökologischen Analyse und Optimierung von Bussystemen

Basierend auf der länder- und verfahrensspezifischen Kraftstoffbereitstellung und dem im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Vorgehen zur Ermittlung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren in Abhängigkeit verschiedener Parameter für Diesel, Erdgas und Brennstoffzellenbusse, wird in diesem Kapitel aus den Modulen 1 bis 4 (siehe Kapitel 2.4) ein neuartiges Ökobilanzierungsmodell entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells ist es möglich, den Betrieb von Nahverkehrsbussen mit verschiedenen Antriebstechnologien und –technologiestufen auf einzelnen Strecken oder einer Busflotte auf dem gesamten Streckennetz, ohne aufwendige und teure Messfahrten, unter Berücksichtigung der ortsspezifischen Randbedingungen zu betrachten. Dies ermöglicht zusammen mit der Busherstellung und -entsorgung, den gesamten Buslebenszyklus hinsichtlich der Ressourcenverbräuche und Emissionen quantitativ zu analysieren.

Zunächst wird der Modellrahmen mit den zu berücksichtigenden Parametern festgelegt. Im Anschluss werden, ausgehend von einem Entscheidungsbaum, die funktionellen Abhängigkeiten des Modells erläutert. Die im Busbetriebsteil des Modells errechneten Werte für Verbrauch und Emissionen werden mit Messwerten von zwei realen Fahrzyklen abgeglichen.

⁵¹ Einheit [g/km]

Das Modell wird in den kommerziellen Softwareprodukten MS⁵² Excel und GaBi 4 [83] umgesetzt. In Excel erfolgt die Berechnung der Emissionen und des Verbrauchs für den Busbetrieb. Diese Daten werden dann in die Ökobilanzierungssoftware GaBi 4 übergeben.

5.6.1 Modellrahmen

Der Modellrahmen lässt sich wie folgt beschreiben:

Das Modell berücksichtigt nachstehende Nahverkehrsbustypen:

- ◆ Dieselbusse der Abgasnormen Euro 0-5
- ◆ Erdgasbusse mit Magermixmotorkonzept
- ◆ Brennstoffzellenbusse

Im Rahmen dieses Modells wird der Kraftstoffverbrauch und die resultierenden Emissionen in Abhängigkeit

- ◆ des Antriebskonzeptes
 - ◆ des installierten Abgasnachbehandlungssystem
 - ◆ der Steigung
 - ◆ der Geschwindigkeit
 - ◆ der Beladung
 - ◆ der Flottenzusammensetzung und
 - ◆ der gefahrenen Kilometer
- ermittelt.

Anhand des ermittelten Kraftstoffverbrauches wird die Kraftstoffbereitstellung

- ◆ länderspezifisch
 - ◆ in Abhängigkeit der gewählten Herstellungsrouten
- berücksichtigt.

Schließlich werden in Abhängigkeit des Antriebskonzeptes die

- ◆ Busherstellung und
- ◆ Busentsorgung anteilig über die gefahrenen Kilometer betrachtet.

Untersucht werden können

- ◆ Technologievergleich auf einzelner Strecke
- ◆ Busflotte auf Routen mix
- ◆ Busflotte auf Gesamtnetz

Der Betrachtungszeitraum kann sein:

- ◆ einmaliges Durchfahren einer Strecke

⁵² MS: Microsoft

- ◆ Jahresfahrleistungen
- ◆ gesamter Lebenszyklus der Busflotte

Graphisch dargestellt entspricht der Modellrahmen damit Abbildung 5.2 bis Abbildung 5.4.

5.6.2 Entscheidungsbaum

Zur Veranschaulichung der Modellbildung dient ein Entscheidungsbaum. Dieser ermöglicht eine Strukturierung der Parameter, die auf Basis der Untersuchungen im CUTE Projekt und der in Kapitel 5.5 analysierten Literaturwerte als relevant identifiziert wurden. Thematisch sortiert, ist es so möglich, die einzelnen Einflussparameter und die Verfügbarkeit von dazugehörigen Daten abzufragen⁵³, indem man prüft, ob spezifische Werte vorliegen oder ob sie über statistische Werte abgeschätzt werden und im Modell zu hinterlegen sind. So lässt zum Beispiel die Entwicklung und Zusammensetzung des Flottenbestandes für künftige Jahre anhand länderspezifischer Statistiken ableiten (siehe Anhang D).

Abbildung 5.32⁵⁴ zeigt die logische Struktur des erstellten Modells, anhand dessen die funktionalen Zusammenhänge entwickelt werden. Das Modell ist für den Busbetriebsteil von oben nach unten in die Teile Flottenprofil, Netz-/Streckenprofil und Verkehrsbedingungen unterteilt. Das Flottenprofil ergibt sich aus der Anzahl der Fahrzeuge, der im einzelnen eingesetzten Antriebstechnologie und der jeweiligen Abgasstufe der Fahrzeuge. Es schließt die Möglichkeit der Nutzung von statistischen Daten⁵⁵ mit ein. Der Abschnitt Netz-/Streckenprofil beschreibt die betrachtete Strecke bzw. das betrachtete Streckennetz bezüglich seiner spezifischen Eigenschaften wie Steigung, Streckenlänge etc. und zeigt auf, wie eventuell nicht vorhandene Daten abgeleitet werden können. Im Bereich Verkehrsbedingungen wird der Verkehrsfluss mit Hilfe der Durchschnittsgeschwindigkeit sowie die Beladung der Busse abgefragt.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt als Emission pro Strecke und zusätzlich als durchschnittliche Emission je km. Liegen Messwerte vor, werden die Busbetriebsemissionen direkt über die Messwerte bestimmt.

⁵³ Die Abfrage erfolgt anhand von Ja/Nein Fragen, die als Fragen der Art „Ist diese Angabe verfügbar?“ zu verstehen sind.

⁵⁴ Die Rautensymbole stehen für die Ja/Nein Fragen im Sinne von „Ist diese Angabe verfügbar?“, die Rechtecke fungieren als eine Art Überschrift, die den jeweiligen thematischen Bereich beschreiben

⁵⁵ Im Modell sind für Dieselbusse die Flottenanteile der einzelnen Eurostufen je Land für die Jahre 1994-2020 für 15 europäische Länder hinterlegt. Anhang D enthält die Liste der berücksichtigten Länder.

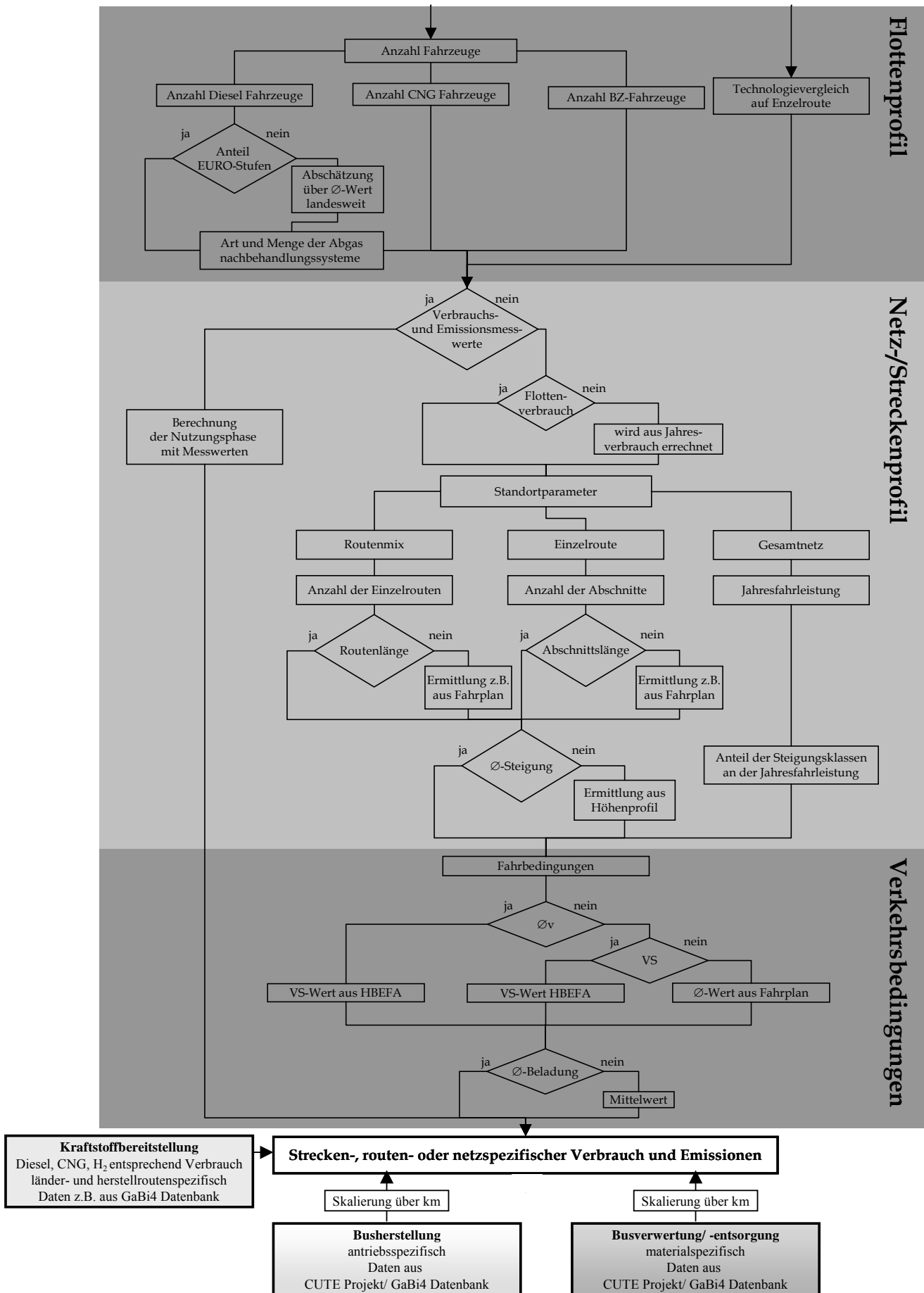


Abbildung 5.32 Modellschema

5.6.3 Modellzusammenhänge

Nachdem das vorangegangene Kapitel das Modellschema erläutert hat, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit den funktionalen Zusammenhängen des Modells zur Berechnung der Umweltauswirkungen der untersuchten Bustechnologien bzw. –flotten. Zunächst werden die Zusammenhänge für den Busbetrieb erläutert. Je nach Bedarf wird dabei auf die Unterschiede bei der Betrachtung von einzelnen Antriebstechnologien und Busflotten als Mix unterschiedlicher Antriebstechnologien eingegangen. Anschließend werden die emissions- und verbrauchsmäßigen Beiträge aus Kraftstoffbereitstellung sowie Fahrzeugherstellung und –verwertung in die Formeln integriert.

Zur Modellierung des Busbetriebes werden die Fahrzyklen in mehrere Abschnitte unterteilt. Die Unterteilung erfolgt dabei in Abschnitte mit positiver und negativer Fahrbahnneigung. Für jede dieser Teilstrecken werden der Kraftstoffverbrauch und die Emissionen in Abhängigkeit der Steigung und Durchschnittsgeschwindigkeit ermittelt. Über die Länge der Abschnitte kann der Detaillierungsgrad der Analyse beliebig gewählt werden. Für Einzelstreckenanalysen bietet sich eine Einteilung in Teilabschnitte mit möglichst konstanter Steigung an. Für die Betrachtung des Umweltprofils über mehrere Routen bietet sich eine gröbere Einteilung an, z.B. ist eine Einteilung in einen Streckenabschnitt mit einer gemittelten Steigung und einem gemittelten Gefälle je Route denkbar.

Abbildung 5.33 zeigt die Einflussparameter für die Ermittlung von Verbrauch und Emissionen. Diese sind teilweise je nach Betrachtungsrahmen bezüglich des Vergleichs einzelner Antriebstechnologien auf Einzelstrecken und der Ermittlung der Gesamtbilanz einer Busflotte auf mehreren Routen bzw. auf dem gesamten Streckennetz unterschiedlich. Die spezifischen Parameter für den Antriebstechnologievergleich sind in Abbildung 5.33 in kursiver Schrift, die für die Betrachtung der gesamten Flotte in unterstrichener und die gemeinsamen Parameter in normaler Schrift angegeben.

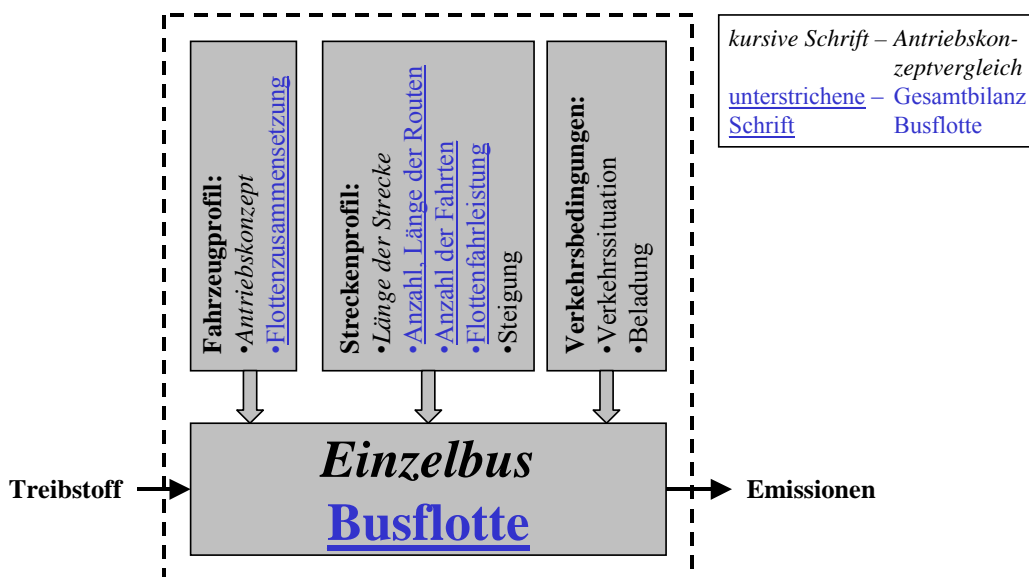


Abbildung 5.33 Einflussparameter Busbetrieb in Abhängigkeit der Betrachtungsrahmen

Flottenzusammensetzung

Dem jeweiligen Betrachtungsrahmen entsprechend ist die Anzahl der untersuchten Busse $Fzgan_{ges}$ antriebspezifisch anzugeben. Dieselbusse werden noch anhand der erfüllten Abgasnorm Euro 0-5 unterschieden. Es ergibt sich Gleichung 5.10:

$$Fzgan_{ges} = \sum_{i=0}^7 Fzgan_{AT_i} \quad \text{mit } i = 0-5: \text{ Diesel Euro 0-5, } i = 6 : \text{ CNG}_{\text{mager}}, i = 7 : \text{ BZ}$$

Für einen Antriebsvergleich ist $Fzgan$ entweder auf 0 oder 1 zu setzen, je nachdem, welche Antriebstechnologie AT_i berücksichtigt werden sollen.

Ist für einen Busflottenvergleich die Fahrzeuganzahl je Antriebskategorie nicht verfügbar oder soll eine länderspezifische Betrachtung erfolgen, so kann die Flottenzusammensetzung folgendermaßen (Gleichung 5.10a) eingegeben werden:

$$Fzgan_{ges_{j,k}} = \left(\sum_{i=0}^5 (x_{i,j,k} * \%Fzganteil_{AT_i,j,k}) + \sum_{i=6}^7 \%Fzganteil_{AT_i,j,k} \right) \cdot Fzgan_{ges_{j,k}} \quad \text{mit } \sum_{i=0}^5 x_{i,j,k} = 1$$

wobei x der prozentuale Anteil des Antriebskonzepts an der Dieselbusflotte, i die Antriebstechnologie, j das Bezugsjahr 1994...2020, k der Index für das entsprechende Land und $\%Fzganteil_{AT_i}$ das Verhältnis der Anzahl Fahrzeuge einer Antriebstechnologie AT zur Gesamtflottengröße ist.

Die verfügbaren Länder sind in Kapitel 2.5.3 genannt und ihre Flottenzusammensetzungen können dem Anhang D entnommen werden.

Streckenlänge/ Fahrleistung

Die Streckenlänge l_{Route_g} einer einzelnen Route g ergibt sich aus der Summe der Längen $l_{Abschnitt_h}$ der eingegebenen Streckenabschnitte h , angegeben in km. Für einen Routenmix aus mehreren Routen errechnet sich die Gesamtroutenlänge $l_{RM_{ges}}$ aus der Summe der Einzelroutenlängen l_{Route_g} . Im Modell können bis zu 20 Streckenabschnitte/Routen eingegeben werden. Bei der Betrachtung von mehr als 20 Abschnitte/Routen erfolgt die Modellierung in separaten Schritten mit einer anschließenden Aufsummierung der Ergebnisse aus den einzelnen Durchläufen. Ist das Umweltprofil nicht für eine einzelne Fahrt, sondern für eine bestimmte Fahrleistung eines einzelnen Busses FL_{Fzg} oder einer Flotte $FL_{ges_{RM}}$ zu berechnen, muss noch die Anzahl der Fahrten AF_{Route_g} berücksichtigt werden. Die Fahrleistung je Fahrzeug FL_{Fzg} bzw. je Antriebstechnologie FL_{AT} wird über die Fahrzeuganzahl $Fzgan_{ges}$ bzw. den entsprechenden Anteil einer Antriebstechnologie an der Busflotte bestimmt. Es ergeben sich folgende im Modell implementierte mathematische Zusammenhänge:

$$l_{RM_{ges}} = \sum_{g=1}^n l_{Route_g} = \sum_{g=1}^n \sum_{h=1}^m l_{Abschnitt_{h,g}} \quad \text{mit } n = 1 \dots 20 \text{ und } m = 1 \dots 20 \quad (\text{Gleichung 5.11})$$

$$FL_{gesRM} = \sum_{g=1}^n (l_{Route_g} * AF_{Route_g}) \quad \text{mit } n=1...20 \quad (\text{Gleichung 5.12})$$

$$FL_{Fzg} = \frac{FL_{gesRM}}{Fzganzz_{ges}} \quad \text{für } Fzganzz_{ges} > 1 \quad (\text{Gleichung 5.13})$$

$$FL_{AT_i} = \frac{FL_{gesRM}}{Fzganzz_{ges}} * Fzganzz_{AT_i} \quad \text{mit Antriebstechnologie } i = 0-7 \quad (\text{Gleichung 5.14})$$

Da die Gesamtfahrleistung der Flotte in der Regel bekannt ist, besteht die Möglichkeit, für eine Netzbilanz der Busflotte die Fahrleistung $FL_{gesNetz}$ direkt als $FL_{gesEingabe}$ einzugeben.

$$FL_{gesNetz} = FL_{gesEingabe} \quad (\text{Gleichung 5.15})$$

Einen Indikator zur Charakterisierung der untersuchten Routen liefert noch die Berechnung der durchschnittlichen Routenlänge $\emptyset l_{Route}$.

$$\emptyset l_{Route} = \frac{\sum_{g=1}^n l_{Route_g}}{n} \quad \text{mit } n=1...20 \quad (\text{Gleichung 5.16})$$

Steigung

Ursprünglich wurde im HBEFA die Abhängigkeit der Emissionswerte von der Steigung in 2 % Intervallen erfasst. In [125] wurden verschiedene Möglichkeiten zur Abbildung der Steigungsabhängigkeit analysiert und hinsichtlich ihrer Genauigkeit untersucht. Es zeigt sich, dass eine Berechnung der Werte in 1 % Intervallen über lineare Interpolation eine höhere Detaillierung der Ergebnisse bei verhältnismäßig geringem Rechenaufwand ergibt. Die Steigung wird daher je Abschnitt/ Route in 1 % Klassen eingegeben. Alle Steigungen, die kleiner als -5,5 % sind, zählen zur Steigungsklasse -6 %, zur Steigungsklasse -5 % gehören die Steigungen zwischen -4,5 % und -5,5 %, die Zuordnung zu den anderen Klassen erfolgt analog.

Als weiterer Indikator zur Streckencharakterisierung bietet sich die durchschnittliche Steigung in Verbindung mit der Durchschnittsgeschwindigkeit (siehe nächster Abschnitt) an. Die durchschnittliche Steigung $\emptyset S$ berechnet sich für Einzelrouten ER bzw. Routenmixe RM unter Berücksichtigung der Steigung S und Routen- bzw. Abschnittslänge wie folgt (Gleichung 5.17):

$$\emptyset S_{ER} = \frac{\sum_{h=1}^n (l_{Abschnitt_h} * S_{Abschnitt_h})}{\sum_{h=1}^n l_{Abschnitt_h}} \quad \text{bzw.} \quad \emptyset S_{RM} = \frac{\sum_{g=1}^n (l_{Route_g} * S_{Route_g})}{\sum_{g=1}^n l_{Route_g}} \quad \text{mit } n = 1...20$$

Für die Gesamtbilanz des Streckenetzes ergibt sich die durchschnittliche Steigung $\emptyset S_{Netz}$ aus der Eingabe der prozentualen Verteilung z_p der sieben Steigungsklassen p innerhalb des Streckenetzes. Aufgrund des reduzierten Detaillierungsgrades bei der Analyse des gesamten Streckenetzes wird die Steigung in 2 % Schritten von -6 % bis +6 % erfasst⁵⁶. Es gilt Gleichung 5.18:

⁵⁶ Die Grenze zwischen den Klasse bildet der Mittelwert zweier Klassen, der Klasse -4 % werden die Werte zwischen -3 % und -5 % zugewiesen etc., Werte < -6 % bzw. > 6 % werden diesen Klassen zugeschrieben:

$$\emptyset S_{Netz} = z_1 \cdot (-6\%) + z_2 \cdot (-4\%) + z_3 \cdot (-2\%) + z_4 \cdot 0\% + z_5 \cdot 2\% + z_6 \cdot 4\% + z_7 \cdot 6\%$$

Geschwindigkeit

Die Durchschnittsgeschwindigkeit wird für jeden Streckabschnitt bzw. jede Route ermittelt (z.B. mit Hilfe von Fahrtenschreiber- oder Fahrplandaten). Anhand der ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeit weist der Anwender jedem Streckenabschnitt oder jeder Route eine Verkehrssituation entsprechend HBEFA (siehe Kapitel 3.3.1) zu. Jeder Verkehrssituation ist im HBEFA genau eine Geschwindigkeit zugeordnet. Es ist die Verkehrssituation auszuwählen, deren Geschwindigkeit der ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeit am nächsten ist.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit zusammen mit der Durchschnittssteigung gut als Indikator zur Charakterisierung der untersuchten Einzelroute ($\emptyset V_{ER}$) oder des untersuchten Routenmixes bzw. Streckennetzes ($\emptyset V_{RM}$). Errechnet wird sie aus der Länge des jeweiligen Abschnittes / der jeweiligen Route l und der jeweils ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeit $\emptyset V$.

$$\emptyset V_{ER} = \frac{\sum_{h=1}^n (l_{Abschnitt_h} * V_{Abschnitt_h})}{\sum_{h=1}^n l_{Abschnitt_h}} \quad \text{bzw.} \quad \emptyset V_{RM} = \frac{\sum_{g=1}^n (l_{Route_g} * V_{Route_g})}{\sum_{g=1}^n l_{Route_g}} \quad \text{mit } n = 1 \dots 20 \quad (\text{Gleichung 5.19})$$

Beladung

Die Beladung wird direkt vom Anwender eingegeben. Das Modell erlaubt die Unterscheidung zwischen leer, d.h. 0 % Beladung, halbvoll (50 % Beladung) und voll (100 % Beladung)⁵⁷

Abgasnachbehandlungssysteme

Ist ein Abgasnachbehandlungssystem (AB-System) im Fahrzeug installiert, beeinflusst es die massenmäßige Menge an Emissionen und Kraftstoffverbrauch. Die Berücksichtigung erfolgt über einen linearen Reduktionsfaktor $RF_{AB,SS}$ ⁵⁸ für die einzelnen Schadstoffe SS . Im Modell werden entsprechend Kapitel 2.5.2 die AB-Systeme nur für Dieselbusse berücksichtigt. Bei Antriebstechnologievergleichen auf Basis einzelner Busse werden die Faktoren direkt auf die von den AB-Systemen beeinflussten Emissionen multiplikativ angewendet, d.h. ein Faktor von 0,7 entspricht einer 30 %igen Reduktion.

In die Betrachtung einer Flotte auf einzelnen oder mehreren Routen fließt die Flottenkonfiguration hinsichtlich der Anzahl Dieselfahrzeuge, die mit AB-Systemen ausgestattet sind, mit ein. Die Ermittlung des Reduktionsfaktors $RF_{Euro_j,SS}$ für die Antriebskonfigurationen Diesel Euro $j = 0-5$ und die betroffenen Schadstoffkategorien SS erfolgt entsprechend Gleichung 5.20:

⁵⁷ 50 % Beladung entspricht bei Dieselbus mit 11 t Leergewicht ca. 3,5 t Zuladung, bei CNG (12 t Leergewicht) ca. 3 t Zuladung und bei BZ Bus (13,9 t Leergewicht) ca. 2,1 t Zuladung., 100 % Beladung entsprechend dem Doppelten. 3,5 t entsprechen ca. 50 Passagieren, 3 t ca. 43 Passagieren und 2,1 t in etwa 30 Passagieren.

⁵⁸ Betrachtete Abgasnachbehandlungssysteme (AB-Systeme) sind CRT, SCR und SCRT.

$$RF_{Diesel\ Euro_j, SS} = \frac{\left((FzganZ_{Diesel\ Euro_j} - (FzganZ_{Diesel\ Euro_j, CRT} + FzganZ_{Diesel\ Euro_j, SCR} + FzganZ_{Diesel\ Euro_j, SCRT}) + \right. \\ \left. + RF_{CRT, SS} \cdot FzganZ_{Diesel\ Euro_j, CRT} + RF_{SCR, SS} \cdot FzganZ_{Diesel\ Euro_j, SCR} + RF_{SCRT, SS} \cdot FzganZ_{Diesel\ Euro_j, SCRT} \right)}{FzganZ_{Diesel\ Euro_j}}$$

Gesamter Kraftstoffverbrauch und Emissionen

Kraftstoffverbrauch und Emissionen des Busbetriebs berechnen sich aus der Kombination der bisher dargestellten funktionalen Zusammenhänge. Die Emissionen der betrachteten Schadstoffkategorien E_{SS} ⁵⁹ über alle acht Antriebstechnologien AT ⁶⁰ ergeben sich aus Gleichung 5.21:

$$E_{SS} = \sum_{i=0}^7 E_{SS, AT_i} = \sum_{i=0}^7 \left(\sum_{g=1}^n (EFA_{SS, AT_i, g} \cdot l_{Route_g} \cdot AF_{Route_g}) \cdot \%FzganZ_{AT_i} \cdot RF_{SS, AT_i} \right)$$

Der Emissionsfaktor $EFA_{SS, AT_i, g}$ eines Schadstoffes SS, angegeben in g/km, wird für die Antriebstechnologie AT_i in Abhängigkeit der auf Route g vorherrschenden Verkehrssituation, Beladung und Steigung ermittelt. Für Einzelroutenvergleiche wird die Routenlänge l_{Route_g} in km durch die Abschnittslänge $l_{Abschnitt_h}$ ersetzt und der Emissionsfaktor $EFA_{SS, AT_i, h}$ für den jeweiligen Streckenabschnitt bestimmt. Ferner wird die Anzahl Fahrten AF_{Route_g} auf 1 gesetzt und gegebenenfalls auf die Aufsummierung über die Antriebstechnologiekategorien AT_i verzichtet. Für die Betrachtung des gesamten Streckennetzes ergibt sich E_{SS} gemäß der Gleichung 5.22 mit z_p als Anteil der sieben Steigungsklassen (siehe Gleichung 5.18) und der Flottenfahrleistung $FL_{gesNetz}$.

$$E_{SS} = \sum_{i=0}^7 \sum_{p=1}^7 E_{SS, AT_i, p} = \sum_{i=0}^7 \sum_{p=1}^7 (EFA_{SS, AT_i} \cdot \%FzganZ_{AT_i} \cdot FL_{gesNetz} \cdot RF_{SS, AT_i} \cdot z_p)$$

Entsprechend der gewählten funktionellen Einheit und um eine bessere Vergleichbarkeit⁶¹ der ermittelten Werte zu gewährleisten, werden alle Daten in g/km angegeben. Hierzu wird E_{SS, AT_i} bzw. E_{SS} auf die jeweilige Fahrleistung auf einer Einzelroute bzw. einem Routenmix oder dem gesamten Streckennetz gemäß Gleichung 5.23 bezogen:

$$\dot{E}_{SS, AT} = \frac{E_{SS, AT}}{l_{Route}}, \quad \dot{E}_{SS} = \frac{\sum_{i=0}^7 E_{SS, AT_i}}{FL_{gesRM}} \quad \text{bzw.} \quad \dot{E}_{SS} = \frac{\sum_{i=0}^7 \sum_{p=1}^7 E_{SS, AT_i, p}}{FL_{gesNetz}}$$

Bisher wurden nur die Emissionen E_{SS} für den Busbetrieb ermittelt. Dem Lebenszyklusansatz des Modells folgend werden die Emissionen je Schadstoffkategorie für die Kraftstoffbereitstellung und die Fahrzeugherstellung und –verwertung hinzugezählt.

⁵⁹ Betrachtete „Schadstoff“kategorien SS sind CO₂, CO, NO_x, HC, CH₄, NMHC, Benzol, Toluol, Xylol, PM, SO₂, Pb, N₂O, NH₃, mKr

⁶⁰ Untersuchte Antriebstechnologien AT umfassen die acht Kategorien 1-6: Diesel Euro 0-5, 7: CNG, 8: BZ.

⁶¹ Ein Vergleich des Emissionsprofil verschiedener Szenarien ist z.B. hinsichtlich Antriebstechnologie und Flottenzusammensetzung möglich. Die Szenarien können sich auf einzelne verschiedene Strecken und auf verschiedene Städte bzw. Netze beziehen.

Die Emissionen der Kraftstoffbereitstellung (*KB*) werden in Abhängigkeit der Kraftstoffart q , des Bezugslandes k , der antriebstechnologiespezifisch verbrauchten Kraftstoffmenge m_{KrAT} und im Falle des Wasserstoffs der gewählten Herstellungsrouten R ermittelt. Die Emissionen aus der Busherstellung (*BH*) $E_{SS_{BH_{ges}}}$ und -verwertung (*BV*) $E_{SS_{BV_{ges}}}$ werden auf die jeweilige zu berücksichtigende Fahrleistung FL_t umgelegt, d.h. es wird das Verhältnis der Fahrleistung FL_t zur Lebenszyklusfahrleistung FL_{LZ} gebildet, wobei t vom Untersuchungsrahmen abhängt. Es gilt:

$$E_{SS_{LZ}} = \sum_u E_{SS_u} \quad \text{mit } u=1..4 \text{ entsprechend den Lebenszyklusmodulen 1-4} \quad (\text{Gl. 5.24})$$

$$E_{SS_{KB_{k,q}}} = \sum_{i=0}^7 E_{SS_{KB_{k,q}}} * m_{KrAT_i} \quad \text{mit } q = \text{Diesel} \text{ für } AT_{0-5}, q = \text{CNG} \text{ für } AT_6 \text{ und } q_R = H_2 \\ \text{für } AT_7 \text{ mit } R \text{ für die verschiedenen Herstellungsrouten} \quad (\text{Gl. 5.25})$$

$$E_{SS_{BH_t}} = \frac{FL_t}{FL_{LZ}} * E_{SS_{BH_{ges}}} \quad \text{mit } t = \text{Einzelstrecke, Routenmix oder Gesamtstreckennetz} \quad (\text{Gl. 5.26})$$

$$E_{SS_{BV_t}} = \frac{FL_t}{FL_{LZ}} * E_{SS_{BV_{ges}}} \quad \text{mit } t = \text{Einzelstrecke, Routenmix oder Gesamtstreckennetz} \quad (\text{Gl. 5.27})$$

Das Lebenszyklusmodell wird in der Ökobilanzsoftware GaBi als parametrisiertes Plansystem aufgebaut. Das ermöglicht eine maximale Flexibilität bezüglich der Einstellung der im Kapitel 5 für die verschiedenen Module vorgestellten Parameter. Die Busbetriebsphase wird als Excelmodell realisiert, das über eine Schnittstelle zur GaBi Software verfügt. Die Busbetriebsparameter aus Kapitel 5.5 werden in das Excelmodell eingegeben und anschließend die Ergebnisse entsprechend den eingegebenen Randbedingungen berechnet. Diese werden in das GaBi Modell eingelesen um das Umweltprofil des gesamten Lebenszykluses mit allen spezifischen Randbedingungen zu berechnen. Die Anwendbarkeit der vorgestellten Gleichungen und des Modells wird in Kapitel 6 anhand von zwei Beispielen demonstriert.

5.6.4 Validierung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren mit Messdaten

Um die Genauigkeit der mit dem Modell ermittelten Werte für Verbrauch und Emissionen im Busbetrieb zu überprüfen, sind verschiedene Messfahrten auf zwei unterschiedlichen Fahrzyklen mit den drei Antriebstechnologien Diesel, CNG und Brennstoffzelle durchgeführt worden. Alle Fahrzeuge basieren auf dem aktuellen Nahverkehrsbus Citaro der Firma EvoBus und sind hinsichtlich Fahrzeugkonzept und -aufbau sehr gut miteinander vergleichbar. Die detaillierten technischen Fahrzeugdaten der drei Busse sind in Anhang A.5 aufgeführt.

Die Fahrzyklen, die für die Messfahrten verwendet wurden, sind die Linie 42 in Stuttgart, die aufgrund ihres hügeligen Verlaufs als anspruchsvolle Linie gilt sowie der Esslingen Zyklus, der wegen der höheren Durchschnittsgeschwindigkeit und seinem eher flachen Verlauf als moderater Zyklus einzustufen ist. Zum einen wurden für diese beiden Zyklen Verbrauchswerte in Verbrauchsmessfahrten mit den drei Citaro Bussen sowie dem NEBUS über Zwillingstests ermittelt, d.h. zwei Busse fahren auf dem Testzyklus mit einer definierten Beladung direkt hintereinander her [47]. Für den BZ Citaro standen zusätzlich noch Messwerte der Route 3 in Reykja-

vik zur Verfügung [13]. Die Streckendaten und weitere Details zu den Routen können Anhang C.3 entnommen werden.

Zum anderen wurden zur Ermittlung der Emissionen des Diesel- und CNG Busses die beiden Zyklen auf einem dynamischen Rollenprüfstand an der FVT⁶² in Graz nachgefahren [155]. Eine Überprüfung der Realitätsnähe der Messungen erfolgte über den Kraftstoffverbrauch, der jeweils mit den reell gemessenen Werten verglichen wurde. Die Verbrauchswerte lagen innerhalb eines Schwankungsbereiches von -7% bis $+8\%$ (siehe nachfolgende Abbildungen), die Messgenauigkeit kann damit als ausreichend betrachtet werden.

Die Abbildung 5.34 und Abbildung 5.35 zeigen die Abweichungen der mit Hilfe des Emissionsmodells berechneten Verbrauchs- und Emissionswerte von den auf den verschiedenen Zyklen gemessenen Werten für den Diesel und CNG Bus. Die Streubalken geben die Schwankungsbreite der mit ihrem Mittelwert angegebenen Messwerte⁶³ wieder, die sich beim dreimaligen Messen der Zyklen auf der Rolle ergaben. Für die Berechnung der Modellwerte wurde entsprechend den 3,5 t Zuladung, die alle Busse bei den Messfahrten hatten, von einer 50 % Beladung der Busse ausgegangen.

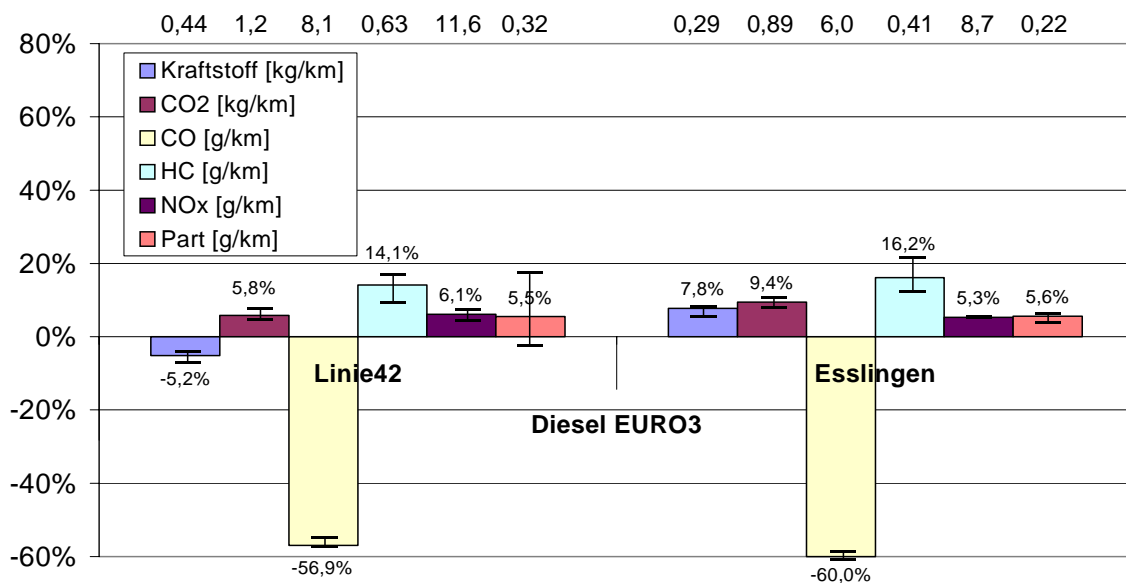


Abbildung 5.34 Relative Abweichung des Diesel Emissionsmodells von Messungen auf dem Rollenprüfstand

Die mit Hilfe des Modells errechneten Werte für Kraftstoffverbrauch, CO₂-, NO_x- und Partikelemissionen in Abbildung 5.34 liegen mit einem Schwankungsbereich von -5% bis $+9\%$ sehr nahe an den gemessenen Werten. Auch die Abweichung der HC Emissionen mit 14% bzw. 16% liegt nach [156] noch im Rahmen möglicher Schwankungen im Alltagsbetrieb, die z.B. durch unterschiedliche Verkehrsbedingungen oder durch den Einfluss des Fahrers verursacht

⁶² Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH

⁶³ Die Mittelwerte der Rollenprüfstandsmessungen sind im oberen Teil der Abbildung 5.34 angegeben. Die Einheit der einzelnen Werte ist der Abbildungslegende zu entnehmen; die als Säulen dargestellten Werte beginnen je Route von links mit Kraftstoff und enden auf der rechten Seite jeweils mit Partikel.

werden. Die berechneten CO Werte weisen jedoch mit -57% bzw. -60% eine große Abweichung auf. Es ist nicht eindeutig festzustellen, ob die im Modell hinterlegten Werte zu niedrig oder die gemessenen Werte als überdurchschnittlich hoch anzusehen sind. Ein Abgleich der Messwerte mit den Literaturdaten (siehe Kapitel 3.3.1) zeigt, dass sie in deren oberen Bereich ($1-8\text{ g/km}$) liegen. Die meisten Literaturwerte liegen im Bereich $1-5\text{ g/km}$. Nach [74] wurden bei der Ermittlung der Euro 3 Werte für das HBEFA ebenfalls größere Schwankungen bei den CO-Werten festgestellt. Da eine eindeutige Ursachenklärung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, werden die im Modell hinterlegten Werte für CO beibehalten.

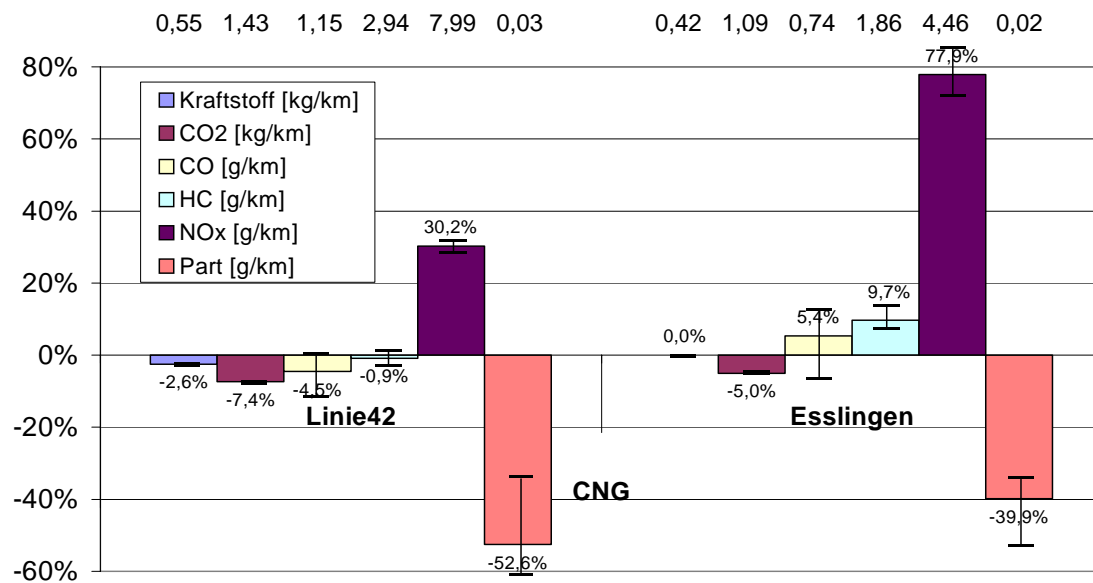


Abbildung 5.35 Relative Abweichung des CNG Emissionsmodells von Messungen auf dem Rollenprüfstand⁶⁴

Das CO Problem stellt sich, wie in Abbildung 5.35 erkennbar ist, für den CNG Bus nicht. Die berechneten Werte für den Kraftstoffverbrauch, die CO₂- und HC Emissionen stimmen mit den gemessenen Werten gut überein. Die relative Abweichung für die Partikel liegt mit 53% bzw. 40% sehr hoch. Betrachtet man die Absolutwerte, die bei $0,02\text{ g}$ bzw. $0,03\text{ g}$ liegen, wird offensichtlich, dass nur sehr geringe Mengen an Partikeln emittiert werden, die in den Bereich der Messgrenze fallen. Ein Unterschied von $0,01\text{ g}$ bedeutet bereits eine Abweichung von etwa 35% . Die Partikelwerte im Modell bleiben daher unverändert. Die NO_x-Emissionen werden über das Modell tendenziell zu hoch berechnet. Dies deckt sich mit dem in Kapitel 5.5.2 beobachteten Problem der teilweise hohen Literaturwerte für NO_x. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dem vermessenen CNG Bus um ein nach der EEV Norm zertifiziertes Fahrzeug handelt, d.h. die NO_x Emissionen sollten tendenziell eher niedrig sein. Aus diesem Grund und der Tatsache zufolge, dass sich für die beiden untersuchten Testzyklen eine relative große Streubreite ergibt, werden die NO_x Werte im Modell beibehalten⁶⁵, da die NO_x Emissionen vom Modell zu-

⁶⁴ Die Mittelwerte der Rollenprüfstandsmessungen sind im oberen Teil der Abbildung angegeben. Die Einheit der einzelnen Werte ist der Abbildungslegende zu entnehmen; die als Säulen dargestellten Werte beginnen je Route von links mit Kraftstoff und enden auf der rechten Seite jeweils mit Partikel.

⁶⁵ Eine Anpassung des NO_x Faktors kann vorgenommen werden, sobald aussagekräftigere Daten vorliegen.

mindest nicht unterschätzt werden. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die in Kapitel 5.5.2 abgeleiteten Reduktionsfaktoren, mit gewissen Einschränkungen für die NO_x Emissionen, auch auf ein Niedrigemissionsfahrzeug nach EEV Norm anwendbar sind.

Der Abgleich der Modellwerte mit den auf drei Strecken gemessenen Wasserstoffverbräuchen zeigt in Abbildung 5.36 auch für den Brennstoffzellenbus eine gute Übereinstimmung mit den gemittelten Messwerten, die am oberen Rand der Abbildung angegeben sind.

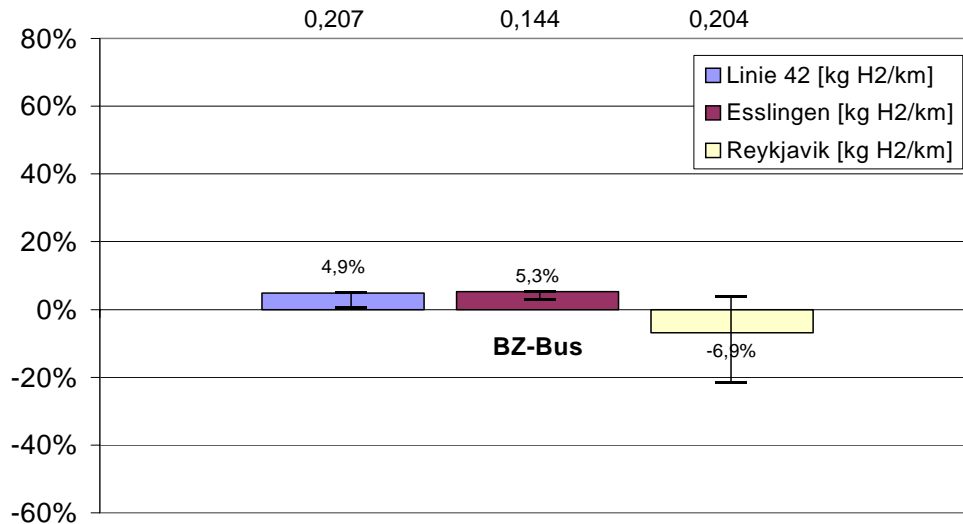


Abbildung 5.36 Relative Abweichung des BZ Verbrauchsmodells von Messungen auf realen Stadtzyklen

Eine detaillierte Analyse und Aufbereitung der Messfahrten findet sich in [47], die Analyse der Rollenprüfstandsuntersuchungen in [155] und [125].

5.6.5 Datenqualität

Von zentraler Bedeutung bei der Erstellung des Modells ist die Qualität der verwendeten Daten. Im vorangegangenen Kapitel 5.6.4 erfolgte bereits für das Modul Busbetrieb eine Validierung der im Modell verwendeten Daten mit Messwerten.

Für die *Dieselantriebstechnologie* kann die Datenqualität in diesem Zusammenhang als sehr gut eingeschätzt werden. Sie basiert auf [74], in dessen Rahmen mit einem umfangreichen Messprogramm eine breite und repräsentative Datenbasis erstellt wurde. Zusätzlich wurde der Detaillierungsgrad der Werte hinsichtlich der Abhängigkeit der Emissionsfaktoren von der Fahrbahnneigung durch die Verfeinerung der Steigungsklassen von 2 % auf 1 % Schritte erhöht. Ebenso wurde der Einfluss von Abgasnachbehandlungsmaßnahmen in das Modell mit Hilfe linearer Reduktionsfaktoren integriert.

Die mit Hilfe einer umfangreichen Literaturstudie ermittelten CNG Werte sind als Näherung zu verstehen. Da die ausgewerteten Literaturdaten unter teilweise sehr unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt wurden und eine Detaillierung der Werte nach Euro-Stufen für jede Emissionskategorie nur über jeweils einen konstanten Faktor in Bezug auf die Dieselemissionsfaktoren erfolgt ist, sind die CNG Werte ausschließlich unter den beschriebenen Randbedingungen gültig.

Die Verbrauchsfaktoren für den *Brennstoffzellenbus* wurden mathematisch aus Messdaten abgeleitet. Lediglich der Einfluss der Beladung wurde aufgrund mangelnder Daten linear aus dem Verhältnis der Verbrauchsfaktoren für Dieselbusse abgeleitet. Für den BZ Citaro ist folglich von einer guten bis befriedigenden Datenqualität auszugehen. Eine Übertragbarkeit auf andere BZ Busse ist nicht ohne weiteres möglich. Eine Absicherung und gegebenenfalls Anpassung der Faktoren auf Basis weiterer Verbrauchsmessdaten ist erforderlich.

Die Daten zur *Flottenzusammensetzung* in den EU-15 Ländern liegen für die Jahre 1994-2020 in einer guten Qualität vor. Sie wurden im Zuge mehrerer teilweise EU geförderter Projekte ermittelt. [72]

Die Datenqualität der aus [83] entnommenen bzw. der in der Ökobilanzsoftware GaBi modellierten Kraftstoffbereitstellung unterliegt einer gewissen Schwankungsbreite entlang der einzelnen Kraftstoffbereitstellungsketten, vor allem im Bereich der Primärenergieträgerbereitstellung. So liegen für eine ganze Reihe an Ländern detaillierte Daten für die Erdöl- und Erdgasförderung vor, die z.B. im Zuge von Ökobilanzprojekten, von Reporting Aktivitäten im Rahmen des Kyoto-Protokolls oder im Zuge der Erstellung von Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichten aufbereitet wurden. Für andere Länder, speziell Dritte Weltländer, müssen eine Reihe von Abschätzungen für die Primärenergieträgerförderung getroffen werden. Daher ist die Datenqualität für die Primärenergieträgerförderung von sehr gut bis ausreichend einzustufen. Für die Bereiche Transport und Weiterverarbeitung der Energieträger, z.B. in Raffinerien, ist eine gute Datenqualität gegeben. Ein weiterer zentraler Bereich bei der Kraftstoffbereitstellung, gerade beim Wasserstoff, ist die Strombereitstellung. Für sie liegen im Hinblick auf die Energieträger- und länderspezifische Strombereitstellung in Europa im Durchschnitt Daten mit guter Qualität vor. Deutschland weist dabei die beste Datenqualität auf.

Den Bereich Busherstellung betreffend, sind für alle drei Antriebstechnologien detaillierte Stücklisteninformationen des Fahrzeugherstellers und der wesentlichen Zulieferer vorhanden. Gegebenfalls auftretende Datenlücken konnten gemeinsam mit den Entwicklungsingenieuren des Busherstellers und der Zulieferer geschlossen werden. Die Datenqualität ist sehr gut.

Untersuchungen für die Entsorgung von Nahverkehrsbussen liegen explizit noch nicht vor. Daher wurden die aus dem Pkw Bereich bekannten Prozesse zur Fahrzeugverwertung für die Modellierung des Bus EoL herangezogen. Detaillierte Material- und Gewichtsangaben sind für alle drei Antriebstechnologien verfügbar. Die Datenqualität wird daher als gut bis befriedigend angesehen.

6 Anwendung des Modells

Nach der Entwicklung des modularen Modells zur ökologischen Analyse von Nahverkehrsomnibussen erfolgt nun die praktische Anwendung des Modells anhand zweier Beispiele. Im ersten Beispiel (Kapitel 6.1) wird ein Antriebstechnologievergleich auf einer einzelnen Strecke berechnet und im zweiten Beispiel (Kapitel 6.1.5) das Umweltprofil des Betriebes einer kompletten städtischen Busflotte bestimmt. Mehr Details und Hintergrundinformationen zu den Beispielen finden sich in den Ökobilanzberichten der EU Projekte CUTE [158] und ECTOS [159].

Außerdem ist die Verwendbarkeit des Modells zur Erstellung von Szenarien eine der Anforderungen an diese Arbeit. Dies wird anhand der in Kapitel 6.3 erstellten Szenarien für beide Beispiele demonstriert.

6.1 Antriebstechnologievergleich

Der Antriebstechnologievergleich wird zwischen einem Diesel-, einem CNG- und einem Brennstoffzellenbus auf der Linie 42 in Stuttgart durchgeführt. Er berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus und ist analog zur Modellstruktur in die Abschnitte Fahrzeugherstellung und –ent-sorgung, Kraftstoffbereitstellung, Busbetrieb untergliedert. Die Ergebnisse aus der Integration aller vier Module erlaubt schließlich einen aussagekräftigen Vergleich der drei untersuchten Antriebstechnologien.

6.1.1 Fahrzeugherstellung

Basis für die Modellierung der Fahrzeugherstellung ist das Dieselfahrzeug. Es wird entsprechend der in Kapitel 5.2 vorgestellten modularen Struktur aufgebaut. Für das CNG und Brennstoffzellenfahrzeug erfolgen die in Tabelle 6.1 genannten Änderungen am Modell. Die tatsächlichen Fahrzeuggewichte belaufen sich für den Dieselbus auf ca. 11 t, für den CNG Bus auf ca. 12 t und für den BZ Bus auf knapp 14 t.

Tabelle 6.1 Baugruppengewichte und –änderungen der untersuchten Busse

Baugruppe	Kurzbezeichnung	Modellierte Masse [kg]				
		Diesel	CNG		BZ	
			Reduktion (-)	Addition(+)	Reduktion (-)	Addition(+)
Rohbau	R	26,7 %		+0,6%		1,1%
Fahrwerksumfang	F	5,4 %				
Druckluftanlage	F1	1,2 %				
Kraftstoffanlage	F2	3,1 %	-2,9%	+9,6%	-2,9%	9,8%
Auspuffanlage	F3	0,6 %	-0,6%	+0,6%	-0,4%	0,3%
Antriebsstrang	A	30,8 %	-9,0%	+11,0%	-7,8%	25,1%
Elektrik	E	4,1 %			-0,3%	0,9%
Innenausbau	I	13,3 %			-0,6%	
Montageteile	M	8,9 %		+0,6%		1,6%
Bestuhlung	B	1,1 %			-0,4%	
Sonstige Einbauteile	S	0,8 %			-1,4%	0,5%

Baugruppe	Kurzbezeichnung	Modellierte Masse [kg]				
		Diesel	CNG		BZ	
			Reduktion (-)	Addition(+)	Reduktion (-)	Addition(+)
Heizung/Lüftung/Klima	H	2,9 %				
Lackierung	L	0,9 %		66		30
<i>Summe</i>		<i>100 % t</i>	-12,6 %	+22,4 %	-13,7 %	+39,3 %
zusätzl. Gewicht				+9,8 %		+25,7 %
Bus gesamt		~11 t	~12 t		~13,9 t	

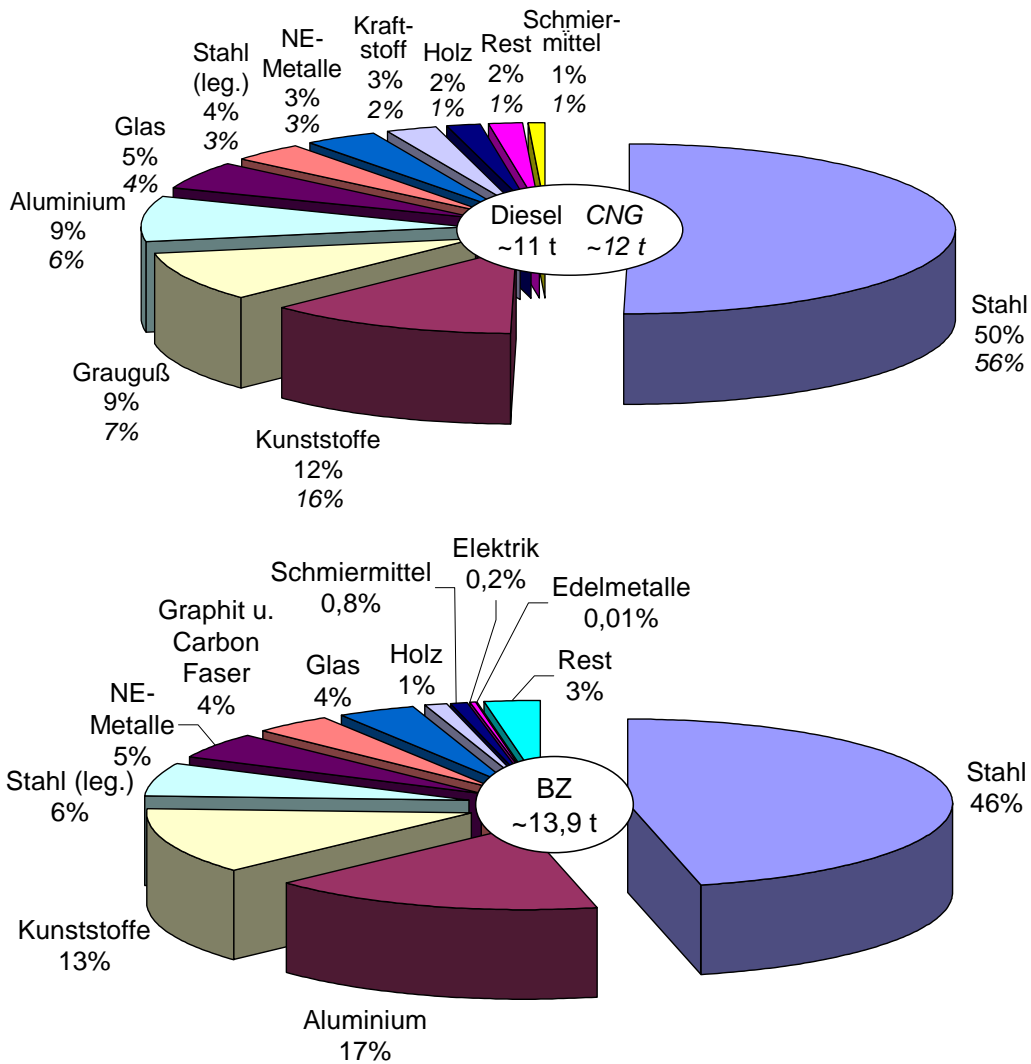


Abbildung 6.1 Materialzusammensetzung der drei Busse

Die Materialzusammensetzung der Fahrzeuge wird in Abbildung 6.1 beschrieben. Während sich Diesel und CNG Fahrzeug (kursive Werte)⁶⁷ im Wesentlichen nur im Kraftstofftank unterscheiden, ist für das BZ Fahrzeug ein reduzierter Stahlanteil bei gleichzeitig höherem Anteil an speziell im Leichtbau eingesetzten Materialien, wie z.B. Aluminium und Carbonfaser erkennbar.

⁶⁶ vernachlässigbar

⁶⁷ Das Kuchendiagramm repräsentiert die Dieselwerte. Die CNG Werte sind unter den Dieselwerten für die jeweiligen Materialien angegeben, und würden zu einem leicht veränderten Diagramm führen.

6.1.2 Fahrzeugentsorgung

Die Fahrzeugentsorgung wird entsprechend den in Kapitel 5.3 gemachten Angaben zu den Materialerfassungsgraden und Recyclingpotentialen modelliert. Fahrzeugherstellung und –entsorgung werden anteilig über die angenommene Lebensdauer von 720.000 km (12 Jahre à 60.000 km) bei der Lebenszyklusbetrachtung in Kapitel 6.1.5 berücksichtigt.

6.1.3 Kraftstoffbereitstellung

Die Bereitstellung des Diesel- und Erdgaskraftstoffs wird entsprechend den deutschen Randbedingungen (siehe Kapitel 5.4.1 und 5.4.2) abgebildet. Die Wasserstoffbereitstellung erfolgt dezentral, entweder über die Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von Strom aus Wasserkraft oder über die Dampfreformierung von Erdgas (vgl. Kapitel 5.4.3). Diese Routen werden gewählt, um die Bandbreite an Ergebnissen für Wasserstoff aus regenerativen bzw. nicht regenerativen Ressourcen darzustellen. Die Elektrolyseroute unter Verwendung von Strom aus dem deutschen Netz wurde hier nicht untersucht, da sie in Kapitel 5.4.3 und vorangegangenen Untersuchungen [157], [85] bereits eindeutig als ökologisch nicht sinnvoll eingestuft wurde. Der Primärenergiebedarf und die Emissionswerte für die Kraftstoffbereitstellung werden aus Kapitel 5.4 übernommen.

6.1.4 Busbetrieb

Wie anhand des Höhenprofils der Linie 42 (siehe Abbildung 6.2) zu erkennen ist, erweist sich diese als topographisch anspruchsvoll. In beide Richtungen durchfahren, dauert eine Runde ca. 85 Minuten. Dabei werden 534 Höhenmeter mit einer relativ niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeit von 15-16 km/h zurückgelegt. Entsprechend dem in Kapitel 5.6.3 vorgestellten Ansatz der abschnittswisen Streckenanalyse wird in Abbildung 6.2 eine Einteilung der Strecke in Abschnitte mit positiver und negativer Steigung vorgenommen, wobei die Trennung immer an Bushaltestellen erfolgt.

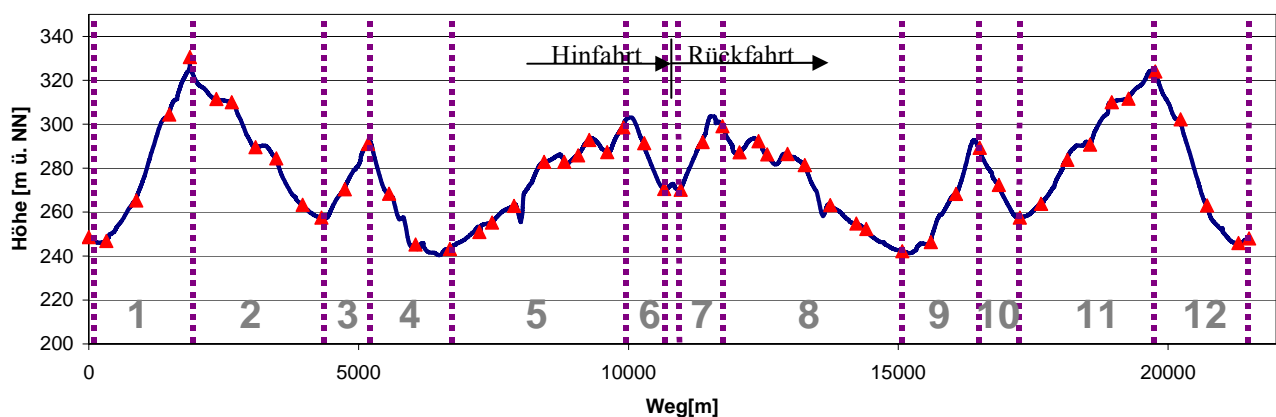


Abbildung 6.2 Höhenprofil Linie 42

Für jeden dieser Abschnitte werden Abschnittslänge, durchschnittliche Steigung und durchschnittliche Geschwindigkeit berechnet. Hierzu liegen üblicherweise Streckendaten des städti-

schen Verkehrsbetriebes vor. Dies war auch hier der Fall, die Daten wurden von der Stuttgarter Straßenbahn AG (SSB) bereitgestellt. Alternativ könnten die Werte auch aus einer Höhenkarte und mit Hilfe des Fahrplanes ermittelt werden.

Es wird nun das Vorgehen zur Ermittlung der Verbrauchs- und Emissionsfaktoren wie in Kapitel 5.6.3 beschrieben, durchgeführt. Dabei kommen die Gleichungen 5.10 bis 5.26 zum Einsatz.

Zunächst ist die Flottenzusammensetzung nach Gleichung 5.10 zu bestimmen. Für den vorliegenden Antriebstechnologievergleich ist $Fzgan_{AT} = [0;1]$ mit $Fzgan_{Diesel_{EURO3}}$, $Fzgan_{CNG}$ und $Fzgan_{BZ} = 1$.

Als Nächstes erfolgt die Eingabe zur Streckenlänge. Nach der Anzahl der Streckenabschnitte werden ihre jeweiligen Länge, Steigung und Verkehrssituation eingegeben, wie in Abbildung 6.3 dargestellt. Die Verkehrssituation wird, wie in Kapitel 5.6.3 bzw. 3.3.1 beschrieben, anhand der Durchschnittsgeschwindigkeit des einzelnen Abschnitts zugewiesen. (siehe Tabelle 6.2)

117							
118	Länge Abschnitt 10 der Einzelroute	Abschnitt 10	[km]	0,74673			
119	durchschnittliche Steigung von Abs	Abschnitt 10	[%]	-4,26%			
120	Verkehrssituation Abschnitt 10	Abschnitt 10		Innerortsstraßen im Stadtkern	IO_Kern	15,63	
121							
122	Länge Abschnitt 11 der Einzelroute	Abschnitt 11	[km]	2,50958			
123	durchschnittliche Steigung von Abs	Abschnitt 11	[%]	2,65%			
124	Verkehrssituation Abschnitt 11	Abschnitt 11		Innerorts, Hauptverkehrsstraße, vorfahrtsberechtig, starke Störung	IO_HVS4	18,52	
125							
126	Länge Abschnitt 12 der Einzelroute	Abschnitt 12	[km]	1,73743			
127	durchschnittliche Steigung von Abs	Abschnitt 12	[%]	-4,37%			
128	Verkehrssituation Abschnitt 12	Abschnitt 12		Innerortsstraßen im Stadtkern	IO_Kern	15,63	
129				Bitte auswählen			
130				Innerortsstraßen mit Stop & Go			
131				Innerortsstraßen, gebundener Verkehr			
132				Innerorts, Nebenstraßen, dicht bebaut			
133				Innerorts, Hauptverkehrsstraße, vorfahrtsberechtig, starke Stör			
134				Innerorts, Hauptverkehrsstraße, vorfahrtsberechtig, mittlere Stör	keine	0,00	

Abbildung 6.3 Eingabe Streckenabschnitte - Modellscreenshot

Gesamtlänge und Durchschnittsgeschwindigkeit ergeben sich mit den Werten aus Tabelle 6.2

nach Gleichung 5.11 $l_{Linie42_{ges}} = \sum_{i=1}^{12} l_{Abschnitt_i} = 21,5 \text{ km}$

bzw. Gleichung 5.19 $\overline{V}_{Linie42} = \frac{\sum_{i=1}^{12} (l_{Abschnitt_i} * V_{Abschnitt_i})}{\sum_{i=1}^{12} l_{Abschnitt_i}} = 14,5 \text{ km/h}$.

Unterschieden nach Hin- und Rückweg beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit $\overline{V}_{Linie42_{hin}} = 15,1 \text{ km/h}$ und $\overline{V}_{Linie42_{rück}} = 13,9 \text{ km/h}$.

Die Beladung beträgt 3,5 t, das entspricht einer 50 % Beladung des Dieselmotors. Abgasnachbehandlungssysteme bleiben im Beispiel unberücksichtigt. Alle Werte für die Reduktionsfaktoren RF werden daher mit dem Wert 1 ins Modell eingetragen (siehe Abbildung 6.4)

Schritt 1		Bitte Auswählen		Fahrzeuganzahl nach EURO-Klassen		Abgasreinigungssysteme	
Anzahl Fzge nach EURO-Stufen		Anzahl Diesel EURO-0	[Stek]	davon mit CRT		davon mit SCR	
		Anzahl Diesel EURO-1	[Stek]				
		Anzahl Diesel EURO-2	[Stek]	1			
		Anzahl Diesel EURO-3	[Stek]	1			
		Anzahl Diesel EURO-4	[Stek]				
		Anzahl Diesel EURO-5	[Stek]				
		Anzahl CNG mager	[Stek]	1			
		Anzahl FC	[Stek]	1			
		Kontroll-Summe		4			

Abbildung 6.4 Eingabe Abgasnachbehandlungssysteme – Modellscreenshot

Der gesamte Kraftstoffverbrauch und die Emissionen aus dem Busbetrieb auf der Linie 42 ergeben sich schließlich nach Gleichung 5.21 als Summe aus den für jeden Abschnitt gesondert ermittelten Emissionen. In Tabelle 6.2 werden beispielhaft die CO₂ Emissionen des Diesel Euro 3 Busses für jeden Abschnitt angegeben.

Tabelle 6.2 Abschnitte der Linie 42 mit Steigung, Abschnittslänge, Verkehrssituation und CO₂ Emissionsfaktor

Geschwindigkeit V [km/h]	VS ⁶⁸ (aus HBEFA)	V _{VS} [km/h] (aus HBEFA)	Steigung S [%]	Abschnittslänge [km]	Emissionsfaktor [kg/km]				
V _{Abschnitt₁}	14,85	IO_Kern	15,63	S _{Abschnitt₁}	4,37 %	l _{Abschnitt₁}	1,87	EFA _{EURO3CO2IO_Kern,50%,4%}	1,93
V _{Abschnitt₂}	15,26	IO_Kern	15,63	S _{Abschnitt₂}	-2,99 %	l _{Abschnitt₂}	2,44	EFA _{EURO3CO2IO_Kern,50%,-2%}	0,75
V _{Abschnitt₃}	18,32	IO_HVS4	18,52	S _{Abschnitt₃}	3,87 %	l _{Abschnitt₃}	0,87	EFA _{EURO3CO2IO_HVS4,50%,4%}	1,90
V _{Abschnitt₄}	14,48	IO_Kern	15,63	S _{Abschnitt₄}	-3,16 %	l _{Abschnitt₄}	1,52	EFA _{EURO3CO2IO_Kern,50%,-4%}	0,75
V _{Abschnitt₅}	13,91	IO_Nebenstraße_dicht	13,08	S _{Abschnitt₅}	1,72 %	l _{Abschnitt₅}	3,21	EFA _{EURO3CO2IO_N_d,50%,2%}	1,61
V _{Abschnitt₆}	15,59	IO_Kern	15,63	S _{Abschnitt₆}	-3,70 %	l _{Abschnitt₆}	0,76	EFA _{EURO3CO2IO_Kern,50%,-4%}	0,63
V _{Abschnitt₇}	10,59	IO_gebunden	10,53	S _{Abschnitt₇}	3,73 %	l _{Abschnitt₇}	0,77	EFA _{EURO3CO2IO_geb,50%,4%}	2,45
V _{Abschnitt₈}	11,14	IO_gebunden	10,53	S _{Abschnitt₈}	-1,71 %	l _{Abschnitt₈}	3,33	EFA _{EURO3CO2IO_geb,50%,-2%}	1,06
V _{Abschnitt₉}	14,87	IO_Kern	15,63	S _{Abschnitt₉}	3,20 %	l _{Abschnitt₉}	1,43	EFA _{EURO3CO2IO_Kern,50%,4%}	1,73
V _{Abschnitt₁₀}	14,76	IO_Kern	15,63	S _{Abschnitt₁₀}	-4,26 %	l _{Abschnitt₁₀}	0,75	EFA _{EURO3CO2IO_Kern,50%,-4%}	0,63
V _{Abschnitt₁₁}	17,09	IO_HVS4	18,52	S _{Abschnitt₁₁}	2,65 %	l _{Abschnitt₁₁}	2,51	EFA _{EURO3CO2IO_HVS4,50%,2%}	1,69
V _{Abschnitt₁₂}	14,42	IO_Nebenstraße_dicht	13,08	S _{Abschnitt₁₂}	-4,37 %	l _{Abschnitt₁₂}	1,74	EFA _{EURO3CO2IO_N_d,50%,-4%}	0,59

Die CO₂ Emissionen für das einmalige Durchfahren der Linie 42 mit einem Diesibus Euro3 ergeben nach Gleichung 5.21 wie folgt:

$$E_{Euro3CO_2} = \sum_{i=1}^{12} (EFA_{Euro3CO_2VS_i,50\%,S_i} \cdot l_{Abschnitt_i}) \cdot RF_{Euro3CO_2} \cdot Fzgan_{Euro3} = 27,05 \text{ kg } CO_2$$

Analog werden die emittierten Mengen aller berücksichtigten Schadstoffkategorien SS und die verbrauchte Kraftstoffmenge mKr für die untersuchten Antriebstechnologien bestimmt. Die

⁶⁸ IO: Innerorts, HVS: Hauptverkehrsstraße, dicht: dichter Verkehr, gebunden: gebundener Verkehr

Ergebnisse können wahlweise für die Gesamtstrecke der Linie oder je gefahrenen km⁶⁹ auf der Linie ausgegeben werden. Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse des Technologievergleichs auf der Linie 42 je km, wie sie vom Busbetriebsmodell in MS Excel ausgegeben werden.

		BZ GaBi-Export	Diesel EURO0 GaBi-Export	Diesel EURO1 GaBi-Export	Diesel EURO2 GaBi-Export	Diesel EURO3 GaBi-Export	Diesel EURO4 GaBi-Export	Diesel EURO5 GaBi-Export	CNG mager GaBi-Export
Kraftstoff	[kg/km]	0,22	0,00	0,00	0,39	0,40	0,00	0,00	0,55
Kraftstoff	[lDA/km]	0,74	0,00	0,00	0,47	0,48	0,00	0,00	0,58
Kraftstoff	[lDA/100km]	73,78	0,00	0,00	46,78	48,42	0,00	0,00	58,24
CO ₂	[kg/km]		0,00	0,00	1,23	1,28	0,00	0,00	1,36
CO	[g/km]		0,00	0,00	2,90	3,53	0,00	0,00	1,16
HC	[g/km]		0,00	0,00	0,78	0,73	0,00	0,00	3,13
NO _x	[g/km]		0,00	0,00	14,86	12,42	0,00	0,00	10,40
Part	[g/km]		0,00	0,00	0,28	0,35	0,00	0,00	0,01
		BZ-Bus	Diesel EURO0	Diesel EURO1	Diesel EURO2	Diesel EURO3	Diesel EURO4	Diesel EURO5	CNG mager
Benzol	[g/km]		0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
CH ₄	[g/km]		0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	1,14
N ₂ O	[g/km]		0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
NH ₃	[g/km]		0,00	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NMHC	[g/km]		0,00	0,00	0,76	0,71	0,00	0,00	1,91
Pb	[g/km]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO ₂	[g/km]		0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
Toluol	[g/km]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Xylol	[g/km]		0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00

Abbildung 6.5 Verbrauch und Emissionen pro km Linie 42 – Modellscreenshot

Die Ergebnisse werden schließlich über eine Schnittstelle in das in der Ökobilanzierungssoftware GaBi 4 aufgebaute Lebenszyklusmodell übergeben. Neben der tabellarischen Darstellungsform werden die Emissions- und Verbrauchswerte auch grafisch ausgegeben. Die Grafiken finden sich im Anhang H.1.

6.1.5 Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtung

Unter Verwendung der in Kapitel 6.1.1 bis 6.1.4 gewählten Randbedingungen werden mit Gleichung 5.24 die Emissionen und der Primärenergiebedarf der Bussysteme berechnet. Die in Abbildung 6.6 dargestellten Lebenszyklusergebnisse erlauben nun den ganzheitlichen ökologischen Vergleich der drei untersuchten Bussysteme. Es werden der Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen und gesamt⁷⁰ sowie ausgewählte Emissionen dargestellt. Weitere Ergebnisse zum Antriebstechnologievergleich sind im Anhang H.1 aufgeführt.

Das Abschneiden des Brennstoffzellenbusses im Vergleich zu den beiden konventionellen Bussen hängt in erster Linie von der Wahl der Wasserstoffbereitstellungsrouten ab. Es zeigt sich, dass der BZ Bus noch Optimierungsbedarf hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs und der Kraftstoffbereitstellung hat, speziell wenn er mit Wasserstoff aus nicht erneuerbaren Ressourcen betrieben wird. In welchem Maße er zu optimieren ist, um umweltlich wettbewerbsfähig mit den beiden anderen Bussystemen zu sein, wird im Kapitel 6.3 mit Hilfe von Szenarien ermittelt. Die Herstellung des BZ Busses weist bei einigen Emissionen, wie z.B. den Partikeln, eine Relevanz hinsichtlich des Lebenszyklus auf. Insgesamt betrachtet, hat die BZ Busherstellung ungefähr doppelt so hohe Umweltlasten wie die des Diesel oder des CNG Busses.

⁶⁹ entspricht Fahrzeugkm, d.h. der jeweilige Bus ist mit der angegebenen Zuladung 1 km gefahren

⁷⁰ Primärenergiebedarf gesamt beinhaltet den PE Bedarf aus erneuerbaren und nicht erneuerb. Ressourcen. Im Sinne einer Nachhaltigkeitsbetrachtung ist der Bedarf an Primärenergie aus nicht erneuerb. Ressourcen entscheidend.

Der CNG Bus weist aufgrund seines höheren Verbrauchs Nachteile gegenüber dem Dieselbus hinsichtlich des Primärenergiebedarfs aus nicht erneuerbaren Ressourcen und der CO₂ Emissionen auf. Signifikante Vorteile hat er hingegen bei den Partikelemissionen. Eine detailliertere Diskussion des Systemvergleichs findet sich in [158]. Die dargestellten Resultate dienen zur Veranschaulichung der Ergebnisse, die das Modell liefert. Die Zahlenwerte aller untersuchten Emissionen und des Primärenergiebedarfs enthält Tabelle H.1 in Anhang H.

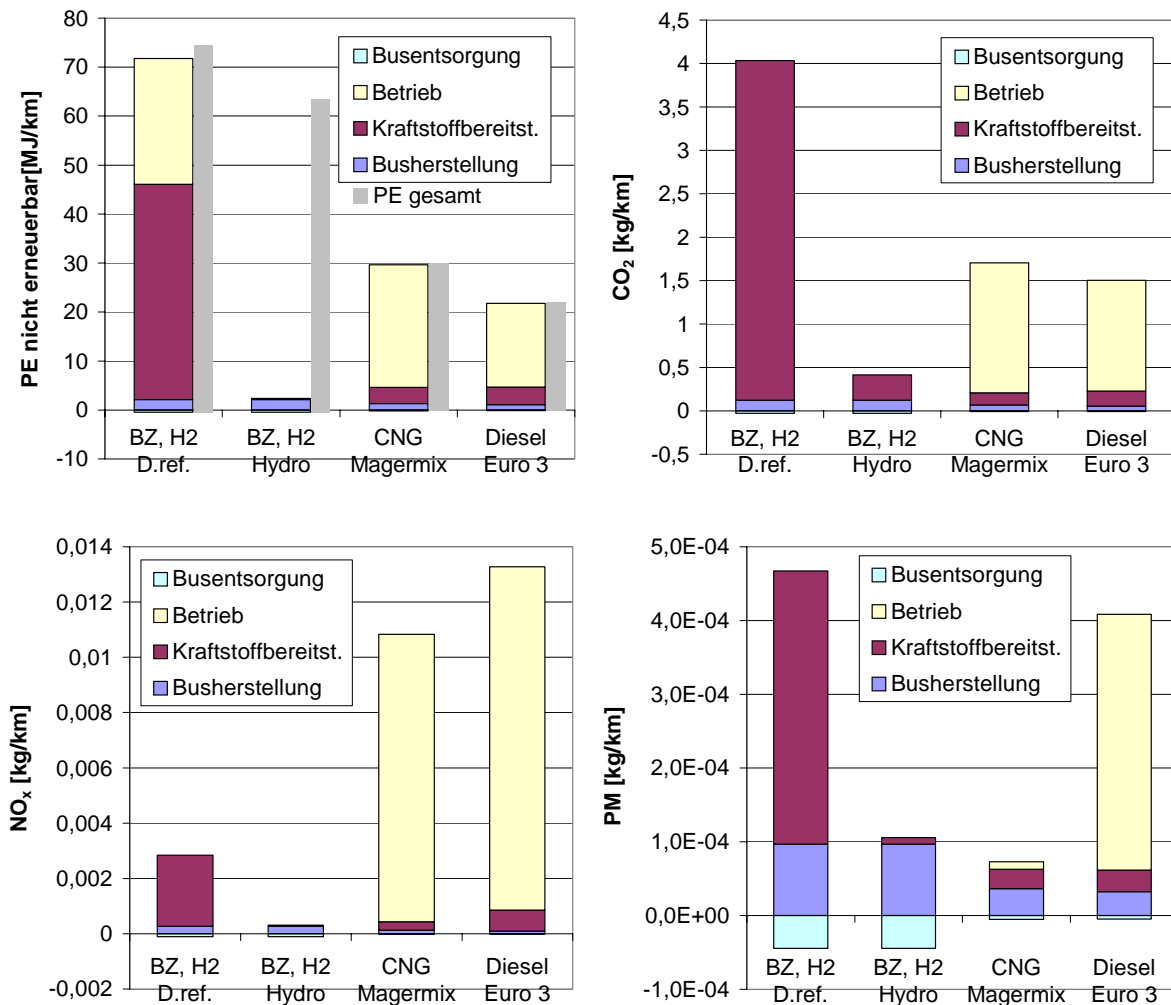


Abbildung 6.6 Lebenszyklusergebnisse für die Linie 42 – Primärenergiebedarf und ausgewählte Emissionen⁷¹

Der Vergleich erfolgt auf Basis der Sachbilanzdaten, d.h. auf Einzelemissionsbasis. Um die Anzahl der zu vergleichenden Ergebnisse zu verringern, besteht die Möglichkeit, den Vergleich auf Basis von Umweltwirkungskategorien, wie z.B. dem Treibhaus- oder Versauerungspotential, durchzuführen (siehe Kapitel 2.3.3). Die Auswahl der Wirkkategorien ist zu Beginn der Studie zu definieren. Von einer Betrachtung der Wirkungskategorien wurde hier abgesehen, da im Bezug auf das Ziel der Arbeit keine neuen Erkenntnisse zu erwarten sind. Im Rahmen dieser Arbeit

⁷¹ Überwiegen die Gutschriften für die während der Busentsorgung zurückgewonnenen Materialien die für die Entsorgung erforderlichen Aufwendungen, so ergeben sich für die Entsorgungsphase negative Werte, die entsprechend im Diagramm ausgewiesen werden.

steht die Ermittlung der Sachbilanzdaten im Vordergrund. Die Auswahl der Wirkkategorien und Wirkungsabschätzungsmethode bleibt dem Anwender des Modells vorbehalten.

6.2 Umweltprofil einer kompletten Busflotte

Im Anschluss an das Beispiel des Technologievergleichs auf der Linie 42 wird nun die Durchführung einer Gesamtbilanz für eine komplette Busflotte auf dem ganzen Streckennetz einer Stadt am Beispiel der Stadt Porto in Portugal vorgestellt.

Die Daten zur Flotten- und Streckencharakterisierung wurden im CUTE Projekt im Rahmen einer Umfrage zur Charakterisierung von Busflotten und der bedienten Strecken ermittelt, an welcher Busflottenbetreiber aus 23 europäischen Städten teilnahmen. Die Umfrageangaben Portos sind im Detail in Tabelle I.2 im Anhang H.2 aufgeführt.

Das Busnetz in Porto wird von der Sociedade de Transportes Colectivos do Porto, S.A. (STCP) betrieben. Die insgesamt 70 zu bedienenden Linien beschränken sich nicht nur auf das Stadtgebiet Portos, sondern schließen auch die Vorstädte mit ein. Der zur Verfügung stehende Fuhrpark umfasst 583 Busse. Das in Abbildung 6.7 dargestellte Streckennetz ist anspruchsvoll. Es ist sehr hügelig, mit teilweise sehr engen Kopfsteinpflasterstraßen, gerade im historischen Stadtzentrum. Die Verkehrssituation entspricht laut dem Verkehrsbetrieb STCP [178] der Verkehrssituation „Innerortsstraßen im Kern“ mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von rund 16 km/h



Abbildung 6.7 Streckennetz Porto

6.2.1 Fahrzeugherstellung und -entsorgung

Entsprechend der Fahrzeuganzahl für Diesel und CNG Busse wird die Fahrzeugherstellung und -entsorgung wie in Kapitel 6.1.1 und 6.1.2 beschrieben, berücksichtigt. Die Flottenzusammen-

setzung in Porto stellt sich gemäß Tabelle 6.3 dar. Die angegebenen Fahrzeuganteile ergeben sich entsprechend Gleichung 5.10a. Die Bedingung $\sum_{i=0}^7 \%Fzganteil_{AT_i} = 100\%$ ist erfüllt.

Tabelle 6.3 Flottenzusammensetzung STCP, Porto

Antriebskonzept	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5	CNG	BZ	Gesamt
Anzahl	158	175	75	0	0	0	175	0	583
Fahrzeuganteil	27,1 %	30,0 %	12,9 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	30,0 %	0,0 %	100 %

6.2.2 Kraftstoffbereitstellung

Die Bereitstellung von Diesel- und CNG Kraftstoff wird mit portugiesischen Randbedingungen berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.4.1 und 5.4.2)

6.2.3 Flottenbetrieb

Die Gesamtfahrleistung der Flotte für Gleichung 5.15 wird für 2003 vom Busbetreiber $FL_{ges\,Netz} = 31.800.000\ km$ angegeben. Die jährliche Fahrzeugfahrleistung wird mit Gleichung

$$5.13 \text{ bestimmt, } FL_{Fzg} = \frac{FL_{ges\,Porto}}{Fzgan_{ges}} = \frac{31.800.000}{583} = 54.545 \frac{km}{Jahr \cdot Fzg}.$$

Entsprechend Gleichung 5.18 wird die Steigung bei einer Gesamtbilanz des Netzes über die prozentuale Verteilung der Steigungsklassen im Streckennetz erfasst. Mit den Angaben des Verkehrsbetriebs ergibt sich die in Tabelle 6.4 angegebene Einteilung.

Tabelle 6.4 Einteilung Streckennetz Porto in Steigungsklassen

Steigungsklassen	-6 %	-4 %	-2 %	0 %	2 %	4 %	6 %
Anteil am Streckennetz	20 %	15 %	10 %	10 %	10 %	15 %	20 %

Nach Kapitel 5.6.3 wird bei der Gesamtbilanz einer Flotte dem Netz eine Verkehrssituation zugewiesen. In Abstimmung mit dem Verkehrsbetreiber wurde die Verkehrssituation „Innerortsstraßen im Kern“ IO_Kern (vgl. Anhang E.1) mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 15,6 km/h gewählt.

Die durchschnittliche Fahrzeugbeladung wurde für 2003 von STCP mit 31,2 % angegeben. Diesem Wert wurde die Beladung 50 % im Modell zugewiesen. Abgasnachbehandlungssysteme sind in den Bussen Portos nicht eingebaut. Alle Reduktionsfaktoren RF werden daher auf den Wert eins gesetzt.

Die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch einer Busflotte ergeben sich aus der Summe der Werte für die einzelnen Antriebstechnologien AT nach Gleichung 5.22. Tabelle 6.5 listet bei-

spielhaft die CO₂ Emissionsfaktoren für alle Antriebstechnologien und Steigungsklassen in Porto auf.

Tabelle 6.5 Emissionsfaktoren EFA_{AT} für CO₂ in [g/km]

CO ₂	-6 %	-4 %	-2 %	0 %	2 %	4 %	6 %
Euro 0	564,2	768,1	1034,4	1359,8	1734,4	2169,1	2675,1
Euro 1	475,7	646,6	880,9	1184,4	1536,8	1939,6	2411,1
Euro 2	434,4	601,6	832,4	1128,8	1480,5	1877,1	2340,7
CNG	451,5	628,9	866,8	1171,1	1531,2	1934,4	2404,6

Zusammen mit dem Steigungsklassenanteil z_p , dem Fahrzeuganteil $\%Fzganteil_{AT_i}$ und der Gesamtfahrleistung $FL_{ges\ Porto}$ betragen nach Gleichung 5.22 die CO₂ Emissionen des Betriebs der gesamten Busflotte Portos in 2003

$$E_{CO_2} = \sum_{i=0}^7 \sum_{p=1}^7 \left(EFA_{CO_2, AT_i, IO_Kern, 50\%, S} \cdot \%Fzganteil_i \cdot FL_{Porto} \cdot RF_{CO_2, AT_i} \cdot z_p \right) = 43.319.972 \frac{\text{kg}}{\text{Jahr}}.$$

Analog ergeben sich für alle weiteren Emissionen und für den Kraftstoffverbrauch folgende Werte:

		BZ-Bus	Diesel EURO0	Diesel EURO1	Diesel EURO2	Diesel EURO3	Diesel EURO4	Diesel EURO5	CNG mager	GaBi-Export
Kraftstoff	[kg]	0,00	4075153,42	3984986,48	1637634,53	0,00	0,00	0,00	5413291,91	
Kraftstoff	[LiterDÄ]	0,00	4909823,39	4801188,53	1973053,65	0,00	0,00	0,00	5731720,84	11684065,57
CO2	[kg]		12938611,73	12652331,77	5199489,50	0,00	0,00	0,00	13345356,38	44135789,39
CO	[g]		64370085,02	37140047,27	11042714,84	0,00	0,00	0,00	10306533,85	122859380,99
HC	[g]		22737946,62	12287588,29	2891341,68	0,00	0,00	0,00	26985855,69	64902732,28
NOx	[g]		189970524,14	131173684,23	60551308,98	0,00	0,00	0,00	98900471,33	480595988,68
Part	[g]		9466951,72	6870624,01	1091571,53	0,00	0,00	0,00	127350,01	17556497,26
		BZ-Bus	Diesel EURO0	Diesel EURO1	Diesel EURO2	Diesel EURO3	Diesel EURO4	Diesel EURO5	CNG mager	gesamt
Benzol	[g]		379723,70	205202,72	48285,40	0,00	0,00	0,00	0,00	633211,82
CH4	[g]		545710,73	294902,12	69392,20	0,00	0,00	0,00	9795865,67	10705870,72
N2O	[g]		139614,55	154636,37	65045,46	0,00	0,00	0,00	1517,73	360814,10
NH3	[g]		43090,91	47727,27	20454,54	0,00	0,00	0,00	477,27	111750,00
NMHC	[g]		22192236,32	11992686,53	2821949,51	0,00	0,00	0,00	16461372,13	53468244,48
Pb	[g]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SO2	[g]		2445092,17	2390991,97	26202,15	0,00	0,00	0,00	305,69	4862591,98
Toluol	[g]		72761,43	39320,28	9252,29	0,00	0,00	0,00	0,00	121334,00
Xylol	[g]		181903,58	98300,71	23130,73	0,00	0,00	0,00	0,00	303335,03

Abbildung 6.8 Verbrauch und Emissionen aus dem Busbetrieb in Porto in 2003 – Modellscreenshot

Aus Praktikabilitätsgründen weist die Gesamtbilanz einer Flotte, wie in Kapitel 5.6.3 diskutiert, einen reduzierten Detaillierungsgrad auf. Zur Erhöhung des Detaillierungsgrades können jederzeit mit entsprechend größerem Aufwand eine routenweise Modellierung vorgenommen und die Ergebnisse jeder einzelnen Route addiert werden, um so schließlich das detaillierte Umweltprofil der kompletten Flotte zu erhalten. Vergleicht man den berechneten Verbrauch an Diesel und CNG mit den vom Busbetreiber angegebenen Werten, so ist zu erkennen, dass das Modell entsprechend Gleichung 5.22 mit einer Abweichung von -7 % für den Dieserverbrauch und +3 % für

den Erdgasverbrauch⁷² mit den getroffenen Vereinfachungen und Annahmen bereits realitätsnahe Ergebnisse liefert. Sollten sich größere Abweichungen ergeben, so können diese Abweichungen beispielsweise durch die Wahl einer anderen Verkehrssituation korrigiert werden.

6.2.4 Ergebnisse der Lebenszyklusbetrachtung

Die Ergebnisse aus der Lebenszyklusbetrachtung für die gesamte Busflotte Portos sind in Abbildung 6.9 wiedergegeben. Die Darstellung kann auf den gesamten Lebenszyklus, auf ein Jahr oder auf einen beliebigen anderen Zeitraum bezogen. Die Verhältnisse der einzelnen Balken bleiben konstant, es ändern sich nur die absoluten Zahlen in Abhängigkeit des Betrachtungszeitraumes. Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse für das Jahr 2003. Die Werte für alle untersuchten Emissionen sowie der Primärenergiebedarf aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Ressourcen sind in Tabelle H.3 in Anhang H.2 dargestellt.

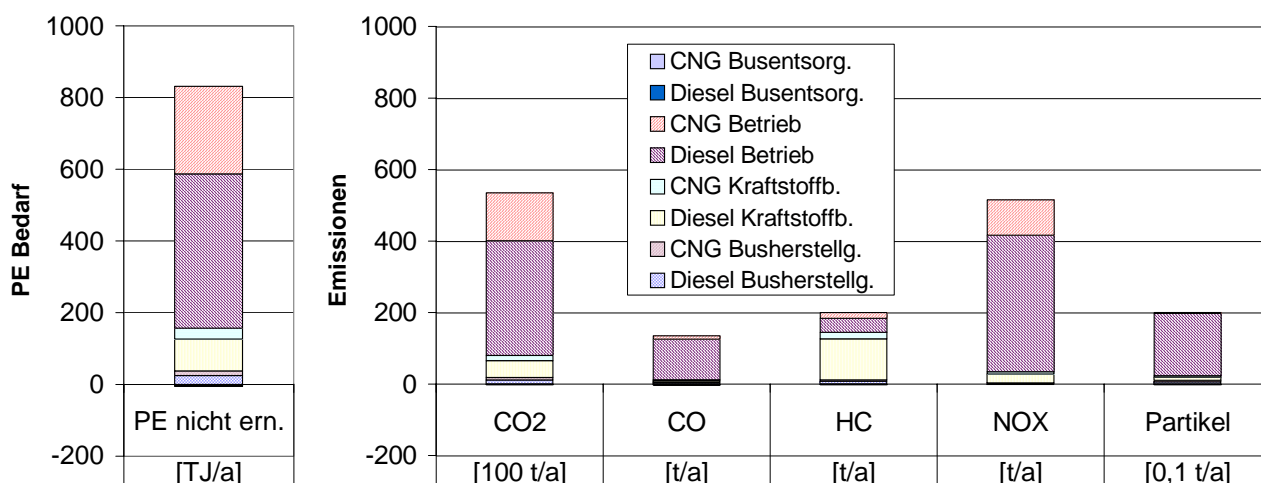


Abbildung 6.9 Primärenergieverbrauch und ausgewählte Emissionen der Busflotte in Porto in 2003 unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus⁷³

Mit Hilfe des Modells ist es also möglich, die direkten und indirekten Emissionen des Betriebs einer gesamten Busflotte über einen bestimmten Betrachtungszeitraum zu quantifizieren. Eine weitere Detaillierung der Deselemissionen in Euro Normklassen ist ebenfalls möglich, worauf aber aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle verzichtet wurde.

6.3 Szenarien

Aufgrund der Vielzahl an Parametern, die in das Modell eingearbeitet sind, können nun Szenarien anhand der Variation dieser Parameter erstellt werden. Die Erstellung von Szenarien hängt in erster Linie von der oder den Fragestellungen ab, zu denen der Anwender mit Hilfe des Modells Aussagen treffen möchte. Der Grundintention dieser Arbeit folgend, ein Modell mit einem

⁷² Diesel: 11.684.000 l (Modell) – 12.600.000 l (Betreiberangabe) → Abweichung Modell –7 %
 CNG: 5.570.000 l Dieseläquivalent (Modell) - 5.570.000 l Dieseläquivalent/ 5.400.000 Nm³ (Busbetreiber)
 → Abweichung Modell +3 %

⁷³ 0,1 t/a bedeutet dass die dargestellten Werte jeweils mal 0,1 multipliziert werden müssen, um auf den tatsächlichen Wert zu kommen. (Beispiel Partikel gesamt: tatsächlicher Wert aus Modell 20,1 t/a)

Nutzen sowohl für Busbetreiber wie auch für Bushersteller zu entwickeln, werden in diesem Kapitel, entsprechend der Betrachtungsperspektiven dieser beiden Gruppen beispielhafte Szenarien entwickelt.

6.3.1 Antriebsszenario

Das Beispiel in Kapitel 6.1 zeigt, dass der Brennstoffzellenantrieb mit dem momentanen Stand der Entwicklung vom Bushersteller weiter zu optimieren ist, um wettbewerbsfähiger gegenüber dem Dieselantrieb als Referenztechnologie zu werden. Mit Hilfe des Modells ist es möglich, entwicklungsbegleitend den BZ Antrieb zu analysieren und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Hierzu werden nachfolgend zwei Beispiele kurz dargestellt. Zum einen wird die Herstellung des Antriebsstranges und zum anderen der Lebenszyklus mit einem unterschiedlich optimierten Brennstoffzellenbus untersucht.

Abbildung 6.10 zeigt den Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen und ausgewählte Emissionen für die Herstellung des Dieselantriebsstrang (Euro 3 ohne Abgasnachbehandlung), den Status quo des im Rahmen des CUTE und ECTOS eingesetzten BZ Antriebsstranges und optimierten BZ Antriebsstrang. Der Dieselantrieb ist als Referenz auf 100 % gesetzt. Vorgabe für die Optimierung des BZ Antriebsstranges ist es, in etwa einen zum Dieselantrieb vergleichbaren Primärenergiebedarf und vergleichbare Emissionen zu erreichen. Hierzu werden verschiedene Parametereinstellungen in mehreren Szenarien untersucht. Die Parametereinstellungen in Szenario Nr. 6⁷⁴ liefern ungefähr mit dem Dieselantrieb vergleichbare Werte. Es wurden hierbei die Edelmetallbeladung auf 0,2 g/kW⁷⁵, die Herstellungsenergie auf 20 %⁷⁶ und das Stackgewicht um 10 %⁷⁷ reduziert.

⁷⁴ Die übrigen Szenarien brachten nicht das gewünschte Ergebnis und werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht aufgeführt.

⁷⁵ Dieser Wert entspricht der Zielvorgabe des Department of Energy, USA für BZ Antrieb im Jahr 2015

⁷⁶ In Abstimmung mit dem BZ Antriebshersteller wurden hier Skalierungseffekte durch eine Großserienfertigung abgeschätzt.

⁷⁷ Angabe der Entwicklungsabteilung, erreichbar durch vereinfachten Aufbau des Brennstoffzellenstacks und weitere Verbesserung bei Wassermanagement, Luftzufuhr etc.

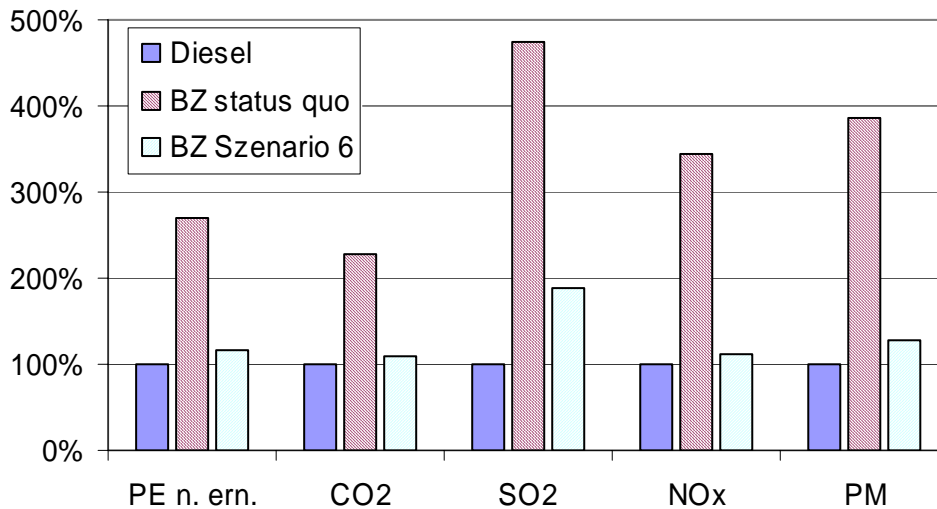


Abbildung 6.10 Vergleich der Antriebsstrangherstellung

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 6.1 ist für einen Brennstoffzellenbus mit Blick auf den Lebenszyklus vor allem der Kraftstoffverbrauch der entscheidende Faktor. Dieser kann entweder durch ein reduziertes Fahrzeuggewicht oder einen optimierten Antriebsstrang gesenkt werden. Die in Abbildung 6.11 gezeigten Ergebnisse ergeben sich aus dem Modell unter Verwendung der in Tabelle 6.6 aufgeführten Parameterwerte.

Tabelle 6.6 Randbedingungen für Lebenszyklusszenarien

	Status Quo	Szenario 1 (S1)	Szenario 2 (S2)
Verbrauch [kg/ 100 km]	14,6 ⁷⁸	11 (-25 %)	10 (-31,5 %) ⁷⁹
Anzahl Tankzylinder	9	6 (-350 kg)	
Edelmetallbeladung	n/a ⁸⁰		0,2 g/kW

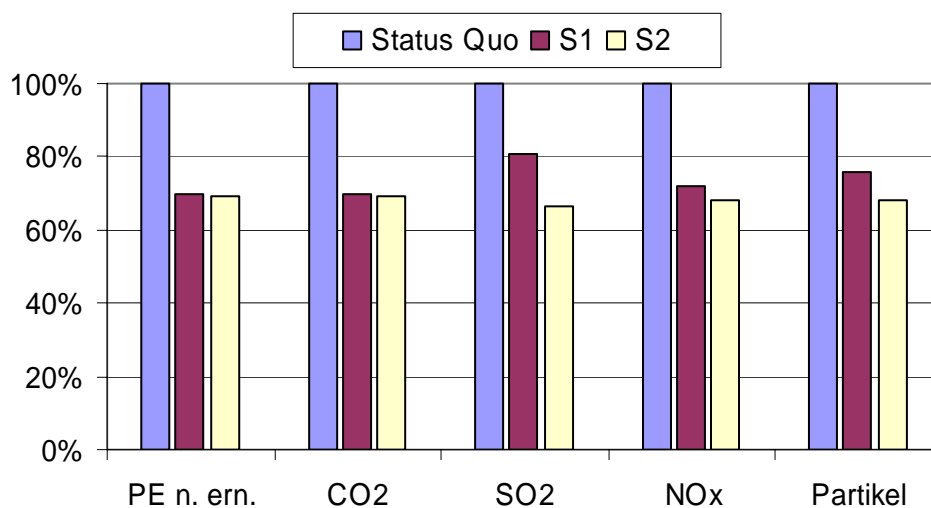


Abbildung 6.11 Lebenszyklusszenarien für optimierten BZ Bus im Vergleich zum Status Quo

⁷⁸ gemessen auf Esslingen Zyklus [47], H₂ aus dezentraler Dampfreformierung von Erdgas, deutsche Randbedingungen

⁷⁹ entspricht Verbrauch des NEBUS BZ Busses, gemessen auf Esslingen Zyklus [47]

⁸⁰ Angabe vertraulich

Es zeigt sich, dass die Reduktion des Verbrauchs praktisch direkt proportional zum Primärenergiebedarf und den Emissionen des Lebenszyklusses ist. Die Reduktion der Platinbeladung hat hingegen keinen relevanten Einfluss auf die Lebenszyklusemissionen

6.3.2 Flottenszenario

Als Beispiel für ein aus Sicht der Flottenbetreiber interessantes Szenario, wird der Effekt der Variation der Busflottenzusammensetzung untersucht. Hierzu werden zwei alternative Busflottenzusammensetzungen analysiert. Die erste Variante repräsentiert die Busflottenzusammensetzung für das Jahr 2020, wie sie sich aus den statistischen Daten für Portugal aus Anhang D ergibt. Die zweite geht davon aus, dass die gesamte Flotte in Porto aus Brennstoffzellenbussen besteht, um den Einfluss eines vollständigen Technologiewechsels zu untersuchen. Beide Flottenzusammensetzungen sind in Abbildung 6.12 dargestellt.

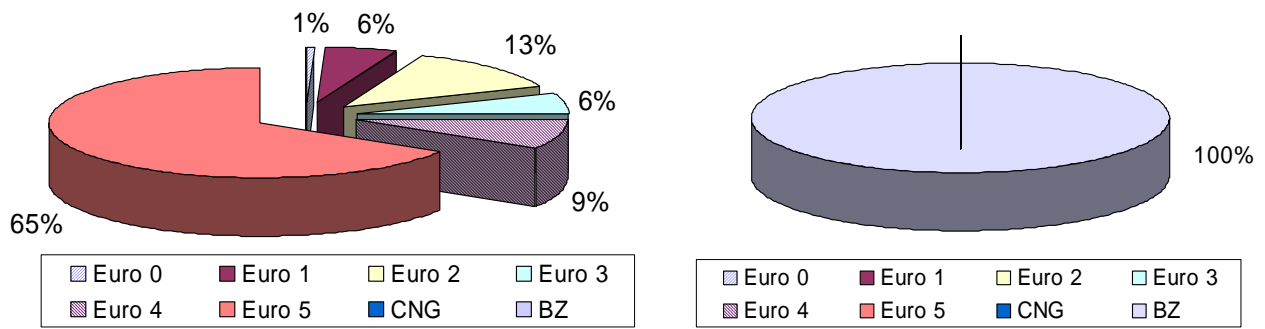


Abbildung 6.12 Flottenzusammensetzung Porto 2020 (links) und Porto BZ (rechts)

Die übrigen Randbedingungen werden beibehalten. Für die Wasserstoffbereitstellung werden wiederum zwei Alternativen ausgewählt, um die Bandbreite der Ergebnisse aufzuzeigen (siehe Abbildung 6.13).

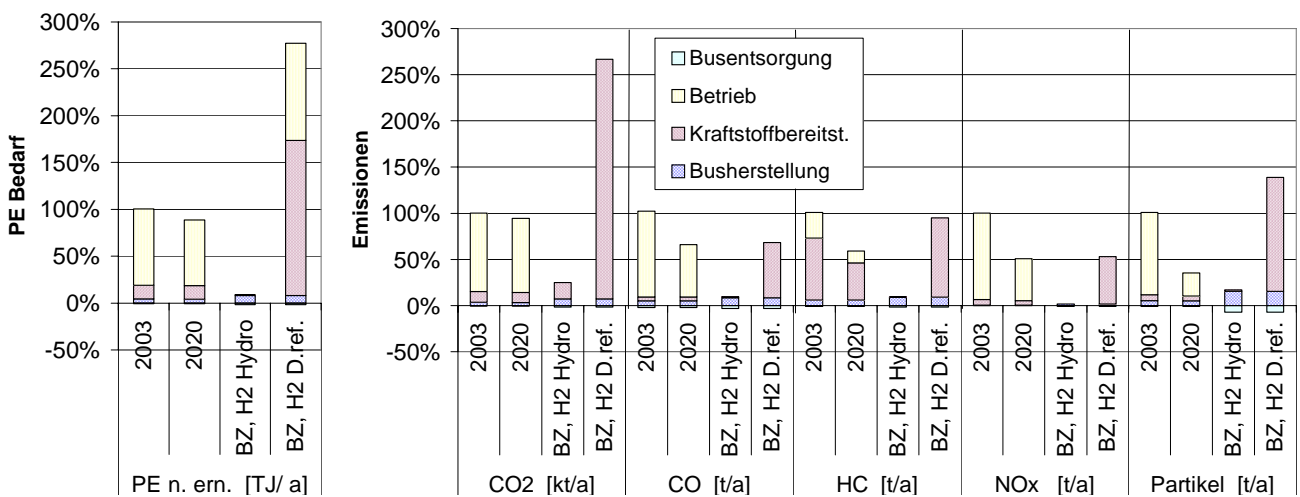


Abbildung 6.13 Relativer Vergleich des Primärenergiebedarfs und ausgewählter Emissionen, bezogen auf die Porto 2003 Flotte unter Berücksichtigung des Lebenszyklus

Der steigende Anteil an Fahrzeugen, die die strengeren EU Abgasnormen erfüllen, führt aus Lebenszyklussicht im 2020 Szenario zu einer Reduktion der limitierten Emissionen. Der Primär-

energiebedarf sowie die CO₂ Emissionen sinken geringfügig aufgrund nahezu unveränderter Systemwirkungsgrade. Für die Brennstoffzellentechnologie zeigt sich, dass sie, sofern aus erneuerbaren Ressourcen erzeugter Wasserstoff eingesetzt wird, im gegenwärtigen Entwicklungsstadium bereits einen Beitrag zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen des busbasierten ÖPNV leisten kann. Kommt aus nicht erneuerbaren Ressourcen produzierter Wasserstoff zum Einsatz, bedarf es deutlicher Effizienzsteigerungen, sowohl bei der Wasserstoffherstellung als auch beim BZ Bus.

6.4 Sensitivitätsanalyse und Fehlerabschätzung

Wie die Ergebnisse der Beispiele in Kapitel 6.1 und 6.1.5 zeigen, hat der eigentliche Busbetrieb die größte Relevanz für die Lebenszyklusemissionen eines Nahverkehrsbussystems. Im Falle des BZ Busses gilt dies im selben Maße auch für die Kraftstoffbereitstellung (siehe Abbildung 6.13). Hier ist letztendlich die gewählte Ressource und damit die Herstellungsrouten des Wasserstoffs entscheidend.

Zunächst erfolgt eine Sensitivitätsanalyse für den Busbetrieb und die Kraftstoffbereitstellung. Aufgrund der guten Datenlage und der untergeordneten Relevanz für den Lebenszyklus wird auf eine Betrachtung der Fahrzeugherstellung und -entsorgung verzichtet.

Sensitivitätsanalyse

Die Einsatzbedingungen des Busses beeinflussen das Umweltprofil wesentlich. So kann derselbe Bus auf unterschiedlichen Routen mit unterschiedlichen Verkehrssituationen einen doppelt so hohen Verbrauch und fünfmal höhere Emissionen aufweisen⁸¹. Im Falle des BZ Busses nimmt der Verbrauch mit sinkender Geschwindigkeit sogar um den Faktor 4 zu. Der Einfluss der Fahrbahnneigung liegt bezüglich Verbrauch und Emissionen mit Faktor 6 für Diesel und CNG in etwa gleich hoch⁸². Beim BZ Bus nimmt der Verbrauch dagegen um den Faktor 4 zu. Der Einfluss der Beladung ist deutlich geringer, er beträgt über alle drei Antriebstechnologien hinweg bis zu 50 % für den Verbrauch und die Emissionen⁸³.

Für die Kraftstoffbereitstellung ergeben sich die Abweichungen der im Modell verwendeten Datensätze in Abhängigkeit des Bereitstellungslandes bzw. der gewählten Herstellungsrouten.

Bei der Dieselpreparierung betragen die Variationen der untersuchten Emissionen, mit Ausnahme von SO₂ und die Kohlenwasserstoffe, maximal 50 %, bezogen auf EU 15. Im Falle des SO₂ ergibt sich aufgrund des noch sehr unterschiedlichen Anteils von Rauchgasentschwefelungsanlagen in den einzelnen europäischen Ländern ein Unterschied von bis zu 130 %. Eine

⁸¹ Vergleich Diesel Euro 1 Bus, Verkehrssituation HVS1 (Hauptverkehrsstraße) mit IO_Stopp+go, CO₂ und PM Emissionen, 0 % Steigung, 50 % Beladung

⁸² Vergleich Diesel Euro 0 Bus, -6 % mit +6 % Steigung, CO₂ und PM Emissionen, Verkehrssituation HVS1, 50 % Beladung

⁸³ Vergleich Diesel Euro 0 Bus, leer mit voll, CO₂ und NO_x Emissionen, Verkehrssituation HVS1, 6 % Steigung

ähnliche Schwankungsbreite weisen für Portugal die Kohlenwasserstoffemissionen aufgrund der Leckage- und Fackelverluste des vorwiegend im Mittleren Osten geförderten Erdöls auf.

Für CNG ergeben sich insgesamt niedrigere Abweichungen, die ebenfalls auf die unterschiedlichen Förderbedingungen in den Herkunftsländern des Erdgases und der Bereitstellung des für die Verdichtung eingesetzten Stromes (siehe auch Kapitel 5.4.2) zurückzuführen sind. Einzig bei den Methanemissionen weist die Erdgasbereitstellung für Deutschland rund doppelt so hohe Emissionen im Vergleich zu Portugal bzw. zum EU 15-Mix auf. Die Hauptursache hierfür ist in den Leckageverlusten während des Erdgastransportes von Sibirien nach Deutschland zu suchen.

Im Falle der Wasserstoffbereitstellung ist zunächst die Wahl der Herstellungsrouten entscheidend. Vergleicht man die in dieser Arbeit untersuchten Routen, so zeigen sich nur für die Wasserstoffherstellung aus Erdgas relevante Abweichungen in Abhängigkeit des Herstellungslandes. Diese ergeben sich analog zur CNG Bereitstellung aus der Erdgas- und Strombereitstellung und sind insgesamt etwas niedriger. Dies ist damit zu erklären, dass der erhöhte Stromverbrauch zur Kraftstoffbereitstellung und die damit verbundenen Emissionen gerade bei den Kohlenwasserstoffen die deutlichen Variationen der Erdgasbereitstellung teilweise ausgleichen. Sie liegen im Bereich von 20 % bis 80 %. Im Falle der SO₂ Emissionen weist Deutschland um rund 80 % niedrigere Emissionen als Portugal und EU 15 auf. Dies resultiert aus den sehr niedrigen SO₂ Emissionen während der Stromherstellung, die in Deutschland durch die extensive Verwendung von Rauchgasreinigungsanlagen erreicht werden.

Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass die Berücksichtigung der lokalen Einsatzbedingungen, sowohl für den Busbetrieb als auch für die Kraftstoffbereitstellung zu sehr unterschiedlichen und wesentlich differenzierteren Ergebnissen führt. Zur Abschätzung der Streubreite der Ergebnisse aufgrund möglicher Datenungenauigkeiten in den einzelnen Modulen erfolgt noch eine Fehlerabschätzung. Sie wird analog zur Sensitivitätsanalyse für die Module Busbetrieb und Kraftstoffbereitstellung durchgeführt.

Fehlerabschätzung

Im Busbetrieb kann sich zunächst eine Abweichung ergeben, falls die im Modell für eine bestimmte Durchschnittsgeschwindigkeit hinterlegten Verbrauchs- und Emissionsdaten nicht dem tatsächlichen Kraftstoffverbrauch und den Emissionen entsprechen. Mit Hilfe eines Abgleichs der vom Modell errechneten Verbrauchswerte mit realen durchschnittlichen Verbrauchsdaten, z.B. einer Route, und gegebenenfalls einer Anpassung der im Modell gewählten Verkehrssituation kann die Abweichung in Grenzen gehalten werden. Für die direkt vom Verbrauch abhängigen Emissionen CO₂ und SO₂ wird eine Abweichung im Betrieb von $\pm 10\%$ erwartet. Für die anderen limitierten und nicht limitierten Emissionen wird ein höherer Wert angenommen, da diese doch sehr stark vom jeweils eingesetzten Bus bzw. Motor abhängen. Bei Dieselnissen liegt die Abweichung der limitierten Emissionen im Bereich $\pm 20\%$. Eine Ausnahme bildet CO. Hier ist die angenommene Abweichung im Bereich von 0 % bis -70% anzugeben (siehe Kapitel 5.6.4).

Für die weiteren im Modell berücksichtigten nicht limitierten Emissionen liegen keine Messdaten zum Abgleich vor. Daher wird hier von einer höheren Schwankungsbreite im Bereich $\pm 30\%$ ausgegangen.

Aufgrund der reduzierten Datengrundlage ist für CNG Busse, je nachdem welche Abgasnorm sie erfüllen, von größeren Schwankungsbreiten auszugehen. Gerade beim NO_x hat Kapitel 5.6.4 gezeigt, dass die Emissionswerte für einen EEV Bus um bis zu 80% überschätzt werden. Eine Unterschätzung ist unwahrscheinlich, weshalb von einer Abweichung von 0 bis $+80\%$ ausgegangen wird. Die Partikelemissionen eines Dieselmotors liegen nahe der Nachweisgrenze und können um $\pm 60\%$ schwanken. Die restlichen Emissionen werden mit einer Schwankungsbreite von $\pm 30\%$ angenommen, wobei die limitierten Emissionen HC und CO vergleichbar zum Diesel eher im Bereich $\pm 20\%$ anzusiedeln sind.

Beim BZ Bus ist zu berücksichtigen, dass das Verbrauchsmodell für einen speziellen BZ-Bus angepasst wurde. Die Schwankungsbreite wird mit $\pm 20\%$ abgeschätzt.

Für die Kraftstoffbereitstellung ist die Schwankungsbreite aufgrund der unterschiedlichen Datenqualität zur Energieträger- und Strombereitstellung aus den einzelnen Förder- und Abnehmerländern teilweise sehr unterschiedlich und damit recht schwierig abzuschätzen. Die Schwankungsbreite wird daher für den Primärenergiebedarf und die CO_2 Emissionen mit $\pm 20\%$ angenommen und für die limitierten und nicht limitierten Emissionen wird von einem Schwankungsbereich von generell $\pm 50\%$ ausgegangen.

Alles in allem sind für die Ergebnisse Schwankungsbereiche von 20 bis 90% zu beobachten. Dabei ergibt der Abgleich der Busbetriebsdaten in Kapitel 5.6.4 und der Vergleich der Kraftstoffbereitstellung mit Literaturwerten (siehe Tabelle 3.4) Abweichungen am unteren Ende des Bereiches. Die Ergebnisse sind also insgesamt aussagekräftig. Im Falle, dass tatsächlich gemessene Daten für den Busbetrieb vorliegen können diese verwendet werden zu Verifizierungszwecken mit den über das Modell berechneten Werten abgeglichen werden.

7 Zusammenfassung

Basierend auf dem Ansatz der Ganzheitlichen Bilanzierung wurde in dieser Arbeit ein modulares Instrumentarium zur technisch-ökologischen Analyse und Optimierung von Nahverkehrsomnibussystemen entwickelt. Ausgangspunkt ist das Problem, dass Bushersteller wie Busbetreiber den vollen Umfang der ökologischen Chancen und Risiken bekannter und neuer Busantriebstechnologien meist nicht oder nur unzureichend einschätzen können. Der Ansatz des Modells beruht auf der Analyse der vier wesentlichen Bestandteile des Lebenszyklus eines Bussystems, der Busherstellung, der Kraftstoffbereitstellung, dem Busbetrieb und schließlich der Busentsorgung. Anhand der quantitativen Ergebnisse aus dem Modell lassen sich die drei Antriebstechnologien Diesel, Erdgas und Brennstoffzelle ökologisch vergleichen. Die Szenariofähigkeit des entwickelten Modells erlaubt die Optimierung der Bussysteme. Ferner kann das Umweltprofil ganzer Busflotten in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung berechnet werden. Um eine praktische Anwendung zu ermöglichen wurde das Modell in MS-Excel und der Ökobilanzsoftware GaBi 4 umgesetzt und mit Messfahrten auf mehreren Strecken validiert.

7.1 Möglichkeiten und Grenzen

Mit dem entwickelten Modell können die Auswirkungen der Einführung und Nutzung eines neuen Bussystems, das einen anderen Energieträger, z.B. Erdgas oder Wasserstoff, und / oder ein neues Antriebskonzept, wie z.B. die Brennstoffzelle verwendet, bestimmt werden. Bisher war die Analyse von Bussystemen nur auf Basis einzelner Strecken oder Fahrten möglich, für welche Verbrauchs- und Emissionsdaten vorlagen. Dadurch hatte die Betrachtung einen statischen Charakter mit wenigen Freiheitsgraden. Die Verwendung und Integration existierender Busemissionsmodelle zur Berücksichtigung der relevanten Parameter des Betriebs, z.B. Topographie und Verkehrssituation, ermöglicht es, die Bussysteme unter unterschiedlichsten Einsatzrandbedingungen zu vergleichen, ohne dass zur Ermittlung der Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsdaten jedes Mal teure und aufwendige Messfahrten durchgeführt werden müssen.

Das Modell kann sowohl von Busbetreibern als auch von Busherstellern genutzt werden. Es ist flexibel und kann jederzeit um weitere Kraftstoffe und Antriebssysteme erweitert werden. Je nach Fokus der Analyse ist der Detaillierungsgrad der Modellierung von einzelnen Routen, über Routenmixe bis hin zum gesamten Streckennetz einer Stadt vom Anwender einstellbar. Neben der Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzbedingungen für den Busbetrieb wird die Kraftstoffbereitstellung länderspezifisch und routenspezifisch erfasst und ermöglicht noch differenziertere Aussagen zum Umweltprofil der Antriebssysteme bzw. der untersuchten Busflotten.

Mit der Erstellung von Szenarien kann das Modell vom Bushersteller entwicklungsbegleitend eingesetzt werden. So kann der Hersteller beispielsweise Zielwerte für alternative Antriebssysteme ermitteln, bei deren Erreichen die neue Technologie ökologisch wettbewerbsfähig mit der Referenztechnologie ist, oder er kann die Auswirkungen einer Maßnahme zur Verbrauchsreduk-

tion auf den gesamten Lebenszyklus bereits in der Entwicklungsphase analysieren. Die Berücksichtigung des Lebenszyklusses erlaubt es dem Bushersteller auch, Verschiebungseffekte zwischen den Lebenszyklusphasen zu bewerten. So führt z.B. der Einsatz von hochwertigen Materialien zum Zweck der Gewichtreduktion zu höheren Aufwendungen in der Busherstellung, die sich aber im Busbetrieb emissions- und energieseitig bei entsprechender Verbrauchsreduktion sehr schnell amortisieren können.

Gleiches gilt für den Busbetreiber. Auch er kann mit Hilfe von Szenarien Optimierungen des Umweltprofils seiner Busflotte durchführen. Ihm ist es zum Beispiel möglich, die Effekte einer veränderten Busflottenzusammensetzung, eines anderen Kraftstoffes bzw. einer anderen Kraftstoffbereitstellungsrouten oder den Einfluss einer veränderten Routenführung zu analysieren.

Hinsichtlich all dieser Fragestellungen können nun quantitative Aussagen getroffen werden, die nicht nur den Busbetrieb, sondern den gesamten Lebenszyklus des Bussystems berücksichtigen.

Bei der Ökobilanzierung von Bussystemen mit dem hier entwickelten Modell werden Daten benötigt, die bisher nicht unbedingt erhoben wurden. So sind jetzt Angaben zum Routenprofil, der Durchschnittsgeschwindigkeit etc. erforderlich. Dies erhöht den Aufwand der Datenbeschaffung, der aber durch die höhere Genauigkeit der Resultate gerechtfertigt wird. Sollten einzelne Daten nicht verfügbar sein, ist es möglich, über die hinterlegten Daten die Datenlücken, z.B. hinsichtlich Flottenzusammensetzung, oder Abhängigkeiten, wie etwa die Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeit aus Fahrplandaten, zu schließen. Somit muss nicht auf die Analyse verzichtet werden.

Hinsichtlich der Datengenauigkeit besteht vor allem für die Busbetriebsdaten des CNG Busses eine gewisse Unsicherheit, da die Werte nicht in einer vergleichbaren Detaillierungstiefe wie für Dieselbusse vorliegen. Aus diesem Grund findet für CNG Busse auch keine Unterteilung in Abgasnormen statt. Die Verbrauchsberechnungen für den BZ Bus gelten für den im Rahmen dieser Arbeit und der EU-Projekte CUTE und ECTOS eingesetzten BZ Bus. Die Übertragbarkeit auf andere BZ Busse ist kritisch zu prüfen. Generell gilt, dass eventuell verfügbare Messdaten zu Verbrauch und Emissionen den Modelldaten vorzuziehen sind.

7.2 Ausblick

Der Brennstoffzellenantrieb gehört sicherlich zu den faszinierendsten Technologien, die momentan im Fahrzeugbau entwickelt werden. Der Fortschritt in den letzten Jahren in diesem Bereich ist beeindruckend: Allein von 1994 bis 2000 konnte das Leistungsgewicht von 21 kg/kW auf ca. 1,2 kg/kW, bei deutlich verringerten Kosten gesteigert werden. Erste Veröffentlichungen aus dem asiatischen Bereich deuten bereits auf Leistungsgewichte von deutlich unter 1 kg pro kW. Im CUTE Projekt wurde die Lebensdauer der Stacks mit mehr als 3000 Stunden gemessen, ein Wert, der mehr als der Hälfte der Lebensdauer eines Pkw entspricht.

All diese Werte dürfen nicht hinwegtäuschen, dass noch signifikante Verbesserungen erzielt werden müssen, bevor die Brennstoffzelle zum wirklichen Wettbewerber der etablierten Antriebstechnologien im Transportsektor werden kann. Hier sind insbesondere zu nennen:

1. Die Lebensdauer der Brennstoffzellen im Verhältnis zum Diesel- bzw. Ottomotor (> 5000 h)
2. Deutliche Reduktion der Herstellkosten (Zielkosten ca. 50 €/kW)
3. Weitere Steigerung des Leistungsgewichts und damit Reduktion des Edelmetallanteils
4. Einsatzfähigkeit über einen Temperaturbereich von -40°C bis ca. 100°C

All diese Punkte sind von großem Interesse für die Automobilindustrie und sollten deshalb in einer weitergehenden Betrachtung ihren Niederschlag finden. Gerade die Lebensdauer und ein verbessertes Werkstoffgerüst könnten entscheidend sein für die spätere Wettbewerbsfähigkeit dieses neuartigen Antriebs.

Daneben bietet sich die Erweiterung des Modells um ökonomische Aspekte an, die zusätzlich zu den klassischen Anschaffungs- und Betriebskosten auch Emissionsvermeidungs- und Energieträgerbeschaffungskosten berücksichtigen sollte. Um die Bewertung von Bussystemen im Sinne der Ganzheitlichen Bilanzierung abzurunden, bietet sich die Erweiterung des Modells um ökonomische Aspekte an, die neben den klassischen Anschaffungs- und Betriebskosten auch Emissionsvermeidungs- und Energieträgerbeschaffungskosten berücksichtigen sollten.

Die Integration weiterer Kraftstoffe und Antriebstechnologien in das Modell, wie z.B. Biodiesel, -gas oder -ethanol und zukünftiger Abgasstandards, wie z.B. Euro 4 und 5, erlauben noch umfassendere Systemvergleiche und machen das Modell zukunftssicher.

Eine Vereinfachung der Eingabe der Streckencharakterisierungsdaten ist mit Blick auf eine einfachere Anwendung des Modells ein wichtiger Ansatzpunkt.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Genauigkeit des Modells bietet die Einarbeitung von detaillierteren Daten zum Betrieb von CNG Bussen, sobald diese verfügbar sind. Eine Anpassung der Wasserstoffverbrauchsdaten für BZ Busse der nächsten Generation steigert ebenfalls die Zuverlässigkeit des Modells.

Eine Übertragbarkeit des Modells auf schwere Nutzfahrzeuge im Allgemeinen ist mit entsprechenden Anpassungen der Nutzungsphasedaten machbar. Das Handbuch Emissionsfaktoren stellt analog zu den Nahverkehrsbussen spezifische Emissions- und Kraftstoffverbrauchswerte für unterschiedliche Nutzfahrzeugklassen mit Dieselantrieb zur Verfügung. Es können folglich mit der in dieser Arbeit beschriebenen Vorgehensweise Aussagen über das aktuelle und zukünftige Umweltprofil des gesamten Nutzfahrzeugverkehrs getroffen werden. So lassen sich beispielsweise die Umweltwirkungen einer möglichen Euro 6 Abgasstufe analysieren, indem die Emissionsreduktionen bezüglich der limitierten Schadstoffe eventuellen Mehraufwendungen bei der Herstellung für Antriebstrang und Abgasnachbehandlungsanlage sowie einem gegenüber

Euro 4 und 5 möglicherweise wieder erhöhten Kraftstoffverbrauch im Betrieb gegenübergestellt werden.

Mit Blick auf die Ergebnisse der Anwendungsbeispiele zeigt sich, dass im Falle der CNG- und vor allem der noch jungen BZ-Antriebstechnologie, im Vergleich zu dem seit mehr als hundert Jahren kontinuierlich weiterentwickelten Dieselantrieb, noch Effizienzsteigerungen erforderlich, aber auch möglich sind. So würde im Falle des BZ Busses u.a. ein verbessertes Wassermanagement in der Brennstoffzelle und ein durchgängiger Einsatz von elektrisch angetriebenen Nebenaggregaten, die direkt aus der Brennstoffzelle mit elektrischer Energie versorgt werden, nicht nur im Leerlauf Verbrauchsminderungen bringen. Weiterhin bietet sich aufgrund der Betriebscharakteristika von Nahverkehrsbussen mit häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen sowie relativ niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten eine Hybridisierung⁸⁴ des Antriebsstranges an. Unabhängig ob ein Diesel-, Erdgas- oder Brennstoffzellenantrieb eingesetzt wird, bietet die Hybridtechnologie ein signifikantes Reduktionspotential sowohl des Kraftstoffverbrauches als auch der Emissionen.

Eine Verbesserung der Energieeffizienz ist auch bei der Kraftstoffbereitstellung anzustreben, vor allem im Falle von dezentralen Wasserstoffherstellungsanlagen. Generell zeigt sich für den Kraftstoff Wasserstoff, dass die Art, Herkunft und die über den Wirkungsgrad des Herstellungsprozesses gesteuerte Menge des eingesetzten Energieträgers von entscheidender Bedeutung für das umweltliche Profil von wasserstoffgetriebenen Fahrzeugen ist. Wird der BZ Bus mit Wasserstoff aus erneuerbaren Ressourcen betrieben, zeigt sich bereits heute sein Potential, zur Ressourcenschonung und zur Verringerung der Luftemissionen des ÖPNV beizutragen. Das entwickelte Instrumentarium unterstützt Bushersteller wie Busbetreiber, die Nachhaltigkeit ihres wirtschaftlichen Tuns, z.B. durch gesteigerte Effizienz und verringerte Emissionen, zu verbessern und ihrer gesellschaftlichen Verantwortung gerecht zu werden.

⁸⁴ Unter Hybridisierung ist der zusätzliche Einsatz eines Energiespeichers (z.B. Batterie, Supercaps oder Schwungrad) zu verstehen, der es ermöglicht beispielsweise Teile der Bremsenergie zurück zu gewinnen und in Form von elektrischer Energie zunächst zu speichern und schließlich über einen (ggf. zusätzlichen) Elektromotor wieder als Antriebsenergie einzusetzen.

8 Literatur

- [1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Grünbuch – Hin zu einer europäischen Strategie für Versorgungssicherheit. KOM(2000)769. Brüssel, 2000.
- [2] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Weissbuch: Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft. KOM(2001) 370. Brüssel, 2001
- [3] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland. Umweltdaten Deutschland Online. Berlin, 2003. <http://www.env-it.de/umweltdaten/jsp/index.jsp>, letzter Zugriff am 25.9.2005.
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNWESEN (BMBF): Kraftstoff der Zukunft - Verkehrswirtschaftliche Energiestrategie, <http://www.bmwbw.de/artikel,-2458/Verkehrswirtschaftliche-Energi.htm>, besucht am 17.7.2005
- [5] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Bericht über das Programm Autoöl II. Mitteilung der Kommission KOM(2000) 626. Brüssel, 2000
- [6] KUCZERA, M.: Herstellung umweltfreundlicher Kraftstoffe bei der MiRO in Karlsruhe, VDI-GET Vortragsveranstaltung. Karlsruhe, 2003.
- [7] UMWELTBUNDESAMT: Abgasgrenzwerte für LKW und Busse. <http://www.umweltdaten.de/verkehr/gwltkzbus.pdf>. Daten & Fakten. Berlin, heruntergeladen am 11.1.2005
- [8] BARGENDE, M.: Fuel cell or internal combustion engine, will it really be an “or” in future powertrains. In: Proceedings, Volume 2. FOVUS - Networks for mobility. International Symposium . Stuttgart, 2002.
- [9] SCHLEY, F.: Urban transport strategy review. Experiences from Germany and Zurich. Studie im Auftrag der GTZ. Eschborn, 2001.
- [10] TRANSPORT 6 TRAVEL RESEARCH (TTR) (Hrsg.): The Urban Transport Benchmarking Initiative: Year One final report. Prepared for European Commission, DG TREN. Lichfield, 2004.
- [11] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT; NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (Hrsg.): Anspruchsvolle Umweltstandards im ÖPNV-Wettbewerb. Broschüre. Berlin, 2005.
- [12] BARTHEL, L.-P. et al.: Overview about the Fuel Cell Bus Demonstration programs CUTE, ECTOS & STEP. Hydrogen and Fuel Cells 2004 Conference and Trade Show. Toronto, 2004.

- [13] N.N.: CUTE & ECTOS Projekthomepage: www.fuel-cell-bus-club.com
- [14] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSBETRIEBE (VDV) (Hrsg.): VDV Statistik 2003. Köln, 2004.
- [15] EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.): European Union – Energy and Transport in figures 2004. Statistical pocket book 2004. Directorate-General for Energy and Transport. Brüssel, 2004
- [16] DAIMLERCHRYSLER: Midibus Mercedes-Benz Cito ist "Bus of the Year 2001". Top stories. <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-7153-49-9767-1-0-0-0-0-3882-7145-0-0-0-0-0-1,00.html>. Letzter Zugriff 30.8.2005.
- [17] SCHUCKERT, M.: CUTE – Clean Urban Transport for Europe – A major step towards cleaner urban transport. Forum für Zukunftsenergien e.V. (Veranst.): Hyforum 2004 (Beijing 2004) Berlin, 2004. – Tagungsband
- [18] BUNDESREGIERUNG: Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraftstoffen), 10. BImSchV(BImSchV 10 2004). Verkündet in BGBl I 2004, S. 1342. Berlin, 2004
- [19] EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.): Market development of alternative fuels. Report of the Alternative Fuels Contact Group. Brussels, 2003.
- [20] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Mitteilung an den Rat und das europäische Parlament: Abschlussbericht über das Grünbuch "Hin zu einer europäischen Strategie für Energieversorgungssicherheit". KOM(2002) 321. Brüssel, 2002
- [21] GABRIEL, R.: Optimierung der Metallzerspanung am Beispiel unterschiedlicher Schmierkonzepte – Ein Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation. Aachen : Shaker, 2004.
- [22] KRÜGER, R.: Systemanalytischer Vergleich alternativer Kraftstoff- und Antriebskonzepte in der Bundesrepublik Deutschland. Stuttgart, Universität, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Dissertation. Fortschritt- Berichte VDI, Reihe 12 – Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik, Nr. 499, Düsseldorf : VDI, 2002.
- [23] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Begriffsdefinitionen. VDI Richtlinien, Düsseldorf, 1996.
- [24] VOSS, A.: Systemtechnische Planungsmethoden in der Energiewirtschaft. Stuttgart, Universität, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Skript zur Vorlesung, 1997.

- [25] MEYER, M.: Operations Research/ Systemforschung – Eine Einführung in die praktische Bedeutung. 3. Aufl. Stuttgart : Fischer, 1990.
- [26] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, Grundlagen (Blatt 1). VDI Richtlinien, Düsseldorf, 1996.
- [27] BACCINI, P.; BADER, H.-P.: Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag, 1996
- [28] LEHRSTUHL FÜR SYSTEMANALYSE (Hrsg.): Jahresbericht 1998-99. Fachbereich Informatik. Dortmund, Universität, 1999. – Forschungsbericht
- [29] KOSTURIAK, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Wien : Springer, 1995.
- [30] WOHLGEMUTH, V.; PAGE, B.: Konzeptionelle Überlegungen zur Entwicklung eines Simulationswerkzeuges für den betrieblichen Umweltschutz. In: GRÜTZNER, R.; MÄHRING, M. (Hrsg.): Werkzeuge für die Modellierung und Simulation im Umweltbereich. Workshop, Koblenz, 1999 und Metropolis Verlag, Marburg, 1999, S. 33-46
- [31] EYERER, P. (Hrsg.): Ganzheitliche Bilanzierung. Berlin : Springer, 1996.
- [32] HARSCH, M.: Modellierung und Optimierung verfahrenstechnischer Prozesse in der Lackiertechnik - Beitrag zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation, 1998.
- [33] MÖLLER, A.: Grundlagen stoffstrombasierter betrieblicher Umweltinformationssysteme. Hamburg, Universität, Dissertation, 2000.
- [34] LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (Hrsg.): Betriebliche Energie- und Stoffstrommanagementsysteme: Methoden, Praxiserfahrungen, Software - eine Marktanalyse. Karlsruhe, 2000.
- [35] MÖLLER, A.; ROLF, A.: Methodische Ansätze zur Erstellung von Stoffstromanalysen unter besonderer Berücksichtigung von Petri-Netzen. In: SCHMIDT, M.; SCHORB, A. (Hrsg.): Stoffstromanalysen in Ökobilanzen und Öko-Audits. Berlin : Springer, 1995, S. 33-58.
- [36] HERRMANN, C.: Ökologische und ökonomische Bewertung des Materialrecyclings komplexer Abfallströme am Beispiel von Elektronikschrott – eine Erweiterung zur Ganzheitlichen Bilanzierung. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation. Aachen : Shaker, 2004. - ISBN 3-8322-2374-6
- [37] DEKORSY, T.: Ganzheitliche Bilanzierung als Instrument zur bauteilspezifischen Werkstoff- und Verfahrensauswahl. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation., 1993.

- [38] SCHUCKERT, M.: Ganzheitliche Bilanzierung – vom Bauteil zum System am Beispiel von Verkehrsträgern. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation., 1996.
- [39] BEDDIES, H.: Parametrisierte Lebenszyklusanalyse zur umweltlichen Optimierung eines Polyurethan wärmegeprägten Kühlschranks. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation., 1999.
- [40] PFLEIDERER, I.: Ein allgemeines Modell zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung von Produktlebenswegen. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation., 1998.
- [41] VOLZ, T.: Integration systematischer Analyse und Prognose in die ganzheitliche Bilanzierung – Instrumentarium zur rechnergestützten Modellierung. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation. Aachen : Shaker, 1999.
- [42] ISO 14040: Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework. Norm. 1997.
- [43] ISO 14041: Environmental management – Life Cycle Assessment – Goal and scope definition and inventory analysis. Norm. 1998.
- [44] ISO 14042: Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle impact assessment. Norm. 1999.
- [45] ISO 14043: Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle interpretation. Norm. 1999.
- [46] PEHNT, M.: Ganzheitlichen Bilanzierung von Brennstoffzellen in der Energie- und Verkehrstechnik. Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Dissertation. Fortschritt- Berichte VDI, Reihe 6 – Energietechnik, Nr. 476, Düsseldorf : VDI, 2002. - ISBN 3-18-347606-1
- [47] GÖNNER, K.: Untersuchung von Verbrauch und Emissionen des Mercedes Benz Brennstoffzellen Citaro mit konventionellen Antriebskonzepten unter realen Fahrbedingungen. Betreuer: M. Faltenbacher. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Diplomarbeit, 2004.
- [48] ILG, R.: Ökobilanz der Herstellungsphase eines Citaro Busses der Firma EvoBus – Betrachtung der Diesel, Erdgas- und Brennstoffzellenvariante. Betreuer: M. Faltenbacher. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Studienarbeit, 2004.

- [49] EUROPÄISCHE KOMMISSION: The Auto-Oil Programme – A report from the services of the European Commission, reported by the Directorates General for: Economic and Financial Affairs, Enterprise, Transport and Energy, Environment, Research and Taxation and Customs Union. Brüssel 2000
- [50] EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.): Integrated pollution prevention and Control (IPPC) – Reference Document on Best Available Techniques for Mineral Oil and Gas Refineries. Sevilla, 2003
- [51] MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND E.V. (Hrsg.): Mineralöl und Raffinerien. Ribbesbüttel, Saphir Druck und Verlag, 2003.
- [52] GARY, J.H.; HANDWERK, G.E.: Petroleum Refining – Technology and Economics. 4th Edition, Marcel Dekker Verlag, 2001.
- [53] SCHULLER, O.: Erstellung eines Raffineriemodells in der Ökobilanzsoftware GaBi. Betreuer: M. Faltenbacher. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Diplomarbeit, 2004.
- [54] EXXONMOBIL (Hrsg.): Erdöl und Erdgas: Suchen, Fördern, Verarbeiten. 14. Auflage, Weidemann Druck, Hamburg, 2002.
- [55] DEUTSCHE BP AG (Hrsg.): Das Buch zum Erdöl. 5. Auflage, 1989.
- [56] FALTENBACHER, M. et al.: CUTE Hydrogen supply infrastructure and fuel cell bus technology brochure. EvoBus GmbH (Hrsg.), Ulm, 2004.
- [57] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (Hrsg.): Electricity Information 2004. IEA Statistics. Paris, 2004.
- [58] ROBERT BOSCH GMBH (Hrsg.): Abgastechnik für Dieselmotoren. Gelbe Reihe, 1.Ausgabe. Plochingen, 2004
- [59] NIGGE, K.-M.: Life Cycle Assessment of Natural Gas Vehicles. Development and Application of Site-Dependence Impact Indicators. Springer Verlag Berlin, 2000
- [60] FALTENBACHER, M.; EYERER, P. et al.: Life Cycle Assessment in the CUTE, ECTOS & STEP projects – Environmental analysis of the hydrogen infrastructure. Hydrogen and Fuel Cell Futures Conference. Perth, 2004.
- [61] FALTENBACHER, M.; EYERER, P. et al.: Hydrogen supply in the CUTE/ ECTOS projects – An LCA comparison of different hydrogen supply routes (first results for electrolyser route). International German Hydrogen Energy Day. Essen, 2004.
- [62] ROBERT BOSCH GMBH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Ermittlung des Kraftstoffverbrauches nach DIN 70030. S. 328-329, 22. Auflage. Stuttgart, 1995

- [63] EMPA (Hrsg.): Nachführung der Emissionsgrundlagen des Straßenverkehrs, Ergänzungen der Messdaten. Messungen 01-02 Benzinpersonenwagen Euro-0 und Euro-3 sowie Dieselpersonenwagen Euro-2. EMPA-Bericht 202114. Bern, 2004
- [64] DRECHSLER, S. et al.: Möglichkeiten der Minderung von Schadstoffen bei Bussen. Landesanstalt für Umweltschutz (LfU), Baden Württemberg, Referat 33 – Luftqualität, Lärm, Verkehr. Karlsruhe 2000.
- [65] UMWELTBUNDESAMT: Umwelt und Verkehr;
<http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/techemissmm/technik/scr/scr.htm>. Besucht am 13.12.2004
- [66] HJS FAHRZEUGTECHNIK GMBH & CO KG: Modulares CRT® SYSTEM. CRT-Prospekt. <http://www.hjs.com>, heruntergeladen am 14.9.2004. Menden, 2004.
- [67] ROBERT BOSCH GMBH. <http://www.kraftfahrzeugtechnik-heute.de>. Website, besucht am 14.9.2004
- [68] DAIMLERCHRYSLER AG (Hrsg.): Hightech Report. Ausgabe 1/2004. Stuttgart, 2004
- [69] DAIMLERCHRYSLER AG: <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0,,0-5-8786-49-229051-1-0-0-0-0-0-428-7145-20050205-0-0-0-0-0-0,00>. Website, besucht am 9.2.2005
- [70] DEUTSCHE AVIA MINERALOEL-GMBH: AVIA – Markentreibstoffe.
<http://www.avia.de/tanken/markentreibstoffe.htm>. Besucht am 23.2.2005
- [71] EBERLE, R.: Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau. TU Berlin, Institut für Straßen und Schienenverkehr, Dissertation. Berlin, 2000.
- [72] KYRIAKIS, N. A. et al. : Methodologies for estimating air pollutant emissions from transport (MEET). Road traffic composition – Deliverable No.16 – Final/ updated version. LAT, Aristotle University of Thessaloniki. Griechenland, 1998.
- [73] KNÖRR, W.: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 2.1. Basisdaten Deutschland; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Ifeu). Heidelberg, 2003.
- [74] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): HAUSBERGER S. et al: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, TU Graz. Berlin, 2004
- [75] HICKMAN, J.: Methods of estimation of atmospheric emission from transport. European Scientist Network and scientific state-of-the-art action. COST 319 Final report. COST 319, funded by the European Commission. 1999
- [76] BERLINER VERKEHRSBETRIEBE, BVG: Umweltbericht 2000. Berlin, 2001.

- [77] N.N.: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz; KrW-/AbfG), BGBl I 1994, 2705. Bonn, 1994.
- [78] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (Hrsg.): Recyclingorientierte Produktentwicklung. VDI-Richtlinie 2243. VDI Verlag. Düsseldorf, 2002
- [79] EUROPÄISCHES PARLAMENT: Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte. Richtlinie 2002/96/EG. Luxemburg 2002
- [80] EUROPÄISCHES PARLAMENT: Richtlinie für Verpackungen und Verpackungsabfälle. Richtlinie 94/62/EG. Luxemburg, 1994.
- [81] EUROPÄISCHES PARLAMENT: Richtlinie für Altfahrzeuge. Richtlinie 2000/53/EG. Luxemburg, 2000
- [82] QUELLA, F.: Umweltverträgliche Produktgestaltung, Publicidis MCD, München, 1998
- [83] N.N.: GaBi 4.0 Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung, IKP, Universität Stuttgart und PE Europe GmbH, Echterdingen/Stuttgart, 2005.
- [84] GENERAL MOTORS (Hrsg.): Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/ vehicle systems – a European study. LBST GmbH. Ottobrunn, 2002.
- [85] CONCAWE, EUCAR, JRC: Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-to-wheel report. Version 1b, 2004.
<http://ies.jrc.cec.eu.int/Download/eh>, heruntergeladen am 17.7.2005
- [86] DREIER, T.: Ganzheitliche Systemanalyse und globale Potenzialanalyse biogener Kraftstoffe. TU München. Dissertation. Ife Schriftenreihe, Heft 42, E&M Verlag. Herrsching 2000.
- [87] L-B-SYSTEMTECHNIK GmbH: Vergleich verschiedener Antriebskonzepte im Individualverkehr im Hinblick auf Energie- und Kraftstoffeinsparung. Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen. Ottobrunn, 2002
- [88] SCHINDLER, J.: Life cycle analysis of hydrogen fuel, Vortrag auf First Hydrogen Energy Conference (EHEC) am 3.9.2003 in Grenoble. Ottobrunn, 2003.
http://www.hyweb.de/Wissen/pdf/H2-LCA_EHEC_Schindler_03SEP2003.pdf, heruntergeladem am 16.7.2005

- [89] DELUCCHI, M.: A lifecycle emissions model (LEM): life cycle emissions from transportation fuels, motor vehicles, transportation modes, electricity use, heating and cooking fuels, and materials -Documentation of methods and data. Main Report and Annexes. Report No. UCD-ITS-RR-03-17. Institute of Transportation Studies, University of California. Davis, 2003. <http://www.its.ucdavis.edu/publications/2003/UCD-ITS-RR-03-17-MAIN.pdf>
- [90] BEER, T.: Comparison of transport fuels. Final report (EV45A/2/F3C) to the AUSTRALIAN GREENHOUSE OFFICE on the Stage 2 study of Life-cycle Emissions Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles. CSIRO Atmospheric Research. Aspendale, 2004
- [91] LAMBRECHT, U. et al.: Bus, Bahn und Pkw auf dem Umweltprüfstand. Studie des Instituts für Energie- und Umweltforschung (Ifeu), gefördert durch den VCD im Rahmen des UBA Vorhabens 299 96 135. Heidelberg, 2001.
- [92] RÖDER, A.: Integration of Life Cycle Assessment and energy planning models for the evaluation of power trains and fuels. Swiss Federal Institute of Technology (ETH). Dissertation. Zürich, 2001.
- [93] UNNASCH, S. et al.: Refinement of selected fuel-cycle emissions analyses. Draft final report prepared by Arthur D. Little for California Air Resources Board. Final report FR-00-101. Mountainview, 2000.
- [94] GENERAL MOTORS (Hrsg.): Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - North American Analysis. Vol. 1-3. Detroit, 2001. <http://www.transportation.anl.gov/publications/transforum/v3n2/gapc.html>
- [95] WEISS, M. et al: Comparative Assessment of Fuel Cell Cars. Laboratory for Energy and the Environment, Massachusetts Institute for Technology (MIT). Report No. MIT LFEE 2003-001 RP. Cambridge, 2003
- [96] TOYOTA MOTOR CORPORATION (Hrsg.): Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions of automotive fuels in the Japanese context. Well-to-tank-report. Conducted in cooperation with Mizuho Information & Research Institute. Tokyo, 2004.
- [97] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (Hrsg.): Climate Change 2001: Synthesis Report. Technical summary of the working group 1. Geneva, 2001
- [98] PELKMANS, L. et al.: Emissions and fuel consumption of natural gas powered city buses versus diesel buses in real-city traffic. Flemish Institute for technological research (VITO). Mol, 2001.

- [99] PELKMANS, L. et al.: Influence of vehicle test cycle characteristics on fuel consumption and emissions of city buses. Flemish Institute for technological research (VITO). Mol, 2001.
- [100] HÖRDEGEN, H.; KRAMMER, T.: Emissionsvergleich von erdgasbetriebenen Bussen in realen und dynamischen Fahrzyklen. Automobil Technische Zeitung (ATZ) 102, 2000
- [101] IKONEN, M. et al.: Emission and fuel consumption measurement for transit buses running on gaseous fuels using a mobile measurement system. SAE Technical Paper, 2001-01-3638. Troy, 2001.
- [102] BRUNER, G. et al.: Vergleich der Abgas-Massenemissionen von Nahverkehrsbussen mit Flüssiggas- und Dieselmotor im realen Verkehr. Wien, 2001.
- [103] BEER, T. et al.: Life cycle emissions analysis of alternative fuels for heavy vehicles. CSIRO Atmospheric research project C/0411/1.1/F2 to the Australian Greenhouse Office. Sydney, 2000
- [104] INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR NATURAL GAS VEHICLES (IANGV) (Hrsg.): Nylund et al.: Exhaust Emissions from Natural Gas Vehicles. Report prepared for the IANGV Technical Committee. Auckland, 2000.
- [105] INSTITUT FÜR ZUKUNFTSSTUDIEN UND TECHNOLOGIEBEWERTUNG (IZT): Emissionsminderungspotentiale durch den verstärkten Einsatz von Erdgas in Berlin 1995-2020. Berlin, 1999.
- [106] SORENSEN, B.: Total life cycle assessment of PEM fuel cell car. Roskilde University, Energy & Environment group. Roskilde, 2005.
- [107] HAUSBERGER, S.: Simulation of Real World Vehicle Exhaust Emissions. VKM-THD Mitteilungen; Heft/Volume 82; Verlag der Technischen Universität Graz; ISBN 3-901351-74-4. Graz, 2003
- [108] SILVA, C. et al.: EcoGest - Numerical modelling of the dynamic, fuel consumption and tailpipe emissions of vehicles equipped with spark ignition engines. Urban Transport 2002 - Eighth International Conference on Urban Transport and the Environment for the 21st Century. Wessex Institute of Technology (Veranst.). Seville, 2002.
- [109] ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI: COPERT – Computer programme to calculate emissions from road transport. Official homepage: <http://vergenia.eng.auth.gr/mech/lat/copert/copert.htm>. Letzter Zugriff am 20.12.2004
- [110] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (Hrsg.): Mobile 6 Model. <http://www.epa.gov/otaq/mobile.htm>. Letzter Zugriff am 20.12.2004.

- [111] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Umwelt und Verkehr – Daten und Modelle.
<http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/datenundmodelle/emission/tremod/tremod.htm>.
 Letzter Zugriff am 20.12.2004.
- [112] LEUVEN, K.U.: TREMOVE, Transport and mobility, <http://www.tremove.org/index.htm>.
 Letzter Zugriff am 20.12.2004.
- [113] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (Hrsg.): GREET model,
<http://www.transportation.anl.gov/greet/>. Letzter Zugriff am 20.12.2004
- [114] WANG, M. et al.: A full fuel-cycle analysis of energy and emissions Impacts of transportation fuels produced from natural gas. Argonne National Laboratory (ANL).
 Chicago, 1999
- [115] CHOUDHURY, R.: Well-to-wheel analysis of energy use and greenhouse gas emissions of advanced fuel/ vehicle systems – A European study. Hart World Fuels Conference.
 Brussels, 2002.
- [116] DELUCCHI: GHG Emissions impacts of urban transport Systems. UNDP/ GEF fuel cell bus workshop April 2000. New York City, 2000.
- [117] PISCHINGER, R. et al.: Update of the emission functions for heavy duty vehicles in the handbook Emission Factors For Road Traffic. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, TU Graz. Graz, 2002.
- [118] FORSCHUNGSINSTITUT FÜR GERÄUSCHE UND ERSCHÜTTERUNGEN (FIGE):
 Auswertung des Fahrverhaltens von schweren Motorwagen. Arbeitsunterlage 15. Im Auftrag des BUWAL. Herzogenrath, 1995.
- [119] ZITTEL, W. et al: Der Einfluss von Wasserdampf auf das Klima - Birgt eine Wasserstoffenergiewirtschaft höhere Klimarisiken als die Verbrennung fossiler Energieträger?. ENERGIE, Jahrgang 45, Nr. 4, April 1994. Ottobrunn, 1994.
- [120] SIMON, W.: Energiebedarf und Schadstoffemissionen von Verkehrsmitteln.
 Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 37. JG. HEFT 4, 1987.
- [121] HAUSBERGER, S.: persönliche Mitteilung, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz. Graz, 8.3.2005.
- [122] FLEMISH INSTITUTE FOR TECHNOLOGICAL RESEARCH (VITO):
<http://www.emis.vito.be/AUTOVERBRUIK/index.asp?pageChoice=ZVAardgas&Bc=Brandstoffen>. Letzter Zugriff am 12.10.2005.
- [123] CERWENKA, P. et al.: Anwendungsorientierte Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Kraftfahrzeugverkehrs in Deutschland für die Neufassung der RAS-W (EWS). Straßenverkehrstechnik, 41(1997), Heft 1, S. 17-25. Kirschbaum Verlag. Bonn, 1997

- [124] PROCTER, M.: persönliche Kommunikation zur Berechnung des Wasserstoffverbrauchs in einem BZ Citaro Bus. Vancouver, 29.11.2003
- [125] ALBRECHT, S.: Erstellung eines Modells zur umweltlichen Bewertung der Nutzungsphase von Diesel-, Erdgas- und Brennstoffzellenbussen im ÖPNV. Betreuer: M. Faltenbacher. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Diplomarbeit, 2004.
- [126] PUCHER, E.: Neue Abgasgrenzwerte und Zertifizierungsmethoden für schwere Nutzfahrzeuge. Studie des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, TU Wien. Wien, 2003.
- [127] INTERNATIONAL UNION OF PUBLIC TRANSPORT (UITP): SORT – Standardised On Road Test cycles. Broschüre. Brüssel, 2003.
- [128] HERRMANN, C. et al.: Results of Life Cycle Assessments of Electronic Car Appliances Using Flexible Models for Products and Components. ATT/SAE Conference. Barcelona, 2001
- [129] UNITED NATIONS (Hrsg.): Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change. Kyoto, 1997
- [130] SCHÖCH, H. et al.: LCA Based Design for Environment in the Automotive Industry, Total Life Cycle Conference and Exposition, 26 - 28 April 2000. Detroit 2000.
- [131] ARBEITSGEMEINSCHAFT ALTAUTO : <http://www.arge-altauto.de/index.php>, letzter Zugriff 1.9.2005.
- [132] BUNDESREGIERUNG: Gesetz über die Entsorgung von Altfahrzeugen. BGBl. I S.2199. Bonn, 2002.
- [133] SCHÄPER, S.: Umsetzung des Recyclinggedankens bei Audi und kritische Auswirkungen der EU-Altautodirektive. Vortrag, 9. Kunststoffrecycling Kolloquium der Fraunhofer Gesellschaft. Krefeld, 2000.
- [134] STAHL INFORMATIONSZENTRUM (Hrsg.): Ultra Light Steel Body - Projekt zur Entwicklung einer ultraleichten Stahlkarosserie. Broschüre. Heruntergeladen unter http://www.stahl-info.de/stahl_im_automobil/ultraleicht_stahlkonzepte/ulsab/ulsab-broschuere.pdf am 1.9.2005
- [135] LEHRSTUHL FÜR PRODUKTENTWICKLUNG: ProMeKreis – Projekt zur recyclinggerechten Produktentwicklung. Gefördert durch das BMBF. TU München. München, 2000
- [136] VERBAND KUNSTSTOFFERZEUGENDE INDUSTRIE e.V. (VKE) (Hrsg.): Kunststoff im Automobil – Einsatz und Verwertung. Frankfurt, 2000.

- [137] MERCEDES BENZ: Mercedes-Benz S-Klasse - Erstes Auto mit Umwelt-Zertifikat. Artikel. <http://www.autosieger.de/article6916.html>, letzter Zugriff 2.9.2005
- [138] PAPASAVVA, S. et al.: Development of Recycling Guidelines for PEM fuel cell systems. SAE paper no. 2003-01-1141. 2003 SAE World Congress. Detroit, 2003.
- [139] HANDLEY, C. et al.: Impact of the European Union vehicle waste directive on end-of-life options for polymer electrolyte fuel cells. Journal of Power Sources, 106, (1–2), 344–352. 2002.
- [140] SCHWEIMER, G. et al.: Sachbilanz des Golf A4. Volkswagen AG. Wolfsburg, 2000.
- [141] DAIMLERCHRYSLER (Hrsg.): Werkstoffauswahl mit Weitsicht – Ökobilanz der neuen A-Klasse. In: Hightech Report, 2/2004. Stuttgart, 2004.
- [142] KRÖMER, S. et al.: Life Cycle Assessment of a car tire. Continental AG. Hannover, 1999.
- [143] CARLI, G. et al: Life cycle design management in the automobile sector –A framework. Chainet - European network on chain analysis for environmental decision support. Leiden, 1999.
- [144] EIDGENÖSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE (ETH) (Hrsg.): Ökoinventare für Energiesysteme. Institut für Energietechnik. Zürich, 1997.
- [145] ÖKOINSTITUT (Hrsg.): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS). Version 4.2. Freiburg, 2004.
- [146] SÖLDNER, F. X.: European Commission Activities on Alternative Fuels. Presentation in HYPNET Workshop „European Hydrogen Competence Centres“ on June 8th 2004. Brüssel, 2004.
- [147] FALTENBACHER, M.; EYERER, P. et al.: Untersuchung und Bilanzierung des CO₂-Emissions-Trade-Offs für direkteinspritzende Otto und Dieselmotoren für Pkw und Nfz. 20. Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung "Kraftstoffe und Antriebe der Zukunft - Synergien für eine nachhaltige Zukunft", 3.-5. Dezember 2003. Wolfsburg, 2003.
- [148] MINERALÖL WIRTSCHAFTSVERBAND e.V. (MWV) (Hrsg.): Mineralölzahlen 2003. Saphir Verlag. Ribbesbüttel, 2004.
- [149] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (Hrsg.): Oil Information 2004. IEA Statistics. Paris, 2004.
- [150] RANKE, H. et al.: Hydrogen Production Technology – Status and development. Oil Gas European Magazine, 02/2004. Hamburg, 2004
- [151] LINDE (Hrsg.): Algen liefern Treibstoff. Linde Technologie – Berichte aus Wissenschaft und Technik 01/2005. Wiesbaden, 2005.

- [152] N.N: Ullmanns Enzyklopädie der Industriellen Chemie. Hydrogen. Volume A 13, 5th edition. Wiley-VCH Verlag. Weinheim, 1997.
- [153] STRAUSS, K.: Kraftwerkstechnik. Springer-Verlag. 4. Auflage. Berlin, 1998.
- [154] BAITZ, M. et al.: Vergleichende Ökobilanz von SunDiesel (Choren Verfahren) und konventionellem Dieseldieselkraftstoff. Im Auftrag der Volkswagen AG und DaimlerChrysler AG. Echterdingen, 2004.
- [155] HAUSBERGER, S.: Messung von Verbrauch und Emissionen an zwei Nahverkehrsbussen im Auftrag der EvoBus GmbH. Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH. Bericht Nr. FVT-08/05 Haus Em 2004/26-6770. Graz, 2005.
- [156] ERICSON, E.: Variability in Exhaust emission and fuel consumption in urban driving. Institution of Technology and Society, Lund University. Lund, 2000.
- [157] FALTENBACHER, M.; EYERER, P. et al. : Environmental analysis of hydrogen for fuel cell powered buses, VDI Nutzfahrzeugtagung 2001. Neu-Ulm, 2001.
- [158] FALTENBACHER, M. et al.: Life Cycle Assessment of 3 bus systems. Deliverable 5, in Vorbereitung. EU Projekt CUTE, gefördert durch die DG TREN der Europäischen Kommission. Stuttgart, 2005.
- [159] FALTENBACHER, M. et al.: LCA of FC bus system in Reykjavik. Deliverable 16. EU Projekt ECTOS, gefördert durch die DG RESEARCH der Europäischen Kommission. Stuttgart, 2005.
- [160] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (Hrsg.): Electricity Information 2004. IEA Statistics. Paris, 2004.
- [161] AEA TECHNOLOGY (Hrsg.): Platinum and hydrogen for fuel cell vehicles. Report for the Department of Transportation, UK. Harwell, 2002.
- [162] SCHMID, H.P.: Onsite Wasserstoffherzeugung – Innovationsschub mit FLOX-Dampfreformern. Gaswärme International (54), Nr. 1/2005, S. 35-37.
- [163] ARNDT, U.: Wasserstoff. Kapitel 6.11, in *Der Energieberater*. Band 3. 63. Ergänzungslieferung. Deutscher Wirtschaftsdienst Verlag. Unterschleißheim, 2003.
- [164] GONCALVES, G. et al.: Fuel cell and diesel bus drive cycles – effect on fuel consumption. Instituto Superior Tecnico. 8th CUTE/ ECTOS/ STEP meeting. Reykjavik, 2005.
- [165] HARALDSON, K.: On Direct Hydrogen Fuel Cell Vehicles - Modelling and Demonstration Doctoral Thesis. KTH- Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes. Stockholm, 2005.

- [166] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (Hrsg.): Fuel Cell Handbook. 6th Edition. DOE/NETL-2002/1179. EG&G Technical Services, Inc. Contract No. DE-AM26-99FT40575. Morgantown, 2002.
- [167] FALTENBACHER, M.: Ganzheitliche Bilanzierung von Wasserstoff und Methanol als Treibstoffe für brennstoffzellenbetriebene Omnibusse. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Diplomarbeit, 1999.
- [168] KRÜGER, R. et al.: Perspektiven von Wasserstoff als Kraftstoff im öffentlichen Straßenpersonenverkehr von Ballungsgebieten und von Baden-Württemberg. Stuttgart, Universität, Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung. Studie im Auftrag der Energie Baden-Württemberg AG und DaimlerChrysler AG, 2001.
- [169] UEBERHORST, S.: Energieträger Erdgas: Exploration, Produktion, Versorgung. Verlag Moderne Industrie, Die Bibliothek der Technik, Band 194. München, 1999.
- [170] TU GRAZ 2003: Emission functions for heavy duty vehicles. Update of the emission functions for heavy duty vehicles in the Handbook Emission Factors for Road Traffic. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik. Technische Universität Graz, 2003.
- [171] HEUSCH-BOESEFELDT ET AL.: Untersuchungen des repräsentativen Fahrverhaltens von Pkw auf Stadt- und Landstraßen; TÜV Rheinland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Köln, 1993
- [172] N.N.: Projekt Schadstoffe - Schwerpunkt Verkehr. Schulbuchverlag öbvht, Wien. <http://www.hpt.co.at/chemie/verkehr/index.html>. Letzter Zugriff am 9.10.2005.
- [173] HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, HLUGS: Informationen zu Luftschadstoffen. <http://www.hlug.de/medien/luft.htm>. Letzter Zugriff am 15.02.2005
- [174] WACHTER, W. et al.: Die Umweltrelevanz des Dieselmotors. Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik. Technische Universität Graz. 2004.
- [175] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: www.epa.gov/lead. Washington. Letzter Zugriff am 15.02.2005
- [176] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL): PM10 – Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Maßnahmen. Abteilung Luftreinhaltung. Bern, 2001.
- [177] TEIXEIRA, R.: persönliche Mitteilung Leiter Busbetrieb, Sociedade de Transportes Colectivos do Porto, S.A., STCP. London, 15.6.2004.
- [178] LECHTENBÖHMER, S. et al.: Treibhausgasemissionen des russischen Erdgas-Exportpipeline-Systems. Wuppertal Institut im Auftrag der E.ON Ruhrgas AG. Wuppertal, 2005.

- [179] RUDLOFF, M.: Biomass-to-Liquid (BtL) - Made by CHOREN. Belgrader EAEC Kongress. Belgrad, 2005
- [180] ZWART, R.W.R. et al.: High efficiency co-production of substitute natural gas (SNG) and Fischer Tropsch (FT) transportation fuels from biomass. 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Rome, 2004.
- [181] DVGW (Hrsg.): Technische Regel Arbeitsblatt G 260 - Gasbeschaffenheit. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn, 2000.
- [182] SCHMEER, F. et al.: Entwicklung eines schwefelfreien Odorierungsmittel - Aktueller Stand. gwf-Gas/Erdgas 142 (2001) Nr. 11, S. 779-784.
- [183] EUROPEAN COMMISSION: Clean urban transport. DG TREN.
http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/cut_en.html. Letzter Zugriff 12.10.2005.
- [184] ILG, R.: Life cycle assessment of the hydrogen infrastructure in Western Australia. Betreuer: M. Faltenbacher. Stuttgart, Universität, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Diplomarbeit, 2005.
- [185] SCHUCKERT, M.: Persönliche Information. EvoBus GmbH, Mannheim, 28.10.2005
- [186] ALLY, J.: Methods and procedures for the calculation of fuel economy on P5-1 fuel cell engines. Interner Bericht. Ballard Power Systems. Vancouver, 2003
- [187] L-B-SYSTEMTECHNIK GmbH: www.h2cars.de. Homepage. Letzter Zugriff 17.11.2005
- [188] OSKARSDOTTIR, G. et al.: Well to wheel analysis. Environmental Evaluation, ECTOS Final Report, Part 2. Deliverable No. 14. IceTec. Reykjavik, 2005.
- [189] LEBUS, S.: Recycling of production material in the commercial stack plant. Commercial plant study. Internal report. DaimlerChrysler AG. Nabern, 1999.

Anhang A Antriebstechnologien

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Antriebstechnologien für Linienbusse untersucht: Brennstoffzellenantrieb als neueste Entwicklung (eingesetzt in Flottentests u.a. im Rahmen des CUTE-Projekts), Dieselantrieb als Stand der Technik, Erdgasantrieb als Alternative zum Diesel. Die einzelnen Antriebstechnologien werden anhand konkreter Fahrzeuge vorgestellt. Dabei wurden Fahrzeuge eines Herstellers (EvoBus) gewählt, da alle Fahrzeuge, bis auf den NEBUS als erster Brennstoffzellenbus Prototyp der DaimlerChrysler AG, auf demselben Fahrzeuggrundkonzept basieren und damit eine gute Vergleichbarkeit gegeben ist. Die allgemeinen Erläuterungen zur Technologie gelten selbstverständlich genauso für Fahrzeuge anderer Hersteller.

Anhang A.1 Brennstoffzellenbus

Basierend auf einem dreitürigen Dieselbus der Baureihe O 530 (genannt Citaro) wurde der Brennstoffzellen-Citaro entwickelt.



Abbildung A.1: Brennstoffzellenbus (BZ-Citaro) der Firma EvoBus

Im Gegensatz zu seinem Vorgänger NEBUS (siehe Anhang A.4) handelt es sich hier nicht um eine komplette Neuentwicklung, vielmehr wurde versucht, mit möglichst wenigen Änderungen des Serienfahrzeuges die Brennstoffzellentechnologie im Antrieb zu implementieren. Damit soll eine größtmögliche Zuverlässigkeit und eine möglichst geringe Zahl an Spezialteilen erreicht werden, um die Herstellungs- und Betriebskosten niedrig zu halten.

Aufbau des Brennstoffzellenbusses

In Abbildung A.2 ist das Layout des BZ-Citaros inklusive der Aufteilung des Innenraums und der Position der wichtigsten Antriebskomponenten dargestellt.

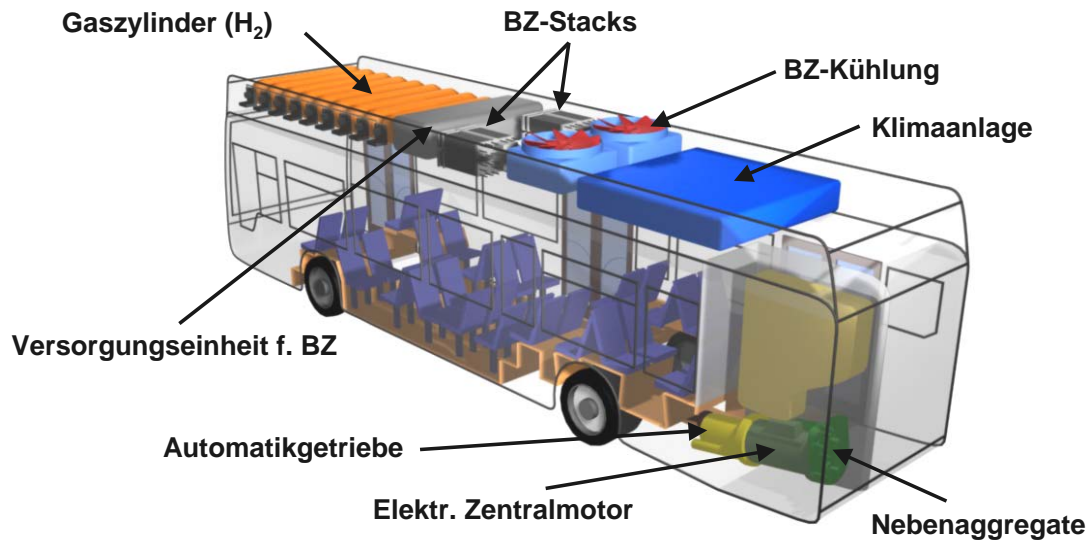


Abbildung A.2: Layout des BZ-Citaro

Der Rohbau des Citaros wurde insbesondere im Dachbereich verstärkt, um die Wasserstoffspeicher und Brennstoffzellenstacks aufnehmen zu können. Sämtliche wasserstoffführenden Komponenten wurden bewusst auf dem Dach angebracht, um das Risiko einer Beschädigung bei einem Unfall zu minimieren und im Falle eines Lecks keinen austretenden Wasserstoff in den Fahrgastraum gelangen zu lassen. Gasförmiger Wasserstoff ist bekanntlich leichter als Luft und entweicht nach oben.

Durch die Dachaufbauten und dem dadurch erhöhten Schwerpunkt ergibt sich außerdem die Notwendigkeit einer Fahrwerksanpassung. Bei dieser Aufgabe konnten die Erfahrungen von den Erdgasbussen, die ebenfalls einen Dachaufbau haben, genutzt werden.

Die neun Druckbehälter können ein Volumen von 1845 l aufnehmen. Das entspricht bei einem Nenndruck von 350 bar und einer Temperatur von 15°C ca. 44 kg Wasserstoff. Laut Hersteller wird damit eine Reichweite von ca. 200 km erzielt. Die elektrische Energie wird von den zwei Stackmodulen erzeugt, für deren Betrieb verschiedene periphere Systeme wie Pumpen, Wärmetauscher, Filter etc. nötig sind. Die Kühlung der Stacks erfolgt durch zwei hydraulisch angetriebene Lüfter auf dem Dach.

Weitere Komponenten des Antriebsstranges wie Elektromotor, Getriebe, Gelenkwelle und mechanische Hinterachse sind im Heckbereich des Busses untergebracht (siehe Abbildung A.3).

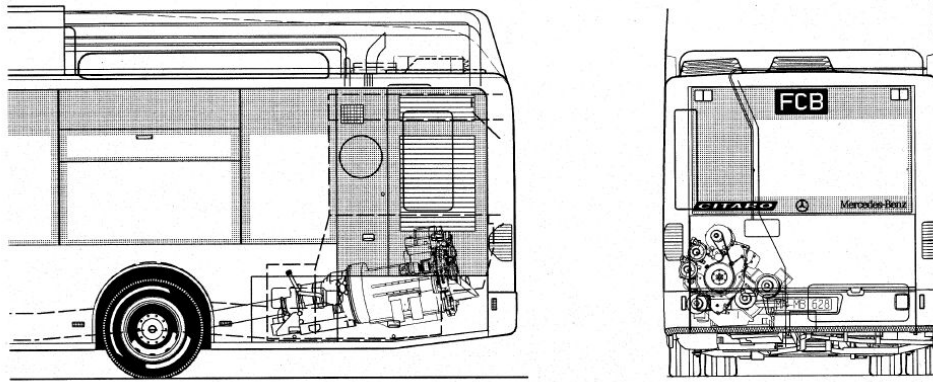


Abbildung A.3: Antriebsstrang des BZ-Citaro

Die wichtigsten Daten des BZ Citaro sind gemeinsam mit den Daten des Diesel- und CNG Busses in Tabelle A.3 aufgeführt.

Die Brennstoffzellentechnik

In diesem Kapitel soll nur kurz auf die Funktionsweise der Brennstoffzelle eingegangen werden, da diese Thematik schon Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen und Vorträge war. Eine gute Einführung findet sich z.B. in [166]. Beim im BZ-Citaro eingesetzten Brennstoffzellentyp handelt es sich um die sogenannte PEMFC⁸⁵, anhand derer im Folgenden das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle erläutert wird [21].

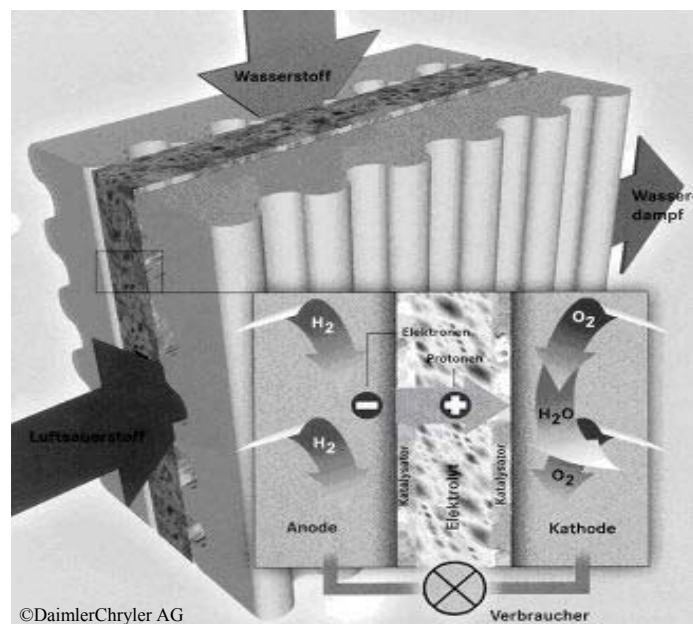


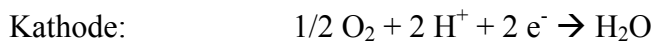
Abbildung A.4: Funktionsprinzip der PEM Brennstoffzelle

In der PEMFC werden die Brennstoffe Wasserstoff und Sauerstoff sowie Elektronen durch einen nur für positiv geladene Wasserstoffprotonen durchlässigen Elektrolyten getrennt. An der Anode

⁸⁵ PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

werden die Wasserstoffmoleküle an einer katalytischen Schicht, in der Regel Platin, oxidiert und in zwei positiv geladene Protonen (H^+) und zwei negativ geladene Elektronen (e^-) zerlegt. Die aus dem Wasserstoff entstehenden Protonen wandern aufgrund des unterschiedlichen elektrochemischen Potentials durch den Elektrolyten hindurch und reagieren auf der Kathodenseite mit dem Reaktionspartner Sauerstoff. Die Elektronen bleiben zurück, laden die Anode negativ auf und stellen durch diesen Elektronenüberschuss den Minuspol dar. An der Kathode nehmen die durch den Katalysator angeregten Sauerstoffatome Elektronen auf und werden zu O^{2-} -Ionen reduziert. Daraus resultiert ein Elektronenmangel an der Kathode und macht diese zum Pluspol.

In einer mit H_2 und O_2 betriebenen PEMFC ergeben sich folgende Elementarreaktionen:



Die sich zwischen Kathode und Anode aufbauende Spannung kann zur Versorgung eines elektrischen Verbrauchers genutzt werden. Durch eine Reihenschaltung mehrerer Einzelzellen (mit einer Leerlaufspannung von jeweils ca. 0,9 - 1,23 V je nach Gaszusammensetzung) erhält man höhere Spannungen und Leistungen, wie sie für technische Anwendungen benötigt werden. Bei einer derartigen Anordnung spricht man von einem Stack. Abbildung A.5 zeigt den Aufbau eines solchen Stacks. Im BZ-Citaro bestehen die beiden Stacks aus jeweils 960 Zellen.

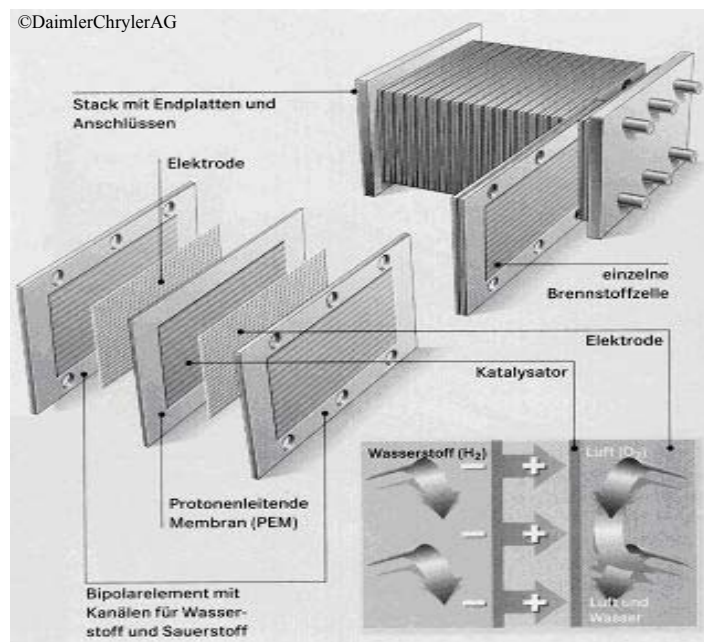


Abbildung A.5: Aufbau eines Brennstoffzellenstacks

Der thermodynamische Wirkungsgrad wird bei der Brennstoffzelle wie folgt definiert:

$$\eta_{therm} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H}$$

Dabei ist T die Temperatur, ΔG die freie und ΔH die gesamte Reaktionsenthalpie, ΔS ist die Entropie. Damit ist der erreichbare Wirkungsgrad, anders als bei Wärmekraftmaschinen, nicht durch den Carnot-Faktor begrenzt (siehe Abbildung A.6). Bei Wärmekraftmaschinen, wie sie u.a. auch in Diesel- und CNG-Bussen eingesetzt werden, ist der thermodynamische Wirkungsgrad (Carnot-Wirkungsgrad) wie folgt definiert:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Dabei sind T_2 und T_1 die Temperatur der Wärmequelle und der Umgebung.

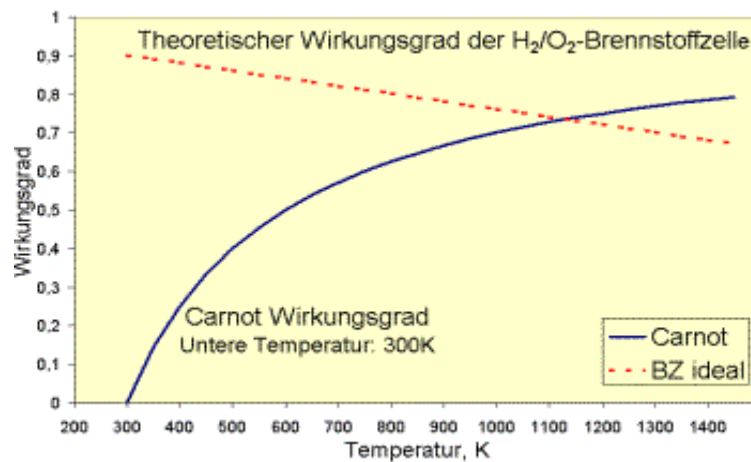


Abbildung A.6: Wirkungsgrade von Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor im Vergleich [167]

Anhang A.2 Dieselbus

Busse mit Dieselmotor haben im Bereich Linienbusse derzeit einen Marktanteil von ca. 98 % [14] und stellen damit die Referenztechnologie dar. Ein Dieselbus hat in der Normalversion mit 12 m Länge (kein Gelenkbus), wie in Abbildung A.7 gezeigt, eine Beförderungskapazität von bis zu 100 Passagieren. Die technischen Merkmale sind in Tabelle A.3 aufgeführt.



Abbildung A.7: Diesel-Citaro von EvoBus

Dieselmotor

Dieselmotoren werden überwiegend mit direkteinspritzenden Motoren nach dem Common-Rail-Prinzip ausgerüstet. Der von einer Pumpe auf ca. 1350 bar verdichtete Dieseldieselkraftstoff wird über Magnetventile sehr präzise auf die einzelnen Zylinder dosiert. Dabei wird zur Versorgung aller Zylinder eine Kraftstoffleitung (= Common Rail) verwendet [23]. Aufgrund gesetzlicher Vorschriften bei Nutzfahrzeugen müssen pro Tonne zulässiges Gesamtgewicht mindestens 4,4 kW Leistung eingebaut sein. Bei Bussen liegt die verbaute Motorleistung je nach Ausführung des Fahrzeugs in der Regel zwischen 175 und 300 kW.

Grundsätzlich erfolgt beim Dieselmotor die Gemischbildung im Zylinder, bevor es durch hohe Kompression zur Selbstzündung gebracht wird. Daraus ergibt sich das für den Dieselmotor charakteristisch hohe Drehmoment bereits bei niedrigen Drehzahlen, das über ein breites Drehzahlband relativ konstant bleibt. Aus diesen Gründen eignet sich der Dieselmotor besonders gut für den Einsatz im Linienbus. Er hat sich hier seit Jahrzehnten bewährt und ist wegen der niedrigen Betriebskosten die wirtschaftlichste Alternative beim Antrieb von Linienbussen. Auf technischer Seite werden vor allem in folgenden Bereichen weitere Fortschritte erzielt, um den Schadstoffausstoß des Dieselmotors in den nächsten Jahren weiter zu reduzieren: Eine höhere Kraftstoffqualität (schwefelarm), verbesserte Motoren und eine wirkungsvolle Abgasnachbehandlung [24]. Durch verbesserte technische Maßnahmen ist eine Reduzierung der CO₂-Emissionen und damit des Verbrauchs um weitere 20-25 % zu erreichen [25].

Um die aktuelle Euro 3 Abgasnorm zu erfüllen, kommen die meisten Dieselmotoren bisher ohne Abgasnachbehandlungssysteme aus. Mit Inkrafttreten der Euro 4 Norm ab 2005 werden derartige Systeme jedoch unabdingbar sein.

CRT – Continuously Regenerating Trap

Das CRT System ist eine Kombination eines Partikelfilters mit einem vorgeschalteten Oxidationskatalysator. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung A.8 dargestellt. Im Katalysator werden die Kohlenwasserstoffe und das Kohlenmonoxid oxidiert. Der abgeschiedene Ruß muss kontinuierlich aus dem Partikelfilter entfernt werden. Dies geschieht durch kontinuierliche Oxidation. Dazu wird in dem vorgeschalteten Oxidationskatalysator im Abgasstrom NO zu NO₂ oxidiert. Die Konzentrationserhöhung an NO₂ wird vom Hersteller HJS nicht näher angegeben, doch sie ist groß genug, die Kohlenstoffatome der Partikel kontinuierlich zu CO₂ zu oxidieren.

Eine wichtige Voraussetzung für das Funktionieren dieses sich kontinuierlich regenerierenden Rußfilters ist die Verwendung von Dieseldieselkraftstoff mit einem Schwefelgehalt von <10ppm. Die Verwendung von Dieseldieselkraftstoff mit höherem Schwefelgehalt kann zur Zerstörung des Partikelfilters und damit zur ungehinderten Partikelemission führen.

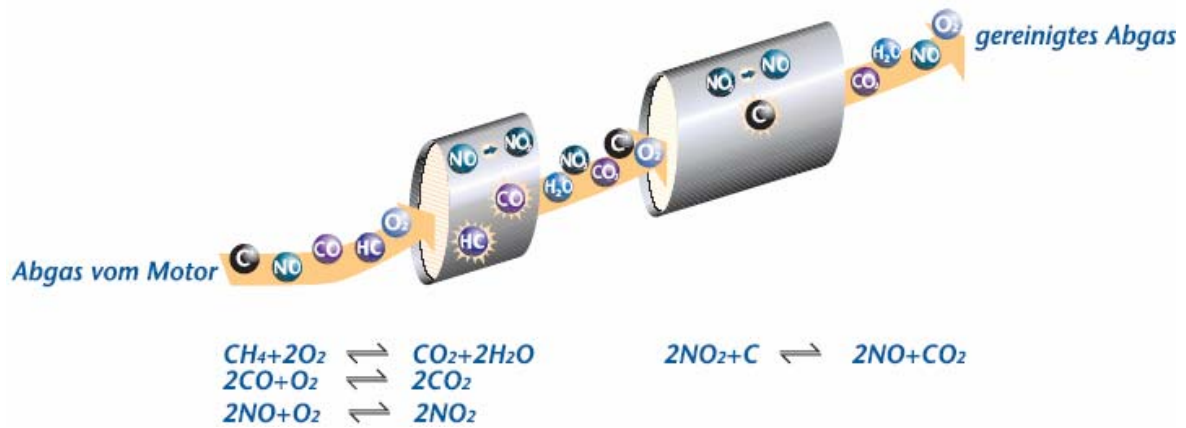


Abbildung A.8: Funktionsprinzip CRT [66]

Messungen haben laut [64] ergeben, dass das CRT-System die Partikelemission in sämtlichen Partikelgrößenklassen, insbesondere auch im Nanometerbereich, mengenmäßig um mehr als 90 % vermindert.

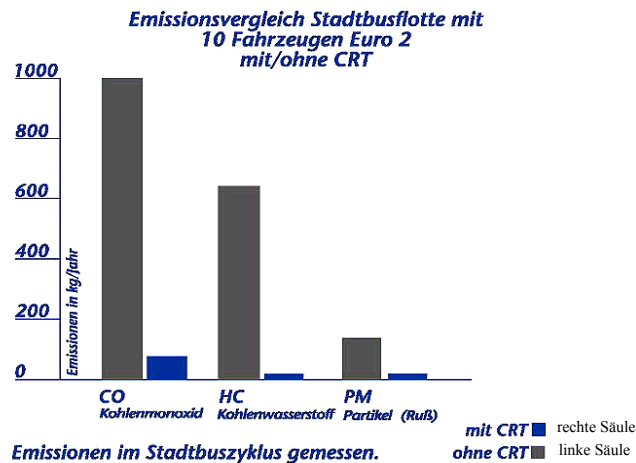


Abbildung A.9: Emissionsvergleich Nahverkehrsbusflotte mit und ohne CRT-Systeme

Nach [66] werden neben den Partikelemissionen auch Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe erheblich reduziert. Vom Hersteller HJS [66] werden auch für diese beiden Emissionstypen Reduktionen von über 90 % bei Einsatz von CRT-Systemen angegeben.

Tabelle A.1 Reduktionsfaktoren CRT

Schadstoff	CO	HC	PM	NO _x	mKr
Reduktion	90 %	95 %	90-95 %	0 %	0 %

In Tabelle A.1 sind die Reduktionsfaktoren der gewählten Emissionen für ein CRT-Abgassystem zusammengefasst.

SCR - Selective Catalytic Reduction

Eine weitere Möglichkeit, Abgase aus der dieselmotorischen Verbrennung nachzubehandeln, ist die SCR-Technik, Selective Catalytic Reduction [65].

Die Charakteristik der dieselmotorischen Verbrennung besteht unter anderem in dem gegenläufigen Verhalten der NO_x - und Partikelemission. Mit steigender Temperatur im Brennraum sinken der Kraftstoffverbrauch und die Partikelemission. Gleichzeitig steigt aber die Stickoxidemission an. Das heißt für die Praxis, dass diese Schadstoffe durch innermotorische Maßnahmen nur bis zu einem bestimmten Kompromiss zwischen der Stickoxid- und Partikelemission gesenkt werden können. Eine in den letzten Jahren weiterentwickelte SCR-Technik zur Minderung der Stickoxidemissionen trägt zur Lösung dieses Zielkonfliktes bei. Bei deren Einsatz wird der Motor in einer verbrauchsoptimierten und partikelarmen Einstellung betrieben. Die dementsprechend relativ hohen NO_x -Emissionen des Motors werden dann von der nachgeschalteten SCR-Anlage gemindert. Bei dem SCR-Verfahren nutzt man die Tatsache, dass Stickoxide mit Ammoniak an geeigneten Katalysatoren in einer schnellen und selektiven Reaktion zu unschädlichem Stickstoff und Wasser umgesetzt werden. Ammoniak wird beim Einsatz in Nutzfahrzeugen in Form einer 32 %igen wässrigen Harnstofflösung bereitgestellt und abhängig von den Betriebszuständen wird der Harnstoff vor den Hydrolysekatalysator in den Abgasstrang dosiert eingespritzt [69]. Das Reduktionsmittel wird katalytisch, z.B. über Harnstoff, oder thermisch, z.B. über Ammoniumcarbamat, zu Ammoniak gewandelt und dann verwendet, um in Kombination mit geeigneten Katalysatoren Stickstoffoxide in unschädlichen Stickstoff und Wasser umzuwandeln (siehe Abbildung A.10).

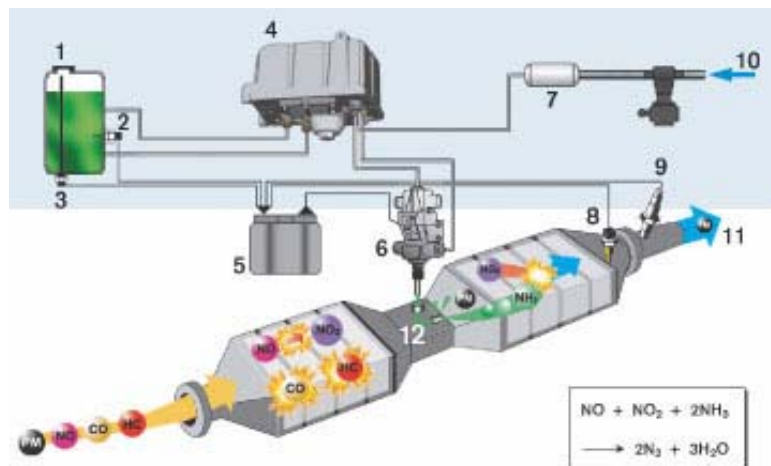


Abbildung A.10: Funktionsprinzip SCR [67]

Die nachgewiesenen Umsatzraten für Stickoxid liegen bei einem gesteuerten Lkw-System bei ca. 80 %. Für die Zukunft wird eine Umsatzrate von 90 % mit geregelten Systemen angestrebt.

Darüber hinaus wird nach Angaben der beiden Hersteller DaimlerChrysler [69] und Bosch [67] zusätzlich auch der Energieverbrauch um ca. 5 % reduziert, da die Motoren in einem verbrauchsärmeren Bereich betrieben werden können. Laut [67] werden die Stickoxide um bis zu 85 % und der Partikelaustritt um bis zu 40 % reduziert.

Tabelle A.2 Reduktionsfaktoren SCR

Schadstoff	CO	HC	PM	NO _x	mKr
Reduktion	0 %	0 %	30-50 %	85 %	-3 %

Die gesammelten Reduktionswerte sind für die ausgewählten Emissionsfaktoren in der Tabelle A.2 noch einmal zusammenfassend dargestellt.

SCRT - Selective Catalytic Reduction Trap

Das SCRT-System ist eine Kombination aus einem CRT[®]-Partikelfiltersystem und einer nachgeschalteten SCR-Einheit. Sowohl SCR als auch SCRT befinden sich noch nicht in Serienreife, welche jedoch nach [64] in 3 bis 5 Jahren erwartet wird.

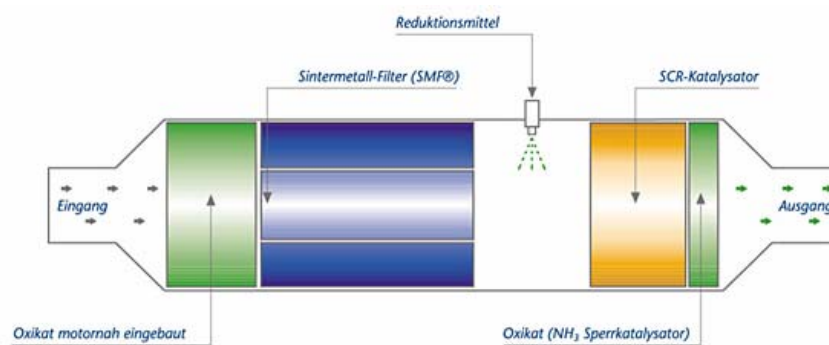


Abbildung A.11: Funktionsprinzip SCRT [66]

Eine Minderung von Dieselpartikeln und Stickstoffoxiden wird durch eine Kombination aus Partikelfilter, CRT[®] und SCR-System erreicht. Das Unternehmen HJS Fahrzeugtechnik verfügt gemeinsam mit der Firma Johnson Matthey über ein Patent für das so genannte SCRT[®]-System [66]. Da sich das Produkt noch in der Entwicklung befindet, sind noch keine verlässlichen Reduktionsfaktoren erhältlich.

Anhang A.3 Erdgas (CNG) Bus

Ein mit Erdgas betriebener Bus ist im Prinzip gleich aufgebaut wie ein Dieselbus. Die konstruktiven Unterschiede beziehen sich vor allem auf den Motor und das Kraftstoffsystem. Tabelle A.3 zeigt die technischen Daten des Erdgasbusses.



Abbildung A.12: CNG-Citaro von EvoBus

Erdgasmotor

Vom Funktionsprinzip entspricht der Erdgasmotor einem Ottomotor. Aus Kostengründen wird im Nutzfahrzeugbereich jedoch seitens der Hersteller versucht, möglichst viele Komponenten vom Dieselmotor zu übernehmen. Als wesentliche Modifikationen sind die Zündanlage anstatt der Einspritzanlage und die Kraftstoffversorgung zu nennen. Der Wirkungsgrad ist durch den Ottoprozess niedriger als beim Dieselmotor. Bei der Verbrennung gibt es zwei verschiedene Konzepte [23]: Die stöchiometrische Verbrennung mit $\lambda = 1$ und das Magerkonzept.

Stöchiometrische Verbrennung

Durch die hohen Verbrennungstemperaturen wird die Bildung von Stickstoffoxiden gefördert, was die Verwendung eines Dreiwege-Katalysators nötig macht. Dadurch werden nach dem Katalysator aber sehr wenig Schadstoffe emittiert. Weitere Eigenschaften dieses Motorenkonzepts sind der relativ niedrige Wirkungsgrad und durch die hohen Temperaturen eine entsprechende Bauteilbeanspruchung. Bei stöchiometrischer Verbrennung kann der Motor nicht aufgeladen werden.

Magerkonzept

Beim Magerkonzept ist der Luftanteil größer und die Verbrennungstemperaturen geringer, was primär zu niedrigeren NO_x -Emissionen führt. Es kann im Magerbetrieb allerdings nur ein unregelter Oxidationskatalysator nachgeschaltet werden, weshalb beim Magerkonzept die realen NO_x -Emissionen höher sind. Durch genaue Steuerung der Verbrennung können gute Wirkungsgrade (37-41 %) und geringe Restmengen Methan nach dem Motor erzielt werden. Eine Aufladung ist bei diesem Konzept möglich.

Beim CNG-Citaro von EvoBus arbeitet der Motor nach dem Magerkonzept.

Anhang A.4 NEBUS

Ein weiterer Brennstoffzellenbus ist der NEBUS (= New Electric Bus). Er ist der Vorgänger des oben vorgestellten BZ Citaros. Der NEBUS wurde 1997 der Öffentlichkeit vorgestellt mit dem Ziel, die Machbarkeit der Brennstoffzellentechnik im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs zu demonstrieren. Einzigartig war zum damaligen Zeitpunkt das verwendete Antriebskonzept, das mit dem eines herkömmlichen Dieselmotors nichts mehr zu tun hat, aber trotzdem in das Grundgerüst eines herkömmlichen Busses der Baureihe O 405 (Vorgänger der Citaro Reihe) von EvoBus integriert werden konnte.

Der Antrieb des NEBUS ist folgendermaßen aufgebaut [19], [26]: Zwei Radnabenmotoren von ZF sind an der Hinterachse angebracht und werden über einen Wechselrichter von den Brennstoffzellenstacks mit Strom versorgt. Damit ist kein Getriebe im herkömmlichen Sinn mehr notwendig. Die Versorgung mit Wasserstoff funktioniert wie beim BZ-Citaro über auf dem Dach angebrachte Druckspeicher.



Abbildung A.13: NEBUS von DaimlerChrysler

Erwähnenswert ist noch die adaptive Dämpferregelung, die in diesem Bus zum ersten Mal erprobt wurde und seither in den CNG-Bussen und in den neuen BZ-Citaros von EvoBus eingesetzt wird. Dabei handelt es sich um eine Steuerung der Härte der Stoßdämpfer, um v.a. bei Kurvenfahrt die fahrdynamischen Nachteile durch den aufgrund der zusätzlichen Dachlast erhöhten Fahrzeugschwerpunkt auszugleichen.

Anhang A.5 Technische Daten der untersuchten Busse

Tabelle A.3 fasst die wichtigsten technischen Daten der vorgestellten und für die Messfahrten verwendeten Busse zusammen.

Tabelle A.3 Technische Daten der untersuchten Busse

	Diesel-Citaro	CNG-Citaro	BZ-Citaro	NEBUS
Fahrzeug	O 530 98335	0530 N3 Gas	O530 N3 BZ	O 405 BZ
Fgst.-Nr.	WEB 62804313098335	62801013091524	6280750035	-
km-Stand				
Motor	OM906hLA E3	OM 447 hLAG IV/21	REULAND	ZF EE Drive
Motorleistung [kW]	205 kW bei 2300 U/min	185 kW bei 2000U/min	220 kW elektrisch	150 kW elektrisch
Motordrehmoment [Nm]	1100 Nm bei 1300 U/min	900 Nm bei 1100U/min	ca. 1020 Nm	-
Hubraum [cm3]	6.400 cm3	12000 cm ³	-	-
Motorsteuerung			keine	keine
Hardware	D21 16KEE	C2		-
Software	53G	14B_001		-
Datensatz	CFFF0002	ZCRA0A04		-
Getriebe	Voith 854.3E	ZF HP 502	ZF 6HP	-
Getriebeeinstellung	1	1	1	-
Retarder	Ja	Ja	Ja	Nein
HA-Übersetzung	6,212	6,212	6,212	-
FMR-Nr.				
HW	FR2000	FR2001	FR2001 Serie	-
SW	05.21	1.01 EPS2		-
Lüftersteuerung	PLD	Linnig	Ballard	-
TKW		87 / 92		-
TLL		46 / 50		-
TGSsoll	87 / 90 55 / 65			-
Bremsssteuerung	EG Bremse	EG Bremse	EG Bremse	n.a.
Luftpresser m./o. power-reduction	2 Zyl. / ja	2 Zyl. / ja	2 Zyl. / ja	n.a.
Lichtmaschinen	2 x 100A	2 x 180 A	2 x 140 A, 1 x 100 A	keine
Klimaanlage	FKX40/560	FK40	FK40	keine
Reifen (8,5 bar)	Conti HB 275/70 R22,5	275/70 R 22,5	275/70 R 22,5	
Leergewicht	11 t	12,5 t	14,0 t	14,0 t
Beladung für Messfahrten	3,5 t	3,5 t	3,5 t	3,5 t

Anhang B Eigenschaften Kraftstoffe

Da die für die verschiedenen Antriebstechnologien verwendeten Kraftstoffe sehr unterschiedlich sind, soll in diesem Kapitel ein Kurzüberblick über deren Herstellung und Eigenschaften gegeben werden.

Wie bereits in Kapitel 2.4 angesprochen, muss für einen Systemvergleich verschiedener Antriebstechnologien mit unterschiedlichen Kraftstoffen der gesamte Lebenszyklus betrachtet werden. Hier spielt auch die Bereitstellung der Kraftstoffe eine große Rolle.

Anhang B.1 Wasserstoff

Wasserstoff ist das chemische Element mit der kleinsten Molekülmasse. Aufgrund seiner hohen Reaktionsbereitschaft tritt es nur als Verbindung in Molekülen auf. Wasserstoff ist farb- und geruchlos und liegt bei Umgebungsbedingungen gasförmig vor. Der Energiegehalt von Wasserstoff pro Masseneinheit ist verglichen zu Diesel fast dreimal so hoch [90]. Auf das Volumen bezogen ist er jedoch relativ klein. Die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff sind in Tabelle B.1 dargestellt.

Alle Gemische von Wasserstoff mit Luft mit einem Wasserstoff-Volumenanteil von 4 % bis 75 % sind entzündlich, daher müssen besondere Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden, um eine Entzündung, z.B. durch Funkenbildung bei statischer Entladung, unbedingt zu verhindern.

Im Transportbereich wird Wasserstoff entweder zur Verbrennung in Ottomotoren oder zur elektrochemischen Reaktion in Brennstoffzellen als Kraftstoff eingesetzt. Die größten technischen Herausforderungen liegen dabei v.a. in der Speicherung von Wasserstoff an Bord der Fahrzeuge. Hierzu gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- ◆ Die Speicherung in gasförmigem Zustand unter hohem Druck (bis 350 bar)
- ◆ Die Speicherung als flüssiger Wasserstoff bei -253°C in hochisolierten Behältern
- ◆ Die Speicherung in Metallhydriden
- ◆ Die Gewinnung aus Methanol an Bord des Fahrzeugs

Dabei scheinen sich die Druck- und Flüssigspeicherung als für den Transportbereich am vorteilhaftesten zu erweisen.

Die Herstellung von Wasserstoff kann aus Primär- oder Sekundärenergieträgern erfolgen. Primärenergetisch wird Wasserstoff heute hauptsächlich aus fossilen Energiequellen durch Reformierung oder partielle Oxidation hergestellt. Dabei werden Erdgas, Schweröl und Kohle benutzt.

Dampfreformierung

Der Prozess der Dampfreformierung selbst erfolgt in vier grundlegenden Schritten, wie sie im Folgenden beschrieben werden:

1. Entschwefelung

Das eintretende Erdgas wird bei einer Betriebstemperatur von 20°C und einem Prozessdruck von 2 - 3 bar entschwefelt. Als Adsorbtionsmaterial wird Aktivkohle

2. Reformierung eingesetzt.

Vor der Reformierung wird das Erdgas auf die spezifischen Randbedingungen des verwendeten Reformers gebracht. Die Reformation selber findet bei 850°C bis 1000°C in Gegenwart eines Nickel-Katalysators statt. Das erzeugte Synthesegas, das den Reformierofen verlässt, besteht größtenteils aus H₂, CO, CO₂, und H₂O. Um eine höhere Integration der Anlage zu erreichen, dient die Prozesswärme wieder der

3. CO-Konverter Dampferzeugung.

Im Shift-Reaktor wird das zuvor nicht umgesetzte CO mit Wasser zu Kohlendioxid konvertiert und dadurch weiterer Wasserstoff gewonnen. Nach Abkühlen auf Umgebungstemperatur und Ableiten des Prozesskondensats reinigt ein aus Eisen-, Chrom und Kupferoxid bestehender Katalysator das Synthesegas.

4. Reinigung Wasserstoff (PSA)

In einer Druckwechsel-Adsorptionsanlage werden die Restbestandteile des Synthesegases an Aktivkohle oder speziellen Kohlenstoff-Molekularsieben aus Zeolithen adsorbiert. Eine solche Anlage für H₂ besteht, abhängig von der Kapazität, aus mindestens vier Adsorptionsbehältern. Während ein Behälter beladen wird, befinden sich die anderen in unterschiedlichen Phasen der Regeneration. Dies geschieht durch sukzessive Druckreduktion auf Umgebungsniveau. Die Verunreinigungen desorbieren und finden sich im Restgas wieder. Das Restgas besteht aus ca. 45 Vol.-% Wasserstoff und wird für die Beheizung des Reformers genutzt.

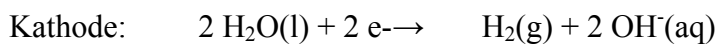
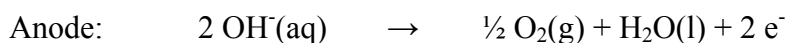
Stand der Technik ist eine H₂-Reinheit von 99,9 % (Reinheitsklasse 3,0). Für spezielle Anforderungen ist es technisch machbar, bei entsprechender Kostenerhöhung, die Druckwechsel-Adsorptionsanlage auf Reinheiten bis 99,999 % (Reinheitsklasse 5,0) auszuliegen. Momentan wird in der Brennstoffzelle Wasserstoff der Reinheitsklasse 5.0 verwendet. Außerdem ist eine Reduktion der als Katalysatorgift wirkenden Stoffe Schwefel und Kohlenmonoxid auf eine Konzentration jeweils <10 ppm erforderlich.

Der Druck des erzeugten Wasserstoffs von „Kleinanlagen“ liegt bei 10-20 bar.

Wasserelektrolyse

Mit Einsatz von elektrischer Energie kann Wasserstoff auch durch Elektrolyse erzeugt werden. Es ist auch der Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom (z.B. Solar- oder Windenergie) möglich.

Der allgemeine Prozess der Wasserelektrolyse entspricht der Wasserstoffproduktion durch elektrochemische Trennung von Wasser in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂). Zwei Elektroden - eine Anode und eine Kathode - werden in ein Elektrolyt eingetaucht und die Bereiche der Anode und Kathode durch ein gasdichtes Diaphragma getrennt, das den Strom fließen lässt. Herkömmliche Elektrolyse-Systeme verwenden eine Alkalilösung, normalerweise Kaliumhydroxid (KOH), als Elektrolyt, weil die spezifische Leitfähigkeit reinen Wassers sehr gering ist. Durch die Verbindung von Strom mit den Elektroden wird ein Potenzial angelegt und die folgenden Reaktionen finden in der Elektrolysezelle statt ('l' steht für liquide, 'g' für gasförmig und 'aq' bedeutet in Wasser aufgelöst):



Die Wasserstoffproduktion kann theoretisch unter ambientem oder erhöhtem Druck stattfinden - im Falle der beschriebenen Druck-Elektrolyse beträgt der Druck ungefähr 15 bar.

Anhang B.2 Diesel

Dieselmotoren werden aus der mittleren Fraktion des Erdöls gewonnen, wobei Raffinerien allerhöchstens 60 % Dieselmotoren aus dem Rohöl gewinnen. Dieselmotoren benötigen schwersiedende Kraftstoffe mit hoher Zündwilligkeit. Die höhere Zündwilligkeit gegenüber Benzin wird durch geringere Vernetzung der kettenförmig aufgebauten Kohlenwasserstoffe erreicht. Dem Dieselmotoren werden Additive wie z.B. Fließverbesserer im Winter beigemischt, um den Stockpunkt herab zu setzen. Deshalb sollte Dieselmotoren eine möglichst hohe Cetanzahl von mind. 45 haben. Die Selbstzündtemperatur beträgt bei verdichtetem Dieselmotoren maximal ca. 400 °C. Der Flammpunkt von Diesel beträgt 55 °C. Durch die unterschiedliche Qualität des verwendeten Rohöls und verschiedene Verfahren der Prozessführung schwanken die Eigenschaften innerhalb einer bestimmten Bandbreite.

Die Partikelemissionen von dieselmotoren betriebenen Fahrzeugen werden vom Schwefelgehalt im Kraftstoff beeinflusst. Aus diesem Grund findet schwefelarmer Kraftstoff mit einem Schwefelanteil < 50 ppm immer mehr Verbreitung. In Deutschland ist nur noch Diesel mit einem Schwefelanteil von 10 ppm im Einsatz. Wie in Kapitel A.2 beschrieben, ist schwefelarmer bzw. schwefelfreier Kraftstoff auch die Voraussetzung für den Einsatz moderner Abgasnachbehandlungssysteme.

Anhang B.3 Erdgas

Erdgas besteht aus ca. 85 % Methan, 10 % N₂ und CO₂, der Rest sind höhere Kohlenwasserstoffe [169]. Die Gewinnung erfolgt direkt aus der Förderung in Gasfeldern oder als Beiprodukt der Erdölproduktion. Man unterscheidet in Deutschland zwischen zwei Erdgasqualitäten: L- Gas (Low-Gas: Methan-Anteil von 79,8 und 87 Vol. %, z.B. aus Deutschland) und H- Gas (High-Gas: Methan- Anteil zwischen 87 und 99,1 Vol. %, z.B. aus Russland). Die Qualität richtet sich in erster Linie nach dem Heizwert.

Erdgas wird in zwei unterschiedlichen Formen als Kraftstoff eingesetzt:

1. CNG- Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas), das weitestgehend in dem Zustand, in dem es gefördert wird, Verbrennungsmotoren antreiben kann. Der Speicherdruck an Bord des Fahrzeuges beträgt 200 bar bei 15°C.
2. LNG- Liquefied Natural Gas (flüssiges Erdgas). Erdgas wird bei einer Temperatur von -162 °C flüssig, dabei reduziert sich sein Volumen auf 1/600 des Ausgangsvolumens

Der Ausstoß von Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid-, Russ- und anderen Partikelemissionen wird beim Einsatz des Kraftstoffs Erdgas nahezu vollständig vermieden [169].

Wichtig ist noch, Erdgas nicht mit Autogas zu verwechseln. Unter der Bezeichnung LPG (Flüssiggas, Propan/ Butan - Gemische) versteht man das Autogas.

Anhang B.4 Kraftstoffeigenschaften

In Tabelle B.1 sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften der drei betrachteten Kraftstoffe im Vergleich dargestellt [48]. Es handelt sich dabei um Durchschnittswerte. Die Eigenschaften des Erdgas hängen dabei besonders stark von der jeweiligen Qualität ab. Als Bezugsgröße wird der Energieinhalt eines Liters Diesel gewählt. 1 l Dieseläquivalent entspricht 35,6 MJ Heizwert.

Tabelle B.1 Physikalische Eigenschaften der verwendeten Kraftstoffe

	Wasserstoff	Diesel	Erdgas
Dichte [kg/Nm³]	0,090	815...855	~ 0,83
Siedepunkt [°C]	-253	180...360	-162
Unterer Heizwert [MJ/kg]	120	42,5	47,4
1 Dieseläquivalent/ kg	3,37	1,19	1,33

Anhang C Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsmessungen

Anhang C.1 Kraftstoffverbrauchsmessung

Bei der Kraftstoffverbrauchsmessung gibt es grundsätzlich vier verschiedene Methoden. Zur Verbrauchsermittlung für Nutzfahrzeuge allgemein nach DIN 70030 [62] wird auf ebener Prüfstrecke ($\pm 1,5\%$ Steigung) von ca. 10 km Länge in beiden Richtungen gemessen. Dabei wird die Strecke mit $\frac{3}{4}$ der zulässigen Höchstgeschwindigkeit durchfahren. Die Beladung beträgt die Hälfte der Nutzlast. Der Kraftstoffverbrauch wird nach Norm in Liter je 100 km angegeben:

$$C = 1,1 \cdot \frac{V}{s} \cdot 100 \quad \frac{l}{100km} \quad (\text{Gleichung C.1})$$

Dabei ist

V: Verbrauchtes Kraftstoffvolumen [l]

s: zurückgelegte Wegstrecke in km

1,1: Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung ungünstiger Umstände im Straßenverkehr

Diese Messung berücksichtigt jedoch nicht den Einfluss von Geschwindigkeitsprofil und Topografie auf den Kraftstoffverbrauch.

Um zeitaufgelöste Verbrauchsdaten zu erhalten, werden die Fahrzeuge auf Rollenprüfständen (Chassis-Dynamometer) getestet. Auf einem derartigen Rollenprüfstand kann ein bestimmtes Lastprofil simuliert werden, was in der Regel einem realistischen Fahrbetrieb bzw. einer bestimmten Buslinie in der Realität entspricht. Untenstehend sind die am häufigsten verwendeten Fahrzyklen aufgeführt.

ECE 15 – Zyklus

Der ECE 15 Zyklus, der davor als MVEG-A bezeichnet wurde, stammt aus der Abgasuntersuchung für leichte Kraftfahrzeuge und repräsentiert einen städtischen Fahrzyklus.

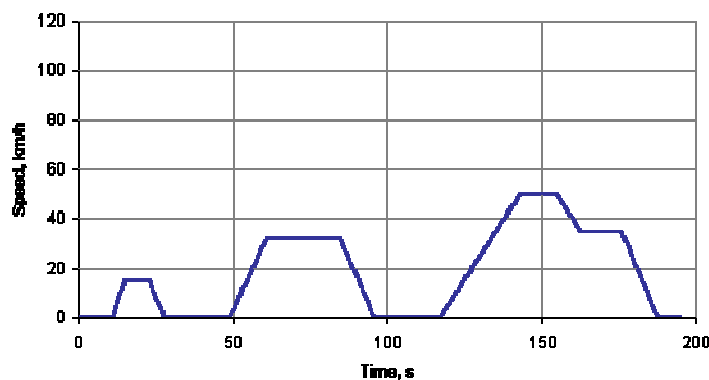


Abbildung C.1: ECE 15 - Zyklus

ETC – Zyklus

Der ETC (= European Transient Cycle), der auch als FIGE-Zyklus bezeichnet wird, ist der am meisten verbreitete Testzyklus für Kraftstoffverbrauchsmessungen bei Diesel-Nutzfahrzeugen und wird in diesem Bereich seit dem Jahr 2000 angewandt.

Wie in Abbildung C.2 dargestellt setzt er sich aus einem Geschwindigkeits-Zeit-Profil, einem Drehzahl-Zeit-Profil und einem Drehmoment-Zeit-Profil zusammen.

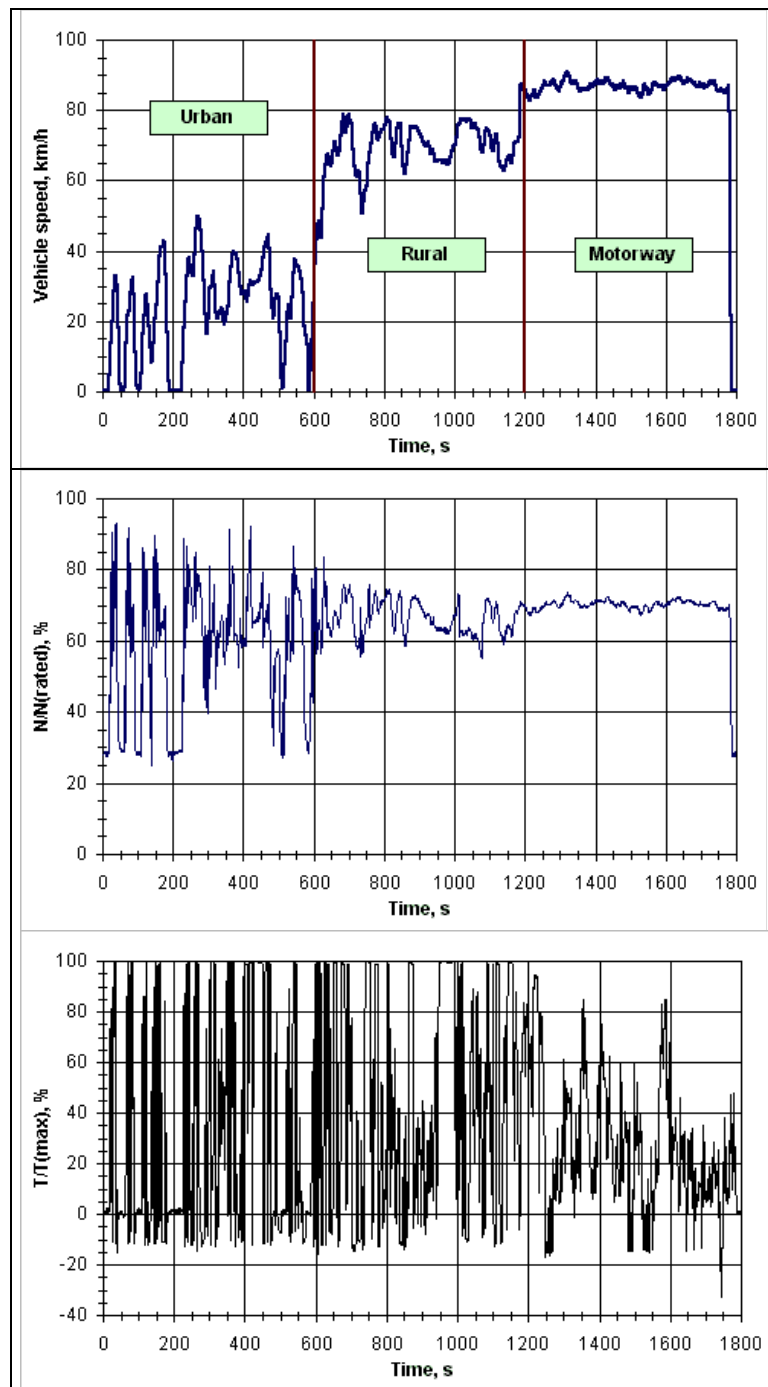


Abbildung C.2 ETC - Zyklus

Als weitere Möglichkeiten der Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs stehen noch zwei Verfahren mittels Fahrten auf der Strasse zur Verfügung. Zum ersten sind dies natürlich praxisnahe Tests

auf städtischen Buslinien, zum zweiten der sogenannte SORT-Zyklus, der auf einer geeigneten Teststrecke durchgeführt werden muss.

Bei den praxisnahen Fahrten entlang von Buslinien ist ein Durchflussmesser in den betreffenden Bus eingebaut, um möglichst zeitaufgelöste Verbrauchswerte zu erhalten. Diese Verbrauchswerte sind natürlich stark vom befahrenen Streckenprofil und anderen Umgebungseinflüssen, wie Wetter und Verkehrsdichte abhängig.

Beim SORT-Zyklus handelt es sich um eine von der UITP-„International Association of Public Transport“ standardisierte Testprozedur, die speziell für Omnibusse entwickelt wurde. Dabei ist die Durchschnittsgeschwindigkeit der entscheidende Parameter für den Kraftstoffverbrauch. Es werden mehrere Fahrten auf ebener Teststrecke unterhalb einer zulässigen Abweichung vom vorgegebenen Zyklus, bestehend aus Geschwindigkeitstrapezen, durchgeführt. Je nach Durchschnittsgeschwindigkeit wird zwischen SORT1, SORT2 und SORT3 unterschieden. Die Einteilung erfolgt dabei anhand der erreichten Maximalgeschwindigkeit. Untenstehende Abbildung zeigt den Aufbau eines solchen Zyklus [127].

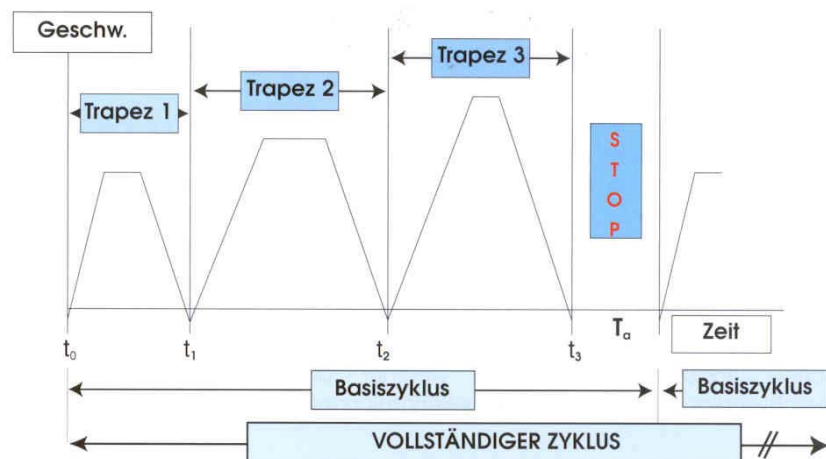


Abbildung C.3 Aufbau des SORT-Zyklus [127]

Anhang C.2 Emissionsmessung

Emissionsmessungen können bei Bussen ebenfalls auf dem Rollenprüfstand durchgeführt werden. Hierzu werden gezielt vorgegebene Drehzahl-/Drehmomentwerte angefahren. Eine Zertifizierung der Motoren erfolgte bisher mit einem sogenannten stationären 13-Stufen Test (ECE R49). Der Nachteil hierbei war, dass nur zwei Drehzahlbereiche unter Last in die Messungen eingingen. Seit dem Inkrafttreten der derzeit gültigen Euro 3 – Norm wurde ein messtechnisch aufwendigeres Prüfverfahren vorgestellt, das die EU-Richtlinien 2001/27/EU erfüllt und mit Euro 4 verpflichtend wird [6].

Es werden dabei drei verschiedene Tests durchgeführt:

- ◆ Der erweiterte Europäische Stationär-Test (ESC = European Steady Cycle), der das Drehzahlband im realen Betrieb besser abdeckt.
- ◆ Der europäische Load Response Test (ELR), mit dem die sichtbaren Rußemissionen bestimmt werden.
- ◆ Der europäische Transient Cycle (ETC) für die Abbildung eines realitätsnahen Fahrverhaltens.

Die ESC und ELR Tests sind untenstehend in Abbildung C.4 noch einmal dargestellt [7].

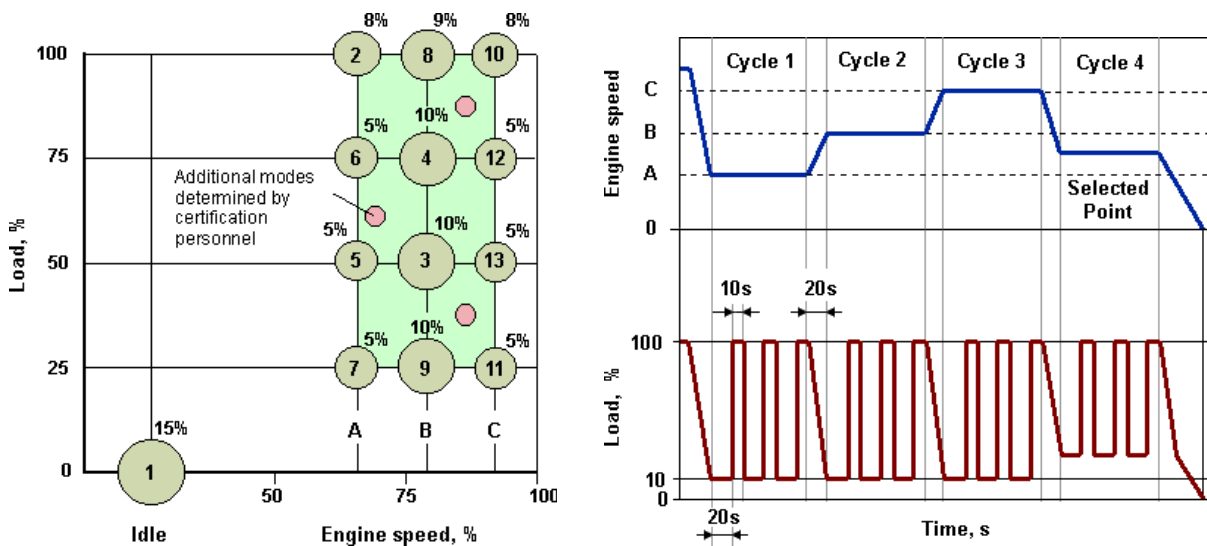


Abbildung C.4 ESC-Zyklus und ELR-Zyklus

Tabelle C.1 bietet eine Übersicht der Emissionsgrenzwerte nach Euro-Norm [7]:

Tabelle C.1: Emissionsgrenzwerte nach Euro-Norm

	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3		Euro 4/5	
	88/77/EWG	91/542/EWG		1999/96/EG			
	seit 1988/90	ab 1992/93 1. Stufe	ab 1995/96 2. Stufe	ab 2000		ab 2005/2006 bzw. 2008/2009*)	
				ESC- und ELR-Test ¹⁾	ETC-Test ^{2) 3)}	ESC- und ELR-Test ¹⁾	ETC-Test ^{2) 3)}
g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh	g / kWh
CO	12,3	4,9	4,0	2,1	5,45	1,5	4,0
HC	2,6	1,23	1,1	0,66		0,46	—
NMHC	—	—	—	—	0,78		0,55
Methan	—	—	—	—	1,6 ⁴⁾		1,1 ⁴⁾
NO _x	15,8	9,0	7,0	5,0	5,0	3,5 / 2,0*	3,5 / 2,0*
Partikel	—	0,4	0,15	0,1	0,16 ⁵⁾	0,02	0,03 ⁵⁾
Ruß	—	—	—	0,8 m ⁻¹	—	0,5 m ⁻¹	—

¹⁾ geändertes / verschärftes Prüfverfahren für alle Dieselmotoren
²⁾ zusätzlicher Transienten-Test für Dieselmotoren mit Abgasnachbehandlungssystem
³⁾ Für Gasmotoren nur Transient-Test
⁴⁾ Nur für Erdgasmotoren
⁵⁾ Nur für Dieselmotoren
*) Bei Euro 5 (ab 2008/09) wird nur der NO_x-Grenzwert von 3,5 auf 2,0 g/km herabgesetzt

Die Emissionsgrenzwerte werden hier auf g/kWh bezogen, im Gegensatz zu g/km bei den PKW. Weiterhin gibt es seitens der Vereinten Nationen Anstrengungen, einen weltweit einheitlichen Standard und damit auch Testzyklus für Emissionstests bei Nutzfahrzeugen bzw. Bussen zu erarbeiten und durchzusetzen [9]. Mit der Entwicklung von Testzyklen und Umrechnungsalgorithmen wurde bereits 1998 unter der Federführung vom RWTÜV und TNO begonnen. Ziel ist die Festlegung von Testzyklen für Tests mit Motoren- und Gesamtfahrzeugprüfständen, die mit den bisher in Europa gültigen Normen vergleichbar sind.

Anhang C.3 Verbrauchs- und Emissionsmessungen im Rahmen dieser Arbeit

Tabelle C.2 Daten der vermessen Testzyklen

	Linie 42 Stuttgart	Esslingen-Zyklus	Reykjavik Route 3
Länge [km]	21,5	25,2	27,8
Benötigte Zeit [min]	80	70	90
Anzahl Haltestellen	2 x 27	29	41
Ø Haltestellenabstand [m]	400	900	680
Ø Geschwindigkeit [km/h]	16	22,3	18,5
Höhenbereich [m]	240-330	220-290	5-60
Zurückgelegte Höhenmeter [m]	534	220	310

Anhang D Flottenzusammensetzung

Flottenzusammensetzung Deutschland 1990-2020

Das „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ in der Version 2.1 vom Februar 2004 baut auf dem Verkehrsmengengerüst auf, das für TREMOD abgeleitet wurde [52]. Das sind Daten und Annahmen zu den Fahrzeugbeständen und Fahrleistungen des Straßenverkehrs sowie notwendige ergänzende Informationen

- ◆ in der Zeitreihe von 1980 bis 2000/2001 sowie in einem Basisszenario bis 2020
- ◆ getrennt für West- und Ostdeutschland (bis 1993) und Deutschland insgesamt (1994-2020).

Zur Ableitung des Verkehrsmengengerüsts wurden zahlreiche Basisdaten aus allgemein zugänglichen Statistiken und speziellen Untersuchungen verwendet, aufeinander abgestimmt und ergänzt. Im Folgenden ist ein Überblick über die wichtigsten Bereiche, die Hauptquellen sowie wichtige Annahmen dargestellt.

Für Deutschland wurden die Bestände des Straßenverkehrs ab 1994 aufgrund der detaillierten Bestands- und Neuzulassungsstatistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes KBA aufgearbeitet und in TREMOD integriert.

Wichtigste Quelle für die Fahrleistungen des Straßenverkehrs ist die kontinuierlich publizierte Zeitreihe der Fahrleistungen im Straßenverkehr, die vom DIW erstellt wird und in „Verkehr in Zahlen“ publiziert ist. Erfasst wurde außerdem die Inlandsfahrleistung als die Fahrleistung von allen Kraftfahrzeugen auf den Straßen innerhalb Deutschlands. Für das Verkehrsmengengerüst im HBEFA 2.1 sind vor allem die Fahrleistungsanteile nach Straßenkategorien sowie nach Verkehrssituationen und Längsneigung relevant, die zur Berechnung der mittleren Emissionsfaktoren für die Verkehrssituationen „Durchschnitt“ bzw. „Durchschnitt AB, AO, IO“ verwendet werden [74].

Die zukünftige Bestandsentwicklung des Straßenverkehrs bis zum Jahr 2020 wird mit Hilfe eines Umschichtungsmodells abgeleitet. Dabei wird, ausgehend vom realen Bestand, aus der letzten verfügbaren Statistik, aus anhand der Entwicklung der letzten Jahre abgeschätzten Neuzulassungen und Neuzulassungsanteilen der einzelnen Fahrzeugschichten sowie den Überlebenswahrscheinlichkeiten ein möglicher zukünftiger Fahrzeugbestand berechnet.

Die Fortschreibung der Fahr- und Verkehrsleistungen wird auf Basis des Trend-Szenarios der „Verkehrsprognose 2015“ für die Bundesverkehrswegeplanung sowie einer Projektion bis 2020 des DIW vorgenommen.

Für die zukünftigen Neuzulassungen wurde eine jährliche Zulassungsrate von 4.000 Reisebussen und 2.700 Linienbussen angenommen. Die Omnibusse wurden auf Grund des Überle-

bensverhaltens der Busse in Deutschland zwischen 1994 und 1997 abgeleitet. Die folgende Abbildung 20 zeigt das Ergebnis der Bestandsberechnung für Deutschland bis 2020.

Bei den Linienbussen wurde für alle Antriebskonzepte und alle Bezugsjahre ein Einheitswert für einer Jahresfahrleistung von 50.000 km/a angenommen. Die Fahrleistungsgewichtung nach [56] wurde bereits für die Bestandsabschätzung verwendet, so dass keine weitere Fahrleistungsgewichtung notwendig war.

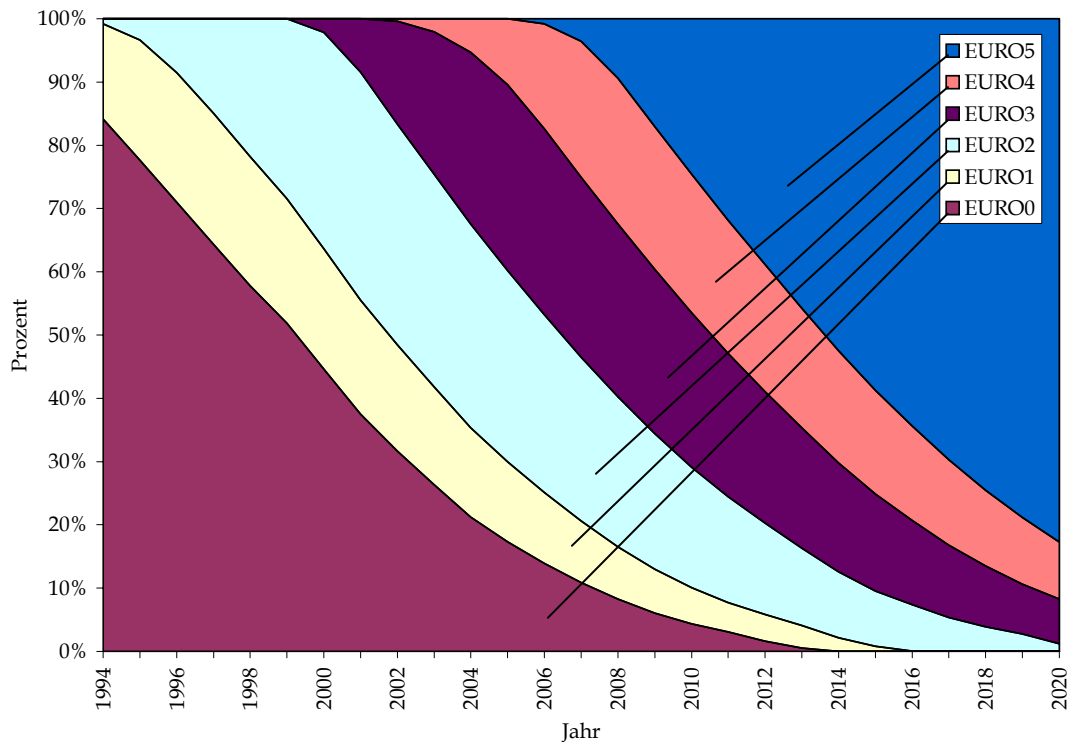


Abbildung D.1 Flottenzusammensetzung von Linienbussen in Deutschland 1994-2020 [74]

Für Deutschland wird die Flottenzusammensetzung für Nahverkehrsbusse 15-18 t wie in Abbildung D.1 angegeben. Dort wird der Zeitraum von 1994-2020 betrachtet und der prozentuale Anteil der Euro-Stufen 0-5 angegeben.

Für die Abschätzung im Modell werden keine absoluten Zahlen der Flottenzusammensetzung benötigt, da die Flottengröße vom Anwender des Modells vorgegeben wird. Es interessiert daher nur die prozentuale Zusammensetzung der Flotte im jeweiligen Bezugsjahr und Bezugsland, wie sie in der Abbildung D.1 für Deutschland dargestellt ist.

Flottenzusammensetzung Europa 1990-2020

Für die Flottenzusammensetzung mehrerer europäischer Länder wurde ein Teilbericht des MEET-Projekts herangezogen [72]. Dieses Projekt ist ein eigenständiges, von der EU gefördertes Projekt, das jedoch zum COST319-Projekt [75] gehört. Das MEET-Projekt⁸⁶, hat das Ziel, Datensätze und Modelle zur Verfügung zu stellen, die es einer Vielzahl unterschiedli-

⁸⁶ MEET: Methodologies for Estimating Air Pollutants Emissions from Transport

cher Anwender erlauben, die Kraftstoff- und Energieverbräuche verschiedener Transportmöglichkeiten abzuschätzen. Ein Teilbereich des Projekts ist die Ermittlung der Fahrleistungen und Fahrzeugbestände der Mitgliedsländer der Europäischen Union. Dieser Teilbereich wurde von KYRIA-KIS ET AL [72] erstellt und im Rahmen des COST319-Projekts veröffentlicht. Der Bericht enthält Daten zur Flottenzusammensetzung der Länder:

- Österreich
- Belgien
- Dänemark
- Deutschland
- Finnland
- Frankreich
- Griechenland
- Großbritannien
- Irland
- Italien
- Luxemburg
- Niederlande
- Portugal
- Spanien
- Schweden

Hieraus werden jedoch nur die Daten für die Nahverkehrsbusse benötigt. Die Daten liegen für den Zeitraum von 1994 bis zu prognostizierten Zusammensetzungen für das Jahr 2020 vor. Die Daten sind nach Euro-Abgasstufen differenziert. Jedoch werden die Daten ohne nähere Angabe von Gründen nur bis Euro 3 geführt, für alle Neuzulassungen nach 2006 wird Euro 3 angenommen. Da dies nicht dem Stand der Technik entspricht, wird hier eine (grobe) Anpassung der Daten an momentane Richtlinien durchgeführt. Dazu werden basierend auf [7] folgende Annahmen getroffen:

- ◆ die Daten für Euro 2-Busse und älter werden unverändert in das Modell übernommen, da Erstzulassungen seit dem Jahr 2001 mindestens den Euro 3-Standard erfüllen müssen,
- ◆ ab dem 1.1.2006 erfüllen alle Neuzulassungen den Euro 4-Standard,
- ◆ ab dem 1.1.2009 erfüllen alle Neuzulassungen den Euro 5-Standard,
- ◆ die durchschnittliche Jahresfahrleistung beträgt nach [72] etwa 60.000 km/a,
- ◆ die Gesamtleistung eines Busse wird nach [76] mit 750.000 km veranschlagt.

Auf der Basis dieser Annahmen wird die Flottenzusammensetzung ab dem Jahr 2006 den momentanen gesetzlichen Gegebenheiten angepasst. Die Reduktion der Fahrzeugbestände von z.B. Euro 3-Fahrzeugen nach 2006 wird über eine statistische Abnahme in Abhängigkeit

von Jahrsfahrleistung und der Gesamtfahrleistung durchgeführt. Dabei wird angenommen, dass sich der Bestand an Euro 3-Fahrzeugen mit einer Jahresfahrleistung von 60.000 km/a und einer Gesamtfahrleistung von 750.000 km beispielsweise bis zum Jahr 2008 folgendermaßen reduziert:

$$Btd_{2008} = Btd_{2005} * \left(1 - \frac{\text{Jahresfahrleistung}}{\text{Gesamtfahrleistung}}\right)^{(2008-2005)}$$

wobei „Btd“ dem Bestand der Fahrzeuge entspricht.

Analog dazu erfolgt ab 2009 die Abnahme des Euro 4 Fahrzeugbestands. Dies entspricht in diesem Fall einer jährlichen Abnahme an Beständen nicht mehr zeitgemäßer Euro-Klassen ab Euro 3 und höher nach 2005 von 8 %.

Die neuen angepassten Daten auf [72] basierend, werden nachfolgend aufgeführt. Für tiefgehendere Informationen zur Ermittlung der Flottenzusammensetzungen wird auf [72] und [59] verwiesen.

Flottenzusammensetzung nach [72] (angepasst) und [74]

Jahr	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Land	<u>DE</u>					
Euro 0	78 %	45 %	17 %	4 %	0 %	0 %
Euro 1	19 %	19 %	13 %	6 %	1 %	0 %
Euro 2	3 %	34 %	30 %	19 %	9 %	1 %
Euro 3	0 %	2 %	29 %	24 %	15 %	7 %
Euro 4	0 %	0 %	10 %	22 %	16 %	9 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	25 %	59 %	83 %
Land	<u>AT</u>					
Euro 0	82 %	52 %	25 %	6 %	0 %	0 %
Euro 1	18 %	22 %	21 %	16 %	4 %	0 %
Euro 2	0 %	26 %	25 %	23 %	16 %	2 %
Euro 3	0 %	0 %	29 %	19 %	12 %	8 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	27 %	17 %	11 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	9 %	51 %	78 %
Land	<u>BE</u>					
Euro 0	82 %	50 %	29 %	8 %	0 %	0 %
Euro 1	18 %	28 %	32 %	29 %	9 %	0 %
Euro 2	0 %	22 %	27 %	34 %	30 %	6 %
Euro 3	0 %	0 %	12 %	11 %	12 %	17 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	13 %	15 %	21 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	5 %	34 %	55 %
Land	<u>PT</u>					
Euro 0	85 %	61 %	38 %	20 %	8 %	0 %
Euro 1	15 %	18 %	16 %	15 %	12 %	6 %
Euro 2	0 %	21 %	19 %	17 %	16 %	13 %
Euro 3	0 %	0 %	27 %	16 %	10 %	6 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	24 %	15 %	9 %

Euro 5	0 %	0 %	0 %	8 %	40 %	66 %
Land	<u>DK</u>					
Euro 0	59 %	26 %	1 %	0 %	0 %	0 %
Euro 1	41 %	42 %	17 %	0 %	0 %	0 %
Euro 2	0 %	32 %	27 %	9 %	0 %	0 %
Euro 3	0 %	0 %	54 %	33 %	20 %	12 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	43 %	26 %	16 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	15 %	54 %	72 %
Land	<u>FI</u>					
Euro 0	92 %	69 %	38 %	12 %	1 %	0 %
Euro 1	8 %	11 %	11 %	10 %	6 %	0 %
Euro 2	0 %	20 %	20 %	20 %	17 %	7 %
Euro 3	0 %	0 %	32 %	21 %	14 %	9 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	28 %	18 %	12 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	10 %	44 %	71 %
Land	<u>FR</u>					
Euro 0	85 %	51 %	24 %	5 %	0 %	0 %
Euro 1	15 %	21 %	20 %	16 %	3 %	0 %
Euro 2	0 %	28 %	27 %	26 %	17 %	1 %
Euro 3	0 %	0 %	29 %	18 %	12 %	8 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	27 %	17 %	11 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	9 %	51 %	80 %
Land	<u>GR</u>					
Euro 0	76 %	49 %	33 %	6 %	0 %	0 %
Euro 1	24 %	34 %	41 %	36 %	3 %	0 %
Euro 2	0 %	17 %	21 %	27 %	20 %	0 %
Euro 3	0 %	0 %	5 %	4 %	5 %	7 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	20 %	22 %	31 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	7 %	51 %	61 %
Land	<u>IE</u>					
Euro 0	81 %	45 %	21 %	4 %	0 %	0 %
Euro 1	19 %	24 %	22 %	16 %	4 %	0 %
Euro 2	0 %	30 %	27 %	24 %	15 %	2 %
Euro 3	0 %	0 %	30 %	18 %	11 %	7 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	28 %	17 %	10 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	10 %	53 %	81 %
Land	<u>IT</u>					
Euro 0	92 %	68 %	39 %	17 %	2 %	0 %
Euro 1	8 %	11 %	11 %	10 %	7 %	1 %
Euro 2	0 %	21 %	21 %	20 %	19 %	11 %
Euro 3	0 %	0 %	30 %	19 %	13 %	9 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	25 %	16 %	11 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	9 %	43 %	69 %
Land	<u>NL</u>					
Euro 0	84 %	50 %	19 %	1 %	0 %	0 %
Euro 1	16 %	21 %	20 %	11 %	0 %	0 %
Euro 2	0 %	29 %	27 %	25 %	10 %	0 %
Euro 3	0 %	0 %	34 %	21 %	14 %	9 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	31 %	20 %	13 %

Euro 5	0 %	0 %	0 %	11 %	56 %	79 %
Land	<u>ES</u>					
Euro 0	86 %	55 %	34 %	10 %	0 %	0 %
Euro 1	14 %	20 %	19 %	17 %	6 %	0 %
Euro 2	0 %	25 %	24 %	23 %	18 %	3 %
Euro 3	0 %	0 %	22 %	14 %	9 %	6 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	26 %	17 %	11 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	9 %	49 %	80 %
Land	<u>SE</u>					
Euro 0	83 %	27 %	1 %	0 %	0 %	0 %
Euro 1	17 %	26 %	15 %	0 %	0 %	0 %
Euro 2	0 %	47 %	45 %	17 %	0 %	0 %
Euro 3	0 %	0 %	39 %	27 %	18 %	13 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	42 %	29 %	20 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	14 %	53 %	67 %
Land	<u>UK</u>					
Euro 0	67 %	32 %	1 %	0 %	0 %	0 %
Euro 1	33 %	40 %	22 %	0 %	0 %	0 %
Euro 2	0 %	28 %	28 %	12 %	0 %	0 %
Euro 3	0 %	0 %	49 %	33 %	22 %	15 %
Euro 4	0 %	0 %	0 %	41 %	28 %	19 %
Euro 5	0 %	0 %	0 %	14 %	50 %	65 %

Anhang E Handbuch Emissionsfaktoren

Anhang E.1 Fahrmuster und Verkehrssituationen

Fahrmuster stehen für typische Fahrverhaltensmuster und können anhand kinematischer Kenngrößen, wie mittlere Geschwindigkeit und Dynamik, beschrieben werden. Die Emissionsfaktoren sind ursprünglich für die Fahrmuster ermittelt worden. In der praktischen Anwendung interessieren jedoch nicht die Emissionen pro Fahrmuster, sondern innerhalb einer verkehrstypischen Situation. Es wurde der Begriff „Verkehrssituation“ eingeführt, der aus einer Linearkombination von Fahrmustern auf realitätsnahen Streckentypen besteht [74]. Die „Verkehrssituation“ ist ein auf alle Fahrzeugkategorien anwendbarer Begriff, während die Fahrmuster pro Fahrzeugkategorie definiert sind. In Fahrverhaltensuntersuchungen wurde ermittelt, welche Fahrmuster in welcher Verkehrssituation mit welchem Anteil vorkommen. Nach [117] lassen sich damit die Emissionsfaktoren der Fahrmuster auf die Verkehrssituationen übertragen.

In Untersuchungen an Pkw wurden Fahrzeuge mit verschiedenen Fahrern nach [171] auf mehrere Messparcours geschickt. Die Fahrzeuge sind dabei im Verkehr mitgeschwommen, es wurden währenddessen die Geschwindigkeitsprofile sekundlich aufgezeichnet. Anschließend wurden die Fahrkurven mit statistischen Methoden auf Ähnlichkeiten untersucht und zu Fahrmustern gruppiert. Parallel wurde auch untersucht, wie diese Fahrmuster in realitätsnahen Verkehrssituationen, wie Stop & Go, usw., vorkommen. Das Fahrverhalten von Lastkraftwagen und Bussen wurde in ähnlicher Weise bei [118] untersucht. Auch hier wurden aus den während den Fahrten erhobenen Messdaten typische Fahrmuster entwickelt, die dann mit Parametern wie Straßenkategorie, Verkehrszustand, Beladungsgrad, etc. in Beziehung gesetzt werden konnten.

Tabelle E.1: Fahrmustergruppen gemäß den Fahrverhaltensuntersuchungen für schwere Motorwagen nach [74]

Beschreibung der Fahrmustergruppen	Nr. der Fahrmustergruppe					
	LW/LZ/SZ		Reisebusse/ Cars		Linienbusse/ ÖV	
	Nr.	v [km/h]	Nr.	v [km/h]	Nr.	v [km/h]
Regelfall:						
(1) Autobahn (freier Verkehrsfluss)	1	86	7	103	--	--
(2) Ausserortsstrassen (4-streifig, 3-streifig, 2-streifig; mit Pannestreifen)	2	79	8	98	15	40
(3) übrige Ausserortsstrassen	3	65	9	65	15	40
(4) innerorts HVS	4	47	10	47	15	40
(5) innerorts, Kernbereich, grosse Knotenabstände	5	26	11	20	14	22
(6) innerorts, übrige Strassen, kleine Knotenabstände	6	17	12	14	13	16
Sondersituationen:						
(7) Serpentin	16	38	22	38	28	36
(8) innerorts, gebundener Verkehrsfluss	17	11	23	11	29	11
(9) innerorts, Stop-and-Go	18	6	24	6	30	6
(10) Autobahn, teilgebundener Verkehrsfluss	19	73	25	73	--	--
(11) Autobahn, gebundener Verkehrsfluss	20	18	26	18	--	--
(12) Autobahn, Stop-and-Go	21	6	27	6	--	--

Die Tabelle E.1 zeigt die Fahrmustergruppen für schwere Motorwagen mit ihrer dazugehörigen Durchschnittsgeschwindigkeit.

Eine Verkehrssituation beschreibt ein bestimmtes Fahrverhaltensmuster. Sie sind durch die Merkmale von verschiedenen Straßenabschnitten gekennzeichnet, wie „außerorts Autobahn“, „innerorts dicht bebaut“, etc.. Sie setzen sich entsprechend Tabelle E.2 aus Linearkombinationen von verschiedenen Fahrmustern zusammen.

Tabelle E.2: Definition der Verkehrssituationen mit zugrundeliegenden Fahrmustern mit v =Durchschnittsgeschwindigkeit nach [74]

Verkehrssituation		Fahrmuster-Mix					
Kurzbezeichnung (Handbuch)	Beschreibung	SNF (LW/LZ/SZ)	v	RBus	v	LBus	v
Autobahnen / Autostrassen (Regelfall)							
AB>120	ohne Tempolimit, Verkehrsstärken < 1400 Kfz/h je Fahrstr	FM1	86	FM7	103	FM15	40
AB_120	T120, Verkehrsstärken<1500 Kfz/h je Fahrstr	FM1	86	FM7	103	FM15	40
AB_100	T100, Verkehrsstärken<1500 Kfz/h je Fahrstr	FM1	86	FM7	103	FM15	40
AB_80	T80, Verkehrsstärken <1500 Kfz/h je Fahrstr	0.5*FM1+0.5*FM2	83	0.67*FM8+0.33*FM9	87	FM15	40
AB_60	T60, Verkehrsstärken <1500 Kfz/h je Fahrstr	0.7*FM2+0.3*FM3	75	0.4*FM8+0.6*FM9	78	FM15	40
AB>120_gebunden	ohne Tempolimit, Verkehrsstärken > 1500 Kfz/h je Fahrstr	FM2	79	0.45*FM8+0.55*FM9	80	FM15	40
AB_120_gebunden	Tempo 120, Verkehrsstärken >1500 Kfz/h je Fahrstr.	FM2	79	0.45*FM8+0.55*FM9	80	FM15	40
AB_100_gebunden	Tempo 100, Verkehrsstärken >1500 Kfz/h je Fahrstr	FM2	79	0.45*FM8+0.55*FM9	80	FM15	40
AB_80_gebunden	Tempo 80, Verkehrsstärken >1500 Kfz/h je Fahrstr	FM2	79	0.45*FM8+0.55*FM9	80	FM15	40
AB_60_gebunden	Tempo 60, Verkehrsstärken >1500 Kfz/h je Fahrstr	0.4*FM2+0.6*FM3	71	0.17*FM8+0.83*FM9	70	FM15	40
AB_Baust1	Autobahn Bausstelle zweistreifig	0.5*FM1+0.5*FM2	83	0.55*FM8+0.45*FM9	83	FM15	40
AB_Baust2	Autobahn Bausstelle eng, einstreifig	0.4*FM2+0.6*FM3	70	0.17*FM8+0.83*FM9	70	FM15	40
AB_Stop+Go	Autobahn Stop+Go	FM21	6	FM27	6	FM30	6
Autobahnen (Sondersituationen)							
X: BAB_gebunden	Autobahn Starke Störung (nur SMW)	FM20	18	FM26	18	-	-
X: BAB_teilgebunden	Autobahn Mittl. Störung (nur SMW)	FM19	73	FM25	73	-	-
Ausserorts-Strassen (Regelfall)							
AO_1	AO HVS: guter Ausbaugrad, gerade	0.5*FM2+0.5*FM3	72	0.33*FM8+0.67*FM9	76	FM15	40
AO_2	AO HVS: guter Ausb., gleichm. kurvig	FM3	65	FM9	65	FM15	40
AO_3	AO HVS: ungleichmässig kurvig	0.5*FM3+0.5*FM4	56	0.65*FM9+0.35*FM10	58	FM15	40
Ausserorts-Strassen (Sondersituationen)							
X: AO_Serp	Serpentinen (nur SMW)	FM16	38	FM22	38	FM28	36
X: AO_mehrspurig	nur Busse: 3 oder 4 spurig, ausgebaut						
Innerorts -Strassen (Regelfall)							
IO_HVS>50_1	IO HVS, TL<50; geringe Stör'g	0.33*FM3+0.67*FM4	53	0.33*FM9+0.67*FM10	53	FM15	40
IO_HVS>50_2	IO HVS, TL<50; mittlere Stör'g	0.67*FM4+0.33*FM5	40	0.67*FM10+0.33*FM11	38	FM15	40
IO_HVS>50_3	IO HVS, TL<50; starke Stör'g	0.25*FM4+0.75*FM5	31	0.25*FM10+0.75*FM11	27	0.5*FM14+0.53FM15	31
IO_HVS1	IO HVS, Ortsdurchf.; ohne Stör'g	0.33*FM3+0.67*FM4	53	0.33*FM9+0.67*FM10	53	FM15	40
IO_HVS2	IO HVS, vorfahrtsber.; geringe Stör'g	0.7*FM4+0.3*FM5	40	0.7*FM10+0.3*FM11	39	0.67*FM14+0.33*FM15	28
IO_HVS3	IO HVS, vorfahrtsber.; mittlere Stör'g	0.5*FM4+0.5*FM5	36	0.5*FM10+0.5*FM11	33	FM14	22
IO_HVS4	IO HVS, vorfahrtsber.; starke Stör'g	0.85*FM5+0.15*FM6	24	0.85*FM11+0.15*FM12	19	0.5*FM13+0.5*FM14	19
IO_LSA1	IO HVS mit Lichtsign.; geringe Stör'g	0.5*FM4+0.5*FM5	36	0.5*FM10+0.5*FM11	33	FM14	22
IO_LSA2	IO HVS mit Lichtsign.; mittlere Stör'g	0.5*FM5+0.5*FM6	22	0.5*FM11+0.5*FM12	17	0.5*FM13+0.5*FM14	19
IO_LSA3	IO HVS mit Lichtsign.; starke Stör'g	0.17*FM5+0.83*FM6	19	0.17*FM11+0.83*FM12	15	FM13	16
IO_Kern	Innerortsstrassen im Stadtkern	FM6	17	FM12	14	FM13	16
IO_Nebenstr "dicht"	Nebenstr., dicht bebaut	0.67*FM6+0.33*FM17	15	0.67*FM12+0.33*FM12	13	0.5*FM13+0.5*FM 29	13
IO_Nebenstr "lock."	Nebenstr., locker bebaut	0.85*FM5+0.15*FM6	24	0.85*FM11+0.15*FM12	19	0.5*FM13+0.5*FM14	19
X: IO_Stop+Go	Innerortsstrassen mit Stop+Go	FM18	6	FM24	6	FM30	6

Anhang F Raffinerie

Anhang F.1 Allokationsfaktoren

Entsprechend [53] werden folgende Allokationsfaktoren für die einzelnen Aufwendungen gewählt:

◆ Rohölbedarf

Der massenmäßige Rohölbedarf $Roh_{i, Prozess}$ zur Herstellung eines Produkts i mit dem Heizwert $H_{u,i}$ in einer bestimmten Stufe errechnet sich aus dem prozentualen Massenanteil m_{pi} (in Prozent) der Gesamtmasse aller den Prozess verlassender Produkte, der Rohölinputmasse $m_{Rohöl}$, und dem durchschnittlichen unteren Heizwert $H_{u,durch}$ aller die Stufe verlassenden Produkte.

$$Roh_{i, Prozess} = \frac{m_{pi}}{100\%} \cdot m_{Rohöl} \cdot \frac{H_{u,i}}{H_{u,durch}} \quad (\text{Gleichung 8.1}),$$

mit

$$H_{u,durch} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{pi}}{100\%} \cdot H_{u,i} \quad (\text{Gleichung 8.2})$$

Damit wird einem Raffinerieprodukt abhängig von der produzierten Menge und seinem Energieinhalt die entsprechende Menge an Rohölverbrauch zugeordnet, d.h. der Rohölbedarf eines Produkts i wird nach dem unteren Heizwert alloziiert.

◆ Thermischer Energiebedarf (Brennstoffbedarf zur Unterfeuerung und Dampferzeugung)

Der thermische Energiebedarf $E_{i, Prozess}$ zur Herstellung eines Produkts i mit einer Masse m_i in einem Verarbeitungsprozess errechnet sich über den gesamten Energiebedarf der Stufe

$E_{ges, Prozess}$ nach:

$$E_{i, Prozess} = E_{ges, Prozess} \cdot \frac{m_i}{\sum_{n=1}^i m_n} = E_{ges, Prozess} \cdot \frac{m_{pi}}{100\%} \quad (\text{Gleichung 8.3})$$

Der benötigte thermische Energiebedarf, den ein Produkt durch seine Herstellung verursacht, wird entsprechend seinem Massenanteil an der durch die Stufe geführten Gesamtmasse ermittelt.

◆ Strombedarf

Der Strombedarf $St_{i, Prozess}$ zur Herstellung eines Produkts i mit einer Masse m_i in einem Verarbeitungsprozess errechnet sich analog dem thermischen Energiebedarf über den gesamten Strombedarf der Stufe $St_{ges, Prozess}$ nach:

$$St_{i, Prozess} = St_{ges, Prozess} \cdot \frac{m_i}{\sum_{n=1}^i m_n} = St_{ges, Prozess} \cdot \frac{m_{pi}}{100\%} \quad (\text{Gleichung 8.4})$$

Das entspricht ebenfalls einer Allokation nach Masse .

Anhang G Ermittlung H₂ Verbrauchsfunktion

Die Berechnung wurde mit Messwerten aus den in Kapitel 5.5.3 erwähnten Messfahrten [47] nach dem Ansatz von CERWENKA ET AL. [123] durchgeführt.

$$k = F(v) * G(s) * H(J) \quad \text{Gleichung G.1}$$

Dabei sind in Gleichung I.1:

k der Emissionsfaktor, $F(v)$ der Einfluss der Geschwindigkeit v , $G(s)$ der Einfluss der Längsneigung s und $H(J)$ der Einfluss des Betrachtungsjahres, der hier aber nicht betrachtet wird, da mangels Werten und Erfahrungen kein Einfluss des Alters auf den Kraftstoffverbrauch angenommen werden kann, d.h. $H(J) = 1$.

Für den Einfluss der Geschwindigkeit v wird bei [123] die Funktion:

$$F(v) = a_0 + a_1 * v^2 + \frac{a_2}{v} \quad \text{Gleichung G.2}$$

angegeben. Hierbei sind a_0 , a_1 , und a_2 Koeffizienten, die sich aus der Lösung eines linearen Gleichungssystems (siehe Gleichung G.4) ergeben, v ist die Geschwindigkeit. Für den Einfluss der Längsneigung wird nicht der Ansatz von [58] verwendet, sondern ein gewöhnliche e-Funktion der Form:

$$G(s) = e^{c*s} \quad \text{Gleichung G.3}$$

benutzt. Die Längsneigung bekommt so einen stärkeren Einfluss auf den Verbrauch, als mit dem ursprünglichen Ansatz von [123]. In dieser Gleichung ist s Steigung, c ist ein Koeffizient, der sich aus der Lösung eines linearen Gleichungssystems ergibt (siehe Gleichung G.5). Die Koeffizienten a_0 , a_1 , und a_2 werden unter der Randbedingung Steigung $s = 0$, wodurch $G(s) = 1$ wird, aus messtechnisch ermittelten Verbrauchswerten bei variabler Geschwindigkeit durch Lösen eines linearen Gleichungssystems errechnet. Anschließend wird aus Messwerten, die in der Tabelle G.1 dargestellt sind, bei variabler Steigung der Wert für c ermittelt.

Tabelle G.1: Messwerte Wasserstoffverbrauch Linie 42 & Esslingen-Zyklus

	<u>% Steigung</u> <u>Durchschnitt</u>	<u>km/h</u> <u>Durchschnitt V</u>	<u>l DÄ/100 km</u> <u>Verbrauch auf 100 km</u>	<u>v²</u>	<u>1/v</u>	<u>F</u>
Linie 42	-4,37 %	14,31	48,98	204,78	0,07	48,98
	-3,70 %	15,78	47,03	249,01	0,06	47,03
	-3,16 %	14,3	51,11	204,49	0,07	51,11
	-2,99 %	14,92	49,87	222,61	0,07	49,87
	-1,71 %	11,12	66,35	123,65	0,09	66,35
	1,72 %	13,46	75,45	181,17	0,07	75,45
	2,65 %	16,96	73,59	287,64	0,06	73,59
	3,20 %	14,8	85,74	219,04	0,07	85,74
	3,73 %	17,63	113,46	310,82	0,06	113,46

	<u>% Steigung</u> <u>Durchschnitt</u>	<u>km/h</u> <u>Durchschnitt V</u>	<u>l DÄ/100 km</u> <u>Verbrauch auf 100 km</u>	<u>v²</u>	<u>1/v</u>	<u>F</u>
	3,87 %	18,23	77,25	332,33	0,05	77,25
	4,37 %	14,2	89,55	201,64	0,07	89,55
Esslin- gen	0,13 %	29,35	44,83	861,42	0,03	44,83
	0,17 %	22,06	55,91	486,64	0,05	55,91
	0,41 %	16,52	65,97	272,91	0,06	65,97
	3,14 %	15,29	87,93	233,78	0,07	87,93
	-4,34 %	31,42	16,36	987,22	0,03	16,36
	-0,31 %	29,64	39,36	878,53	0,03	39,36
	-0,11 %	22,42	41,81	502,66	0,04	41,81

Das folgende lineare Gleichungssystem muss für Messwerte bei einer Steigung von 0 % gelöst werden, um die Koeffizienten a_0 , a_1 , und a_2 zu erhalten.

$$\left\{ \begin{array}{l} 44,83 = a_0 + a_1 * 861,42 + \frac{a_2}{29,35} \\ 55,91 = a_0 + a_1 * 486,64 + \frac{a_2}{22,06} \\ 65,97 = a_0 + a_1 * 272,91 + \frac{a_2}{16,52} \end{array} \right\} \text{ für Steigung } s = 0\% \quad \text{Gleichung G.4.}$$

Daraus ergibt sich für $F(v) = a_0 + a_1 * v^2 + \frac{a_2}{v}$, $s = 0$

a_0	a_1	a_2
44,84	-0,017	424,43

Der Einfluss der Steigung wurde ebenfalls aus den Messwerten für unterschiedliche Steigungswerte errechnet. Die Gleichung G.1 wurde dafür nach c aufgelöst. Für alle Messwerte wurde die gesamte Gleichung gelöst, aus diesen Werten für c wurde schließlich ein Mittelwert gebildet. Beispielphaft wurde nachfolgend die Gleichung für c_1 ⁸⁷ aufgestellt und gelöst:

$$c = \frac{\ln(a_0 + a_1 * v^2 + \frac{a_2}{v}) - \ln(k)}{s}, \quad s \neq 0 \quad \text{Gleichung G.5.}$$

$$c_1 = \frac{\ln(44,84 + (-0,017) * 14,31^2 + \frac{424,43}{14,31}) - \ln(48,98)}{-0,0437} = 8,5245 \quad \text{Gleichung G.6}$$

Der Mittelwert ergibt sich schließlich aus den Werten $c_1 - c_{18}$ zu $c = 9,6402$.

Das ergibt schließlich folgende Gleichung für den steigungs- und geschwindigkeitsabhängigen Wasserstoffverbrauch in der Form:

$$k = F(v) * G(s) = \left(a_0 + a_1 * v^2 + \frac{a_2}{v} \right) * e^{c*s} = \left(44,84 + (-0,017) * v^2 + \frac{424,43}{v} \right) * e^{9,6402*s}$$

⁸⁷ 1 entspricht hier Abschnitt 1 der Linie 42. Die Linie 42 hat insgesamt 18 Abschnitte.

Aus dieser Gleichung wurden schließlich, um dieselbe Form wie die anderen Emissionsfaktoren zu haben, folgende Emissionsfaktoren ermittelt:

Tabelle H.2: Wasserstoffverbrauch in Abhängigkeit der Steigung und der Geschwindigkeit

VS	V _{VS}	-6 %	-5 %	-4 %	-3 %	-2 %	-1 %	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %
IO_Stop+Go	6,3	73,7	80,8	88,7	97,3	106,7	117,0	128,3	140,8	154,4	169,4	185,8	203,8	223,8
IO_gebunden	10,5	56,8	61,5	66,7	72,2	78,3	84,8	91,9	99,6	108,0	117,0	126,9	137,5	149,3
IO_Nebenstr_dicht	13,1	50,6	54,9	59,4	64,4	69,8	75,7	82,0	88,9	96,3	104,4	113,2	122,7	133,3
IO_Kern	15,6	46,1	50,0	54,2	58,7	63,6	68,9	74,7	81,0	87,8	95,1	103,1	111,8	121,6
IO_HVS4	18,5	42,1	45,6	49,4	53,6	58,1	62,9	68,2	73,9	80,1	86,8	94,2	102,1	111,3
IO_HVS3	21,4	38,7	41,9	45,4	49,2	53,3	57,8	62,7	67,9	73,6	79,8	86,6	93,9	102,5
IO_HVS2	27,3	35,3	38,3	38,2	41,4	44,9	48,7	52,8	57,2	62,0	67,2	73,1	79,2	96,3
IO_HVS>50_3	30,3	33,6	36,5	34,7	37,7	40,8	44,2	47,9	51,9	56,3	61,0	66,5	72,0	93,2
IO_HVS>50_2	39,3	28,9	31,3	24,2	26,2	28,4	30,8	33,4	36,2	39,3	42,6	46,7	50,6	84,5

Die Beladung wurde mit dem Faktor, der sich aus der Ermittlung des Faktors bei den Dieselnbussen ableitet [74], berücksichtigt. Dies ergibt folgende Faktoren, mit denen die Emissionen bei halber Beladung multipliziert werden, um die Werte für die volle und die halbe Beladung zu bekommen:

Multiplikationsfaktor Beladung		
leer	halbvoll	voll
0,850	1	1,155

Anhang H Ergebnisse der Anwendungsbeispiele

Anhang H.1 Antriebstechnologievergleich

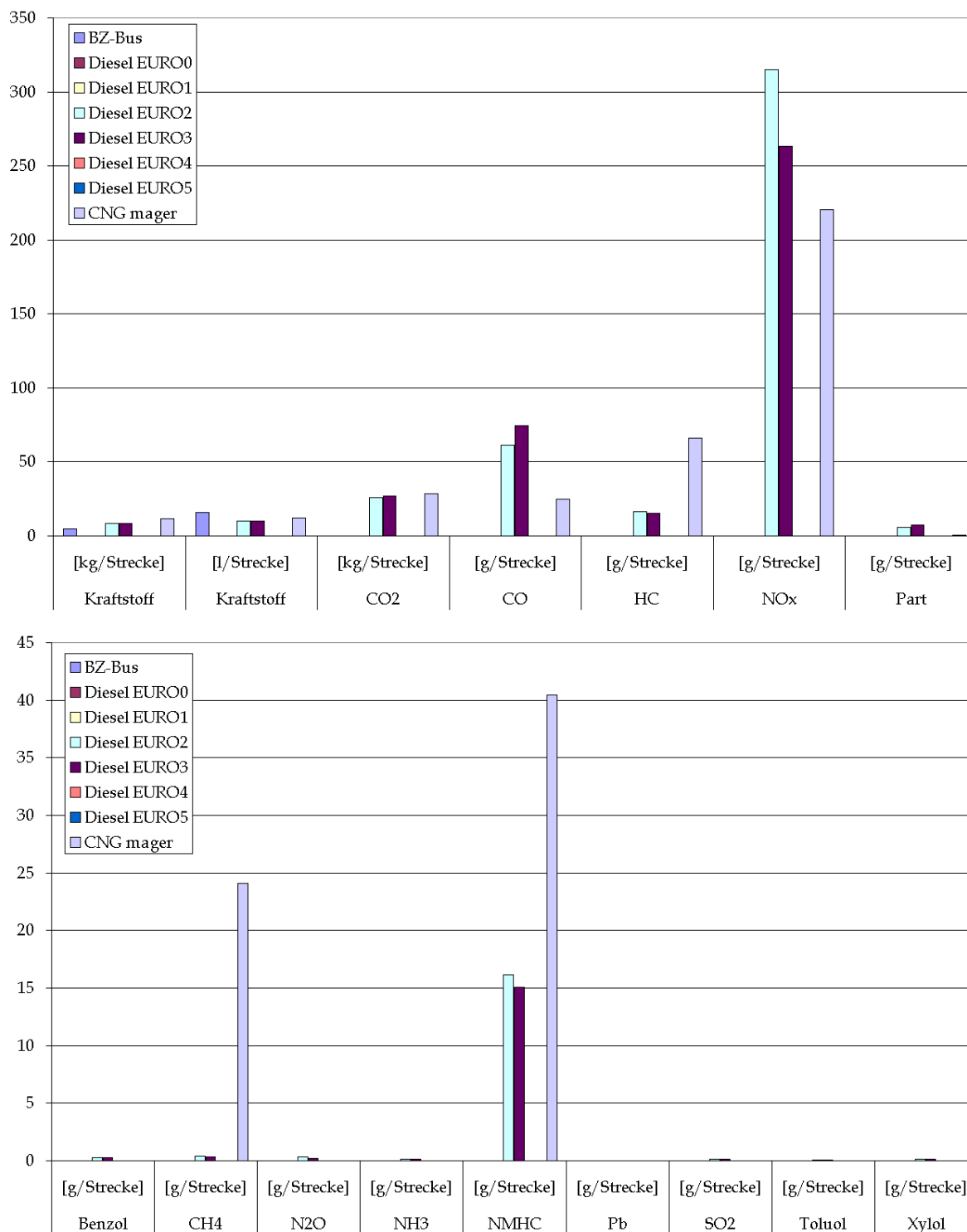




Abbildung I.1: Emissionen des Busbetriebs auf Linie 42 (einmaliges Abfahren der Strecke)

88

⁸⁸ Die jeweils linke Säule gibt den Wert für den BZ Bus wieder, nach rechts folgen die einzelnen Dieselfahrzeuge und schließlich stellt die Säule ganz rechts jeweils den CNG Wert dar.

Anhang H.2 Analyse einer Flotte

Tabelle I.2 Angaben des Busflottenbetreibers STCP (Umfrage im Rahmen des CUTE Projektes)

		C U T E				
Datasheet about Fleet and City Characteristics						
City and Operating company		Porto - STCP, S.A.				
City Characteristics						
Topographical Map for planned FC bus routes		Annex				
Average route length [km]		8.400 m				
Fleet Characteristics (2002) - status quo		Diesel		Natural Gas		
		solo-bus	articulated bus	solo-bus	articulated bus	
Number of busses		344	64	175		
Total fuel consumed by the fleet in 2002 (please state unit) if you do not have specific numbers for solo and articulated buses, please give an estimation of the specific shares		10.600.000 lt	2.000.000 lt	5.400.000 m3		
Total milage of the fleet in km per year		20.800.000 km	3.300.000 km	7.700.000 km		
Average Utilization [persons per bus or %]		31,20%	31,20%	31,20%		
Average Milage [km per bus per year]		55.000 km	55.000 km	55.000 km		
Average Age of the bus fleet		6,8	16,2	1,2		
Fleet share with EURO 1 [% or absolute numbers]	total	175				
	share with oxidation catalyst					
	share with particle filter					
	share with oxidation catalyst and particle filter					
	other exhaust gas treatments					
Fleet share with EURO 2 [% or absolute numbers]	total	75				
	share with oxidation catalyst					
	share with particle filter					
	share with oxidation catalyst and particle filter					
	other exhaust gas treatments					
Fleet share with EURO 3 [% or absolute numbers]	total			75		
	share with oxidation catalyst					
	share with particle filter					
	share with oxidation catalyst and particle filter					
	other exhaust gas treatments					
Fleet share with EURO 4 [% or absolute numbers]	total			100		
	share with oxidation catalyst					
	share with particle filter					
	share with oxidation catalyst and particle filter					
Fleet share rest [%], please specify		94	64			
Future scenarios if you do not have target-numbers, please enter estimations and indicate so	year		2008	2015	2020	
	FC	solo-bus	0	20 est.	100 est.	
		articulated bus				
	Diesel	solo-bus	225	225 est.	200 est.	
		articulated bus				
	Natural gas	solo-bus	225	225 est.	200 est.	
articulated bus						

