



Diplomarbeit

Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr und deren Auswirkung auf die Treibhausgas-Emissionen bis 2020

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Maximilian Kloess

und

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Reinhard Haas

ausgeführt am Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft
der Technischen Universität Wien

von

Ernst Höckner

0125612

Jägerstraße 3/8, 1200 Wien

Danksagung

Die Diplomarbeit stellt für mich den Abschluss eines arbeits- und lernintensiven Abschnitts meines Lebens dar. Mit „intensivem Lernen“ assoziiere ich nicht nur die zahlreichen Stunden, die ich in das Lösen kryptischer Gleichungen und das Nachvollziehen technischer Zusammenhänge investierte. Es ist nämlich nicht immer leicht, Rückschläge, die man erfährt, wegzustecken und trotzdem mit voller Energie wieder durchzustarten. Gerade diese Fähigkeit ist aber vielleicht sogar die wichtigste Lektion, die mich dieses Studium lehrte.

Zuallererst möchte ich meinen Eltern, Ernst und Ernestine, einen besonderen Dank aussprechen. Sie haben mir durch ihre Unterstützung das Studium überhaupt erst ermöglicht. Die Gewissheit des familiären Rückhalts, egal in welchen Lagen, erleichterte mir mein Fortkommen ungemein.

Auch meine Freunde, Geschwister und Kollegen, die mich während des Studiums begleiteten und für Zerstreuung sorgten, erwiesen sich dadurch als große Stütze.

Weiters möchte ich mich bei meinen Betreuern dieser vorliegenden Arbeit, DI Maximilian Kloess und Prof. Dr. Reinhard Haas, bedanken. Sie räumten mir bei der Gestaltung viele Freiheiten ein und standen bei Fragen stets hilfreich zur Seite.

Herrn Mag. Johann Hofer möchte ich für das Korrekturlesen und für die wertvollen Hinweise danken.

Last but not least möchte ich noch ein Wort der Anerkennung an meine Freundin, Petra Hofer, richten, die mich während des ganzen Studiums begleitete. Ihr sonniges Gemüt hat mich in guten Zeiten erfreut und in schwierigen aufgemuntert. Ich bedanke mich für das Verständnis, das sie mir und meinen im Stress nicht immer einfachen Stimmungslagen entgegenbrachte.

Kurzfassung

Die Zahl der Lastkraftwagen in Österreich und die jährlichen Transportleistungen steigen seit dem Ende des Zweiten Weltkrieges kontinuierlich. Es ist auch in Zukunft von einem weiteren Anstieg auszugehen. Damit einher geht ein stetiger Anstieg der Treibhausgasemissionen im Güterverkehrssektor.

Anfangs werden der Straßengüterverkehr in Österreich und der konventionelle Antrieb untersucht, um somit die Voraussetzung für alternative Antriebskonzepte für Lastkraftwagen in absehbarer Zukunft auszuloten.

Für eine Emissions-Trendwende im Antriebsbereich sind zwei grundsätzliche Konzepte möglich. Man kann entweder auf alternative Kraftstoffe in gewohnten Verbrennungskraftmaschinen oder auf die Verwendung elektrischer Antriebe setzen.

Alternative Kraftstoffe sind bereits jetzt in vielfältiger Form verfügbar. Es wird herausgearbeitet, inwiefern welche Kraftstoffe in naher Zukunft für den Straßengüterverkehr eine Rolle spielen könnten. Ökologische Betrachtungen und Wirtschaftlichkeit stellen weitere wesentliche Punkte jedes behandelten Kraftstoffes dar. Während der Fokus flüssiger Biokraftstoffe bei der Beimengung bleiben wird, ist CNG mit weiterem technischem Fortschritt eine mögliche Alternative.

Die Perspektiven elektrischer Antriebe in Lastkraftwagen sind durchaus ambivalent. Ohne zusätzlichen Verbrennungsmotor ist vor allem die Energiespeicherung in reinen Batteriefahrzeugen das Hauptproblem. Heutige Batterien sind teuer und lassen noch keine großen Reichweiten zu. Für hybrid-elektrische Nutzfahrzeuge, welche mit kleineren Batterien das Auslangen finden, sind die Aussichten positiver.

Der Einsatz alternativer Antriebssysteme wird in Zukunft stark vom jeweiligen Einsatzgebiet abhängen. Beispielsweise lassen sich im Stadtverkehr und im Güternahverkehr derlei Konzepte viel eher einbringen als im Fernverkehr. Es wird nicht nur *eine* mögliche Lösung geben, wie bisher der Dieselmotor; vielmehr spricht vieles für eine allgemeine Diversifikation.

Im letzten Abschnitt werden selbst erstellte Emissionsszenarien präsentiert, die nahe legen, dass bei realistischer Abschätzung die Treibhausgasemissionen bis 2020 nicht reduziert werden können. Man muss eher danach trachten, den zu erwartenden Anstieg möglichst gering zu halten. Außerdem sind Maßnahmen, die im Sinne konventioneller Effizienzsteigerungen und/oder der Reduzierung des Anstiegs der Transportleistung wirken, bis 2020 effektiver als die Substitution durch alternative Antriebskonzepte.

Abstract

Since the end of the Second World War the numbers of trucks and transportations in Austria have steadily increased and will do so in the near future. This fact outlines severe threats in terms of the forthcoming greenhouse gas emissions caused by the transportation sector.

At the beginning of the diploma thesis at hand the road freight transport and conventional drives will be examined to get an understanding of different propulsion concepts. The reduction of greenhouse gas emissions in technical terms can be addressed in two ways, either by changing the fuel of the conventional combustion engines or by installing electric drives.

Alternative fuels are already available in various forms. The paper analyses what kind of fuel could play an important role in future road freight transport. Ecological and economic reflections are further points of interests of every discussed fuel. Concerning biofuels the reader is led to the conclusion that the application might only be successful in particular niche markets and as admixtures to conventional fuels. On the other hand, as the technological progress of gas storage devices advances CNG has the potential of being an economic alternative to conventional trucks.

The prospects of electric drives in trucks are ambivalent. Without the advantages of combustion engines the electric trucks suffer from severe energy-storage problems. Modern battery systems are expensive and still do not permit appropriate operating ranges. As hybrid-electric trucks get along with batteries of smaller scale the perspectives are more promising.

The choice of a specific drive system will strongly depend on the field of operation. For instance, alternative concepts are far more likely to be implemented in urban traffic than in long haul transportation. Diversification will take place, which means there will not be *one* single solution for all the different transportation applications like the diesel engine has been in the past.

In the last chapter home-made emission scenarios are presented, which suggest that greenhouse gas emissions probably can not be reduced until 2020. The future challenge is to restrict the escalation.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Kurzfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis.....	5
1. Einleitung	10
1.1 Motivation	10
1.2 Problemstellung.....	12
1.3 Gliederung.....	13
2. Straßengüterverkehr in Österreich	14
2.1 Der Siegeszug der Straße.....	15
2.2 Definitionen im Straßengüterverkehr	18
2.2.1 Fuhrgewerbe und Werkverkehr.....	18
2.2.2 Nah- und Fernverkehr	20
2.2.3 Einteilung nach Versand- und Empfangsort.....	20
2.3 Bestandsanalyse.....	21
2.3.1 Historischer LKW-Bestand	21
2.3.2 LKW-Bestand 2008	21
2.3.3 Bestand nach Antriebsart	22
2.3.4 Werkverkehr - Fuhrgewerbe	23
2.4 Transportaufkommen und Transportleistung	24
2.5 Transportweiten	28
2.6 Treibhausgas-Emissionen	31
3. Konventionelle Antriebe	36
3.1 Dieselmotor	37
3.1.1 Anforderungen und Auslegungskriterien.....	37
3.1.2 Unterschied Ottomotor - Dieselmotor.....	39
3.1.3 Arbeitsweise	40
3.1.4 Aufbau	41

3.2 Dieselkraftstoff.....	46
3.3 Abgase und Normen.....	47
3.3.1 Abgase.....	47
3.3.2 Abgasnormen in der EU.....	49
3.4 Weitere Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung.....	50
4. Alternative Kraftstoffe.....	53
4.1 Biodiesel.....	55
4.1.1 Eigenschaften und Herstellung.....	55
4.1.2 Ökologische Betrachtungen.....	57
4.1.3 Kosten.....	58
4.1.4 Fazit.....	60
4.2 Ethanol.....	61
4.2.1 Herstellung.....	61
4.2.2 Eigenschaften.....	63
4.2.3 Ökologische Betrachtungen.....	64
4.2.4 Kosten.....	66
4.2.5 Einsatzbeispiele.....	67
4.2.6 Fazit.....	68
4.3 Erdgas – CNG.....	70
4.3.1 Eigenschaften und Förderung.....	70
4.3.2 Technik.....	72
4.3.2.1 Monovalent – Bivalent.....	72
4.3.2.2 CNG – Speicherung.....	72
4.3.2.3 Motor.....	73
4.3.2.4 Infrastruktur.....	75
4.3.2.5 Tanken.....	76
4.3.3 Ökologische Betrachtungen.....	78
4.3.4 Kosten.....	80
4.3.5 Einsatzbeispiele.....	81
4.3.5.1 Mercedes Sprinter 316 NGT.....	81
4.3.5.2 Mercedes Econic NGT.....	84
4.3.6 Fazit.....	87

4.4 Flüssiggas – LPG.....	88
5. Elektrische Antriebe	90
5.1 Batterie-elektrische Nutzfahrzeuge	92
5.1.1 Energiespeicher.....	92
5.1.1.1 Prinzip einer elektrochemischen Zelle.....	93
5.1.1.2 Bleibatterien (Pb)	95
5.1.1.3 Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH).....	96
5.1.1.4 Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion)	98
5.1.1.5 Natrium-Nickelchlorid-Batterien (Na/NiCl ₂ , ZEBRA)	99
5.1.1.6 Doppelschichtkondensatoren (Ultra- oder Supercaps)	101
5.1.2 Elektromotoren	103
5.1.2.1 Asynchronmaschine (ASM).....	105
5.1.2.2 Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM)	105
5.1.2.3 Switched Reluctance Machine (SRM).....	106
5.1.2.4 Vergleich.....	107
5.1.3 Einsatzbeispiele	108
5.1.3.1 EcoCarrier EL.....	108
5.1.3.2 Nautilus E-30.....	109
5.1.4 Perspektiven.....	110
5.2 Hybrid-elektrische Nutzfahrzeuge.....	112
5.2.1 Strukturvarianten	113
5.2.1.1 Paralleler Hybridantrieb	113
5.2.1.2 Serieller Hybridantrieb.....	115
5.2.1.3 Mischformen	117
5.2.2 Komponenten.....	117
5.2.3 Betriebsstrategien	118
5.2.4 Einsatzbeispiele	120
5.2.4.1 MAN Ultracap-Bus	120
5.2.4.2 Nissan Atlas Hybrid	123
5.2.5 Fazit	126
6. THG-Emissions-Szenarien	127
6.1 Methodisches Vorgehen.....	127

6.1.1 Inhaltliche Abgrenzung.....	128
6.1.2 Zeitlicher und regionaler Bezug.....	128
6.1.3 Datengrundlage	128
6.1.4 Vereinfachende Annahmen	129
6.1.5 Eingabe-Parameter	130
6.1.6 Emissionshochrechnung des Excel-Programms:.....	131
6.2 Nr. 1: Business as Usual.....	137
6.2.1 Annahmen	137
6.2.2 Ergebnis	138
6.2.3 Interpretation	139
6.3 Nr.2: Ökologisches Szenario	140
6.3.1 Annahmen	140
6.3.2 Ergebnis	142
6.3.3 Interpretation	143
6.4 Nr. 3: Versuch einer realistischen Abschätzung.....	144
6.4.1 Annahmen	144
6.4.2 Ergebnis	145
6.4.3 Interpretation	146
6.5 Vergleich der drei Szenarien.....	147
6.6 Weiterführende Vergleiche.....	150
6.6.1 Effekt alternativer Antriebe und Kraftstoffe	151
6.6.2 Effekt steigender Nutzfahrzeugzahlen	153
6.6.3 Effekt konventioneller Effizienzsteigerungsmaßnahmen	155
6.7 Fazit	157
7. Schlussfolgerungen	159
7.1 Die Ausgangssituation	159
7.2 Einzelne Antriebskonzepte	160
7.3 Treibhausgas-Emissionen	163
Quellenverzeichnis.....	164
Abkürzungsverzeichnis.....	175
Abbildungsverzeichnis.....	176
Tabellenverzeichnis.....	179

Anhang.....	182
Szenario 1: Business as Usual	182
Szenario 2: Ökologisches Szenario.....	183
Szenario 3: Versuch einer realistischen Abschätzung.....	184

1. Einleitung

1.1 Motivation

Der Straßengüterverkehr besitzt in Österreich einen hohen Stellenwert und steigert immer noch seine Anteile im Güterverkehrsaufkommen. Schädigende Einflüsse auf die Umwelt sind die Folge, die Treibhausgasemissionen steigen stark an. Um diesem Trend entgegenzuwirken und im Kampf gegen den Klimawandel Fortschritte zu erzielen, sind also auch im Transportsektor vielerlei Handlungen von Nöten. Effizienzsteigerungen der konventionellen Antriebe in PKWs und LKWs sind wichtige Etappenziele, aber nur erste Schritte. Es ist unerlässlich, sich auch Gedanken über umweltfreundlichere Antriebsarten im Straßengüterverkehr zu machen, die auf konventionelle Kraftstoffe verzichten, zumindest aber den Bedarf einschränken. Bisher wurde die Entwicklung alternativer Antriebskonzepte sowohl für den Personenverkehr als auch für den Straßengüterverkehr stark vernachlässigt. Man ist in beiden Bereichen – vor allem aber im Bereich der Nutzfahrzeuge – kaum über das Versuchsstadium hinausgekommen.

Eine Studie des UMWELTBUNDESAMTES [Q 1] zeigt die Problematik auf: Der Energieverbrauch und somit die Treibhausgasemissionen im Sektor „Verkehr“ haben in den letzten Jahren – trotz Österreichs Verpflichtungen im Rahmen des Kyoto-Protokolls – dramatisch zugenommen. Im gesamten Verkehrssektor ist es im Zeitraum 1990 bis 2003 zu einem Anstieg der Kohlendioxid-Emissionen von 83% gekommen. Während Personenkraftwagen einen Anstieg von 41% zu verantworten haben, haben sich die CO₂-Emissionen im LKW-Verkehr mehr als *verdreifacht* (+205%). In der Abb.1.1 ist ersichtlich, wie ein immer größer werdender Anteil der Schadstoffe im Verkehrssektor zu Lasten der LKWs geht.

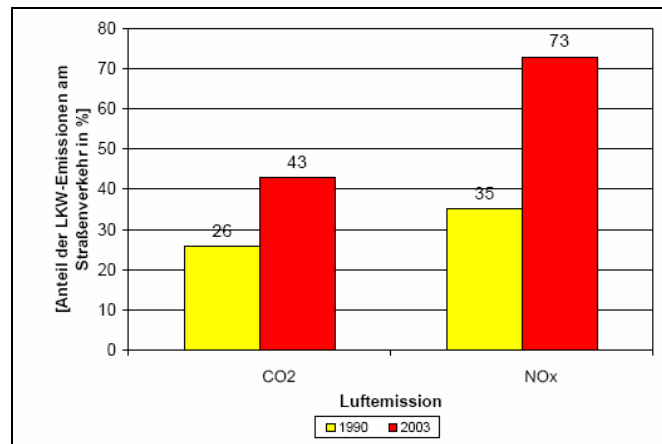


Abb.1.1: Anteil der LKWs an den Emissionen im Straßenverkehr Österreichs; Quelle: [Q 1]

Eine weitere Triebfeder neben dem Umweltschutz ist die Verknappung des Rohstoffes Mineralöl. Von Shell veröffentlichte Studien sprechen davon, dass die maximale Förderleistung von Rohöl in wenigen Jahren bereits erreicht werden wird. Berechnungen zufolge ergäbe sich somit eine statische maximale Reichweite von noch etwa 40 Jahren. „Statisch“ bedeutet in diesem Fall, dass man von einem gleich bleibenden Verbrauch in der Zukunft ausgeht. Da aber – angetrieben durch das starke Wirtschaftswachstum vor allem in Asien – der weltweite Rohöhlunger noch weiter ansteigen wird, ist mit einer deutlich früheren Rohölverknappung und dramatischen Treibstoff-Preissteigerungen zu rechnen. Je länger die Industrienationen in Europa von Rohölimporten abhängig sind, umso größer ist die Gefahr negativer Auswirkungen auf den gewohnten Wohlstand. (Vgl. [Q 2])

Diese Überlegungen legen eine möglichst frühzeitige Entwicklung alternativer Antriebssysteme nahe.

1.2 Problemstellung

Der Straßengüterverkehr ist wesentlich für den Anstieg des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen im Verkehrsbereich verantwortlich. Ein Ansatz dieser Entwicklung zu begegnen, stellen effiziente Antriebstechnologien und alternative Antriebe dar.

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist es, dem Leser zu vermitteln, welche Antriebsformen für den Straßengüterverkehr in Frage kommen und zu klären, welche kurz- und mittelfristig die besten Zukunftsperspektiven bieten. Dazu ist es notwendig, im Vorhinein den österreichischen Straßengüterverkehr systematisch zu untersuchen. Im Weiteren soll anhand eines einfachen Modells für verschiedene Fälle aufgezeigt werden, wie sich die Emissionen im Straßengüterverkehr bis ins Jahr 2020 entwickeln könnten.

Die Aufgabenstellungen im Einzelnen:

- Untersuchung der historischen Entwicklung des Straßengüterverkehrs in Österreich
- Untersuchung des Ist-Zustands des Straßengüterverkehrs
- Marktanalyse in Hinblick auf die Antriebstechnologien
- Technische und ökonomische Analyse der einzelnen Antriebstechnologien
- Abschätzung der Zukunftsperspektiven der einzelnen Antriebstechnologien
- Erstellung eines einfachen Modells und einiger plausibler Szenarien zur Berechnung der mögliche Entwicklung auf die LKW-Emissionen

Methodisch fanden bei der umfangreichen Ausarbeitung eingehende Literatur- und Internetrecherchen Anwendung. Das Modell wurde in Microsoft Excel 2003 erstellt.

1.3 Gliederung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf große Themenblöcke.

Den Anfang bildet in Kapitel 2 eine eingehende Analyse des Güterverkehrs im Allgemeinen und des Straßengüterverkehrs im Speziellen. Ziel der Betrachtung bleibt dabei immer Österreich. Neben einer LKW-Bestandsanalyse, werden wichtige Maßzahlen des Straßengüterverkehrs, wie Transportaufkommen, Transportleistung und Schadstoffemissionen, untersucht. Dieser Abschnitt stellt die Grundlage für die weiteren Betrachtungen dar.

Konventionelle Antriebe sind das Thema des dritten Kapitels. Alternative Antriebssysteme werden immer an ihnen und ihrem Entwicklungsstand gemessen werden. Nachdem Dieselmotoren und der Dieselkraftstoff wohl auch in Zukunft eine Rolle spielen werden, werden sie hier vorgestellt. Weitere Punkte in diesem Abschnitt sind die Abgasnormen der EU und allgemeine Effizienzsteigerungsmaßnahmen, die bei jedem LKW zu Reduktionen beim Treibstoffverbrauch führen können.

Kapitel 4 behandelt die alternativen Kraftstoffe. Dabei bleibt das Prinzip des Verbrennungsmotors erhalten. Es werden die spezifischen Vor- und Nachteile von Biodiesel, Ethanol, Erdgas und LPG als Treibstoff im Straßentransportsektor aufgezeigt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die ökologischen Folgen eines Masseneinsatzes und ökonomische Faktoren wie Umrüst-, Treibstoff- und Anschaffungskosten gelegt. Aktuelle Einsatzbeispiele demonstrieren die jeweilige Praxistauglichkeit.

Im fünften Kapitel spielen elektrische Antriebe die Hauptrolle. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen wird der Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor ersetzt, während hybrid-elektrische Fahrzeuge nicht auf die Vorzüge des Verbrennungsmotors verzichten. Beide Systeme werden diskutiert und die Einsatztauglichkeit im Straßentransport unter anderem anhand von Einsatzbeispielen untersucht. Bestimmend für den Erfolg sind dabei die Eigenschaften und Kosten der Batterien und der Elektromotoren. Deren verschiedene Funktionsprinzipien und deren Stand der Technik werden deshalb im Rahmen dieses Kapitels präsentiert.

Zur Abrundung des Themenkomplexes sind im sechsten Kapitel vier LKW-Emissions-Szenarien erstellt worden. Zu diesem Zweck wurde ein einfaches Excel-Modell angefertigt. Auf Grundlage der in den vorhergehenden Kapiteln ermittelten Daten wird so die Entwicklung der LKW-Emissionen in Österreich bis zum Jahr 2020 abgeschätzt. Somit soll ein Gefühl für das Emissions-Minderungspotenzial alternativer Antriebe im Straßengüterverkehr vermittelt werden.

Den Abschluss bildet eine Schlussfolgerung, die die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammenfasst.

2. Straßengüterverkehr in Österreich

In dem nun folgenden Abschnitt wird der österreichische Transportsektor unter die Lupe genommen. Ausgehend von einigen Definitionen und Einteilungsarten wird eine eingehende Bestandsanalyse durchgeführt. Anhand der Transportleistungen in den jeweiligen Kategorien lassen sich wichtige Rückschlüsse auf das Potenzial alternativer Antriebe ziehen. Weiters wird noch auf die Emissionen im Straßenverkehr eingegangen. Mithilfe dieser Informationen lässt sich abschätzen, welches Potenzial an Schadstoffeinsparungen es gibt. Somit bildet dieses Kapitel die Grundlage für die weiteren Ausführungen der Arbeit.

2.1 Der Siegeszug der Straße

Es gibt im Wesentlichen fünf Verkehrsmittel, um Waren oder Rohstoffe von einem Ort an einen anderen zu bringen. Den LKW, die Bahn, das Schiff, das Flugzeug und die Pipeline. Für die meisten produzierenden Unternehmen kommen nur die Straße und die Schiene in Betracht. Historisch betrachtet hat sich der Fokus des Güterverkehrs in Österreich seit dem Ende des Zweiten Weltkrieges stark von der Schiene auf die Straße verschoben (siehe Abb. 2.1). War kurz nach dem Zweiten Weltkrieg die Schiene mit 82 Prozent noch der bei weitem dominierende Transportweg, so hat sich das Verhältnis über die Zeit beinahe umgedreht. Im Jahr 2005 hatte die Schiene nur noch einen Anteil von 34 Prozent im Vergleich zur Straße mit 66 Prozent; wohlgermerkt bei gleichzeitig stark steigendem Gesamttransportvolumen (siehe später).

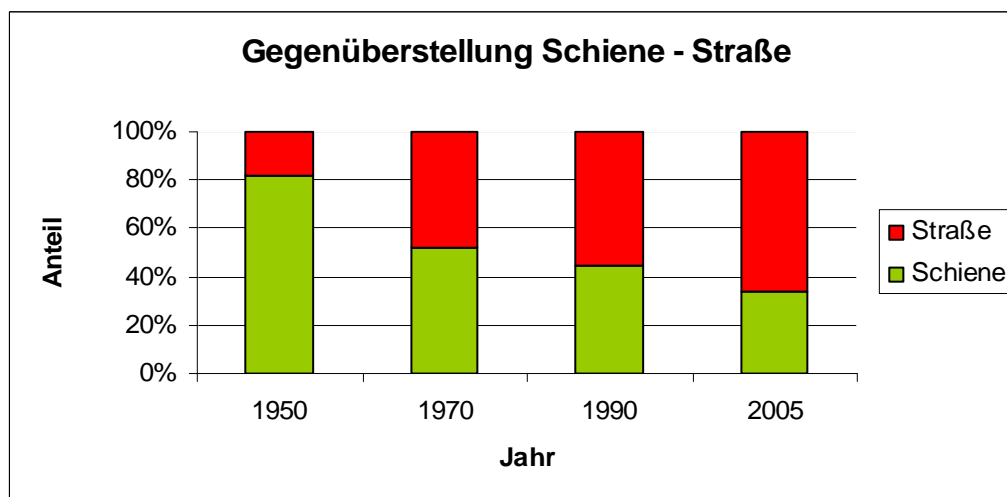


Abb. 2.1: Anteil von Straßen- und Schienengüterverkehr im direkten Vergleich; eigene Darstellung, Quelle: [Q 214]

Auch in Deutschland erfolgte eine ähnliche Entwicklung: Im Jahr 1950 lag der Verkehrsanteil der Straße im Güterverkehr, gemessen in tkm (Tonnenkilometer, siehe Abschnitt 2.4), noch bei etwa 20%, während er 1997 bereits über zwei Drittel ausmachte. Im selben Zeitraum ist der Anteil der Bahn von 56% auf nur mehr 16% gesunken; Schifffahrt und Pipelines leisten nur einen kleinen Teil. [Q 3]

Dieses Muster ist in beinahe allen industrialisierten Ländern erkennbar.

Man kann also durchaus von einem Strukturwandel sprechen, der auf verschiedene Gründe zurückzuführen ist. Warum ist der LKW unter all den Transportmitteln über die letzten Jahrzehnte so dominant geworden?

ABERLE beantwortet diese Frage in [Q 4] im Wesentlichen mit vier Effekten, die im Laufe der Zeit zum Tragen gekommen sind. Sie werden in Folgendem kurz beschrieben.

Substitutionseffekt:

Sowohl im Personen- als auch speziell im Güterverkehr ist seit Mitte des letzten Jahrhunderts ein Trend vom öffentlichen Verkehr zu individuellen Verkehrsmitteln zu erkennen. Die Vorteile des Individualverkehrs haben diesen Austauschprozess stark begünstigt.

Güterstruktureffekt:

Eine Ursache für die unterschiedlich hohen Wachstumsraten der Transportleistung bei den einzelnen Verkehrsmitteln ist der so genannte Güterstruktureffekt. Er beschreibt die sich über die Zeit verändernden Güterstrukturen. Damit ist gemeint, dass der Anteil von hochwertigen Konsum- und Investitionsgütern steigt und im Gegensatz dazu die Grundstoffindustrie teilweise sogar einen absoluten Produktionsrückgang verzeichnet. In beinahe allen hoch industrialisierten Volkswirtschaften ist eine derartige Veränderung der Transportstruktur zu erkennen. Traditionell der Bahn oder Binnenschifffahrt zugeordnete Gütergruppen (wie land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse, Brennstoffe, Steine und Erden) stagnieren oder sind sogar rückläufig. Bei hochwertigeren Gütergruppen (wie Fahrzeuge, Maschinen, Halb- und Fertigwaren und Chemieprodukten) ist der Anteil der Bahn oder der Schifffahrt sehr gering. Gerade diese Gruppen wurden aber über die Jahrzehnte mit steigendem Wohlstand der Industrieländer mehr und mehr nachgefragt. Zur Produktion und zum Verkauf notwendige Transporte werden hauptsächlich deshalb auf Straßen durchgeführt, weil kein anderes Transportmedium eine derart große Flexibilität zulässt. Die Bring- und Abholzeiten lassen sich großzügig an die Produktions- und Handelsrhythmen anpassen und ermöglichen umfangreiche Zeitersparnisse. Außerdem gibt es Transportgefäße und Spezialaufbauten in allen möglichen Varianten, die die Transporte erleichtern. Weiters spricht die durch die hohe Straßennetzdichte gewährleistete Haus-zu-Haus- bzw. Band-zu-Band-Erreichbarkeit für die LKWs.

Logistikeffekt:

Moderne logistische Konzeptionen in Industrie und Handel stellen hohe Ansprüche an die Verkehrsträger, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Terminalsicherheit, der flexiblen Ausrichtung auf die logistischen Anforderungsprofile und der kommunikativen Leistungen. Und genau hier kann der Straßengüterverkehr aufgrund seiner hohen „Verkehrswertigkeit“ [Q 5]

punkten. Es ist trotz nicht zu vernachlässigender logistischer Erfolge nicht darüber hinwegzusehen, dass bei Bahn und Schifffahrt jede einzelne Logistikleistung wesentlich komplexere Problemlösungen erfordert als beim Straßenverkehr. Prinzipbedingt herrschen bei Bahn und Schifffahrt Massenerlieferungen vor, welche während der Transportvor- bzw. -nachläufe Umschlag- und Lagerleistungen notwendig machen. Der Straßengüterverkehr ist in dieser Hinsicht weit weniger umständlich. ABERLE bringt die Tatsache mit folgendem Satz auf den Punkt: „Die Affinität der logistikrelevanten Güter zum Straßenverkehr ist hoch [Q 6].“

Integrationseffekt:

Die Europäische Union hat eine Phase der Expansion hinter sich und aus der Randlage ist Österreich durch die Ost-Erweiterung immer mehr in die Mitte gerückt. Die Realisierung des Europäischen Binnenmarktes fördert massiv die internationale Arbeitsteilung und damit auch den Wohlstand. Gerade Österreich hat aus der Ost-Erweiterung Nutzen gezogen und Märkte im Osten erschlossen. Durch die mittlerweile zentrale Lage innerhalb der EU und die Öffnung gegen Osten verstärkt sich der grenzüberschreitende Verkehr, also auch der Transitverkehr, die die Verkehrsinfrastruktur in zunehmendem Maße belasten. Der grenzüberschreitende Güterverkehr hat im Zuge der Ost-Erweiterung eine große Anzahl an logistischen Erleichterungen erfahren. Vom Zuwachs des Transits hat die Bahn aber nur geringe Anteile auf sich ziehen können, während der LKW-Verkehr in diesem Segment seine Mengen vervielfachen konnte. Ursachen dafür liegen unter anderem wieder im Güterstruktur- und Logistikeffekt und in technischen bzw. organisatorischen Systemproblemen der Eisenbahn.

2.2 Definitionen im Straßengüterverkehr

Eine funktionierende Wirtschaft bedingt ein funktionierendes Transportsystem. Ohne die Möglichkeit Waren auszutauschen wäre heute kaum eine Produktion mehr denkbar, und man wäre auf Selbstversorgung angewiesen. Somit wäre der für die Industrieländer bereits gewohnte Wohlstand nicht möglich. Der Straßengüterverkehr ist ein Teil dieses Warenaustausches; in Österreich – und auch in den meisten anderen Industrieländern – sogar der bei weitem dominierende. Seit dem Ende des Zweiten Weltkrieges ist der Transportsektor quasi in einem ständigen Umbruch. Nicht zuletzt durch den Beitritt zur Europäischen Union und der Öffnung der EU gegen Osten erfuhr er wieder tiefgreifende Veränderungen. Auch die Herausforderungen an die Zukunft werden Erneuerungen erfordern.

In diesem Abschnitt werden Einteilungsmöglichkeiten definiert, die für die späteren Ausführungen wichtig sind.

Der Straßengüterverkehr ist begrifflich eindeutig abgegrenzt: Er „bezeichnet den Bereich der Transportwirtschaft, der Gütertransporte auf der Straße mit Kraftfahrzeugen (i.e. Lastkraftwagen und Sattelkraftfahrzeuge) durchführt. [Q 7]“

Das Güterbeförderungsgesetz 1995 spricht beim Begriff „Straßengüterverkehr“ von „der gewerbsmäßigen Beförderung von Gütern mit Kraftfahrzeugen des Straßenverkehrs durch Beförderungsunternehmen und für den Werkverkehr mit solchen Fahrzeugen. [Q 8]“

Der Straßengüterverkehr ist ein Teil des Güterverkehrs, aber auch für sich allein genommen ist er noch sehr umfassend. Es existieren einige Möglichkeiten, ihn weiter zu unterteilen. Manche Einteilungsmöglichkeiten sind für den Rahmen dieser Arbeit von Interesse. (Vgl. [Q 9])

2.2.1 Fuhrgewerbe und Werkverkehr

Der Straßengüterverkehr lässt sich in den fuhrgewerblichen Verkehr und den Werkverkehr einteilen. Diese Begriffe sind gesetzmäßig definiert:

- Werkverkehr:

„ist die Durchführung von Transporten durch einen Unternehmer, der nicht gewerblicher Verkehrsunternehmer ist, für Zwecke des eigenen Unternehmens mit Fahrzeugen und Fahrpersonal, über die das Unternehmen die Verfügungsgewalt hat. [Q 10]“

Nach dem Güterbeförderungsgesetz 1995 „liegt Werkverkehr vor, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die beförderten Güter müssen Eigentum des Unternehmens oder von ihm verkauft, gekauft, vermietet, gemietet, erzeugt, gewonnen, bearbeitet oder ausgebessert werden oder worden sein.
2. Die Beförderung muss der Heranschaffung der Güter zum Unternehmen, ihrer Fortschaffung vom Unternehmen, ihrer Überführung innerhalb oder – zum Eigengebrauch – außerhalb des Unternehmens dienen.
3. Die für die Beförderung verwendeten Kraftfahrzeuge müssen vom eigenen Personal des Unternehmens geführt werden.
4. Die die Güter befördernden Kraftfahrzeuge müssen dem Unternehmen gehören, von ihm auf Abzahlung gekauft worden sein oder gemietet sein.
5. Die Beförderung darf nur eine Hilfstätigkeit im Rahmen der gesamten Tätigkeit des Unternehmens darstellen. [Q 11]“

Der Werkverkehr ist in Österreich sehr bedeutend, da sich daraus einige Vorteile für die produzierenden Unternehmen ergeben, wie etwa eine ständige Transportbereitschaft ohne Terminabhängigkeit von Dritten. Zumeist ergeben sich kurze Transportzeiten, niedrige Lager-, Verpackungs- und Transportkosten. Nicht zuletzt diese Vorteile waren für viele Industrie- und Handelsunternehmen ein Grund dafür, eigene LKW-Flotten aufzubauen. (Vgl. [Q 12])

- Fuhrgewerbe:

Der fuhrgewerbliche Verkehr wird auch als Fremdverkehr bezeichnet und bildet das Gegenstück zum Werkverkehr. Er „umfasst Verkehrsleistungen, die von einem Verkehrsunternehmer für andere durchgeführt werden. [Q 13]“ Das Fuhrgewerbe stellt Transportkapazitäten für andere zur Verfügung. Damit ergeben sich im Vergleich zum Werkverkehr oft auch andere technische Anforderungen an die Lastwagenflotte.

2.2.2 Nah- und Fernverkehr

Eine weitere Unterteilungsmöglichkeit besteht mit Nahverkehr und Fernverkehr. Sie sind wie folgt definiert:

- „Güternahverkehr liegt vor, wenn ein Gut innerhalb der Nahverkehrszone, das ist innerhalb eines Umkreises von 65 km, gemessen in der Luftlinie von dem für die Ausübung des Gewerbes in Aussicht genommenen Standort, oder wenn die Fahrt über die Nahverkehrszone hinausgeht, auf einer Strecke von höchstens 110 Straßenkilometern befördert wird, wobei die Be- oder Entladestelle innerhalb des Umkreises liegen muss. [Q 14]“
- „Güterfernverkehr liegt bei allen Güterbeförderungen vor, die nicht unter Güternahverkehr fallen. Eine Konzession für den Güterfernverkehr berechtigt auch zur Ausübung des Güternahverkehrs. [Q 15]“

2.2.3 Einteilung nach Versand- und Empfangsort

In Bezug auf den Abfahrtsort bzw. den Zielort des Gütertransportes lassen sich nach HERRY [Q 16] folgende Einteilungsmöglichkeiten erstellen:

- Binnenverkehr, auch *Inlandsverkehr*: ist die Menge aller Transportvorgänge mit dem Versand- und Empfangsort in Österreich.
- Quellverkehr, auch *Export*: ist die Menge aller Transportvorgänge mit dem Versandort in Österreich und dem Empfangsort außerhalb Österreichs.
- Zielverkehr, auch *Import*: ist die Menge aller Transportvorgänge mit dem Versandort außerhalb Österreichs und dem Empfangsort in Österreich.
- Durchgangsverkehr, auch *Transit*: ist die Menge aller Transportvorgänge mit dem Versand- und Empfangsort außerhalb Österreichs, deren Route jedoch durch Österreich führt.

2.3 Bestandsanalyse

2.3.1 Historischer LKW-Bestand

Die Fahrzeugbestände des Güterbeförderungsgewerbes haben seit dem Ende des zweiten Weltkrieges stetig zugenommen. Abb. 2.2 zeigt die Entwicklung der Anzahl aller in Österreich zugelassenen LKWs seit 1931. Die Zahlen beinhalten alle Gewichtsklassen der LKWs. Hieraus geht ein beinahe ungebrochenes Wachstum hervor – auch in den letzten Jahren. Im Jahr 1948 waren knapp 36.000 Nutzfahrzeuge registriert, also weniger als ein Zehntel des heutigen Bestandes.

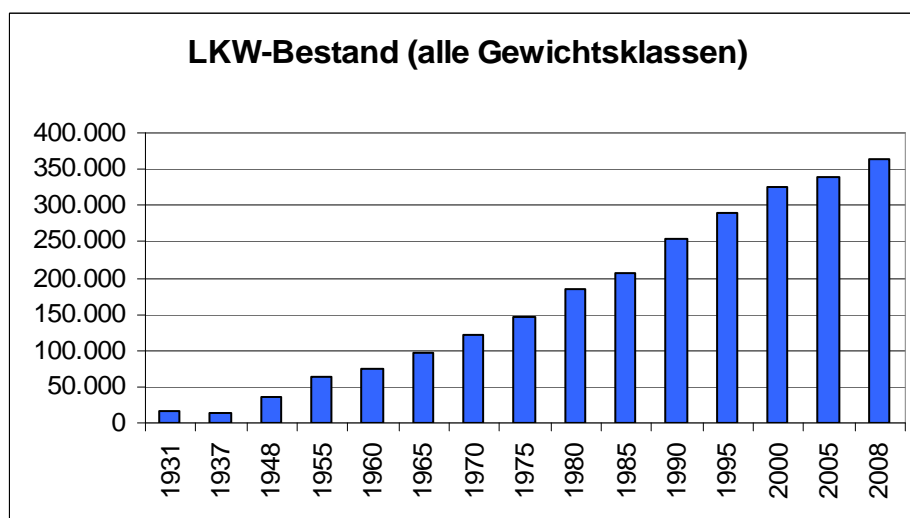


Abb. 2.2: Gesamter LKW-Bestand 1931 – 2008; eigene Darstellung, Quelle: [Q 17]

2.3.2 LKW-Bestand 2008

In Österreich waren im Jahr 2008 genau 362.990 Lastkraftwagen zugelassen. Das entspricht einem Plus gegenüber dem Vorjahr von etwa 2,6%. Schlüsselst man den Bestand nach Gewichtsklassen auf, so erhält man das in Abb. 2.3 dargestellte Ergebnis.

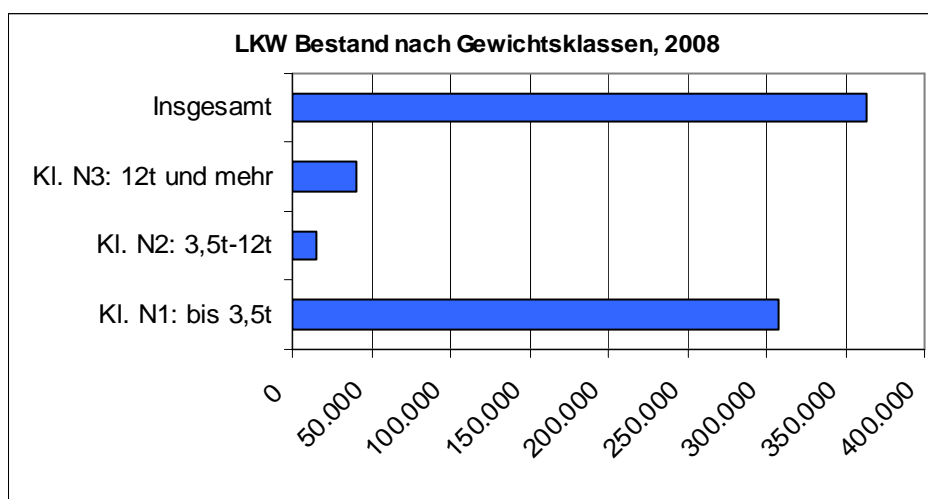


Abb. 2.3: LKW-Bestand im Jahr 2008 nach Gewichtsklassen; eigene Darstellung, Quelle: [Q 17]

Genau 307.287 LKWs gehören der Klasse N1 an und haben dementsprechend ein zulässiges Gesamtgewicht von unter 3,5 Tonnen. Das sind beinahe 85% aller Lastkraftwagen. Nur ein kleiner Teil fällt in die Kategorie N2 mit einem Gesamtgewicht zwischen 3,5 und 12 Tonnen. Der Rest, etwa 41.000 an der Zahl, sind größere LKWs der Klasse N3 mit einem Gesamtgewicht von über 12 Tonnen.

2.3.3 Bestand nach Antriebsart

Weiters ist in dieser Arbeit die Antriebsart von großem Interesse. Von den knapp 363.000 in Österreich zugelassenen LKWs sind die überwältigende Mehrheit mit Diesel betriebene, und zwar etwa 96% der Gesamtzahl. Fast der ganze Rest fährt mit Benzin als Kraftstoff. Man erkennt, dass sich alternative Antriebskonzepte bisher noch kaum durchgesetzt haben. Unter den alternativen Antrieben sind die Erdgasbetriebenen LKWs noch am meisten vertreten. Weitere Antriebskonzepte sind in Österreich noch kaum über das Versuchsstadium hinausgekommen, wie in Tab. 2.1 ersichtlich.

LKW nach Antriebsarten	
Benzin	14.379
Diesel	347.864
Gas	2
Elektro	32
Flüssiggas (LPG... Liquefied Petroleum Gas)	1
Erdgas (CNG...Compressed Natural Gas)	391
Bivalenter Betrieb mit Benzin oder Flüssiggas (BZ/LPG)	4
Bivalenter Antrieb mit Benzin oder Erdgas (BZ/CNG)	317
Insgesamt	362.990

Tab. 2.1: Anzahl der LKWs aufgeschlüsselt nach Antriebsart; eigene Darstellung, Quelle: [Q 17]

2.3.4 Werkverkehr - Fuhrgewerbe

Geht man nun einen Schritt weiter und untersucht die LKW-Bestände im Werkverkehr und im Fuhrgewerbe separat, so stellt sich die Situation wie folgt dar. Im Jahr 2006 sind etwa ein Sechstel (16%) aller gewerblich zugelassenen LKWs dem Fuhrgewerbe zuzuordnen. Der Rest fällt dem Werkverkehr zu.

Betrachtet man die Anzahl der LKW nach Nutzlastklassen, kommt man zu folgendem Schluss: Die Fahrzeuge des Werkverkehrs sind durchschnittlich deutlich kleiner. In Abb. 2.4, entnommen einer Studie der Wirtschaftskammer (Datengrundlage ist das Jahr 2006), ist dieser Sachverhalt skizziert.

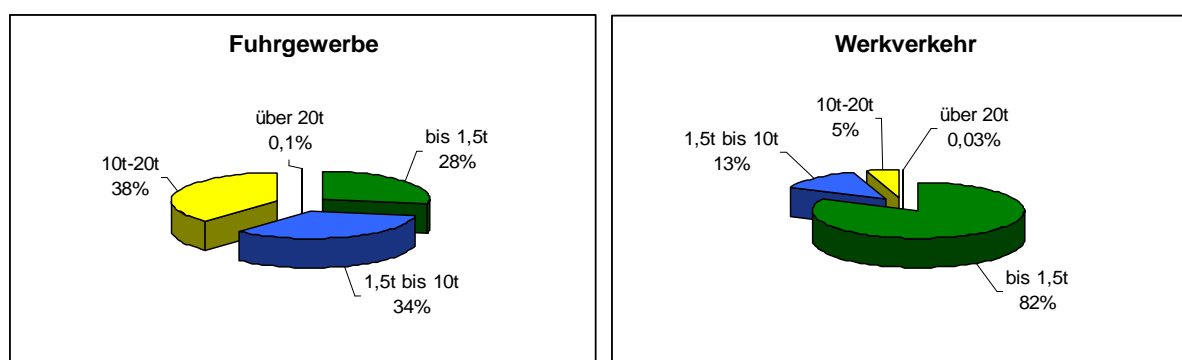


Abb. 2.4: Anteilmäßige Aufschlüsselung der LKW-Flotten des Fuhrgewerbes (links) und des Werkverkehrs (rechts) nach Nutzlastklassen, eigene Darstellung, Quelle: [Q 18]

Über 80 Prozent der LKWs im Werkverkehr fallen in die Kategorie der Nutzlastklasse bis 1,5 Tonnen. Im Fuhrgewerbe sind es hingegen nur etwa 30 Prozent. Schwerlast-LKWs mit einer Nutzlast über 10 Tonnen sind anteilmäßig im Werkverkehr mit 5% kaum vertreten, im Fuhrgewerbe besitzen sie hingegen einen großen Anteil von ca. 40%.

Der Trend zu immer kleineren LKWs zeichnet sich auch weiterhin ab. So ist zum Beispiel zwischen 2005 und 2006 der Anteil der kleinen LKW bis 1,5 Tonnen Nutzlast sowohl im Fuhrgewerbe als auch im Werkverkehr gestiegen. (Vgl. [Q 18])

2.4 Transportaufkommen und Transportleistung

Das Transportaufkommen und die Transportleistung sind zwei wichtige Maßzahlen im Transportbereich. Für die folgenden Auswertungen, aus welchen sich wieder wertvolle Rückschlüsse ziehen lassen, seien diese Transportmaße definiert.

- **Transportaufkommen:** Das Transportaufkommen misst die im Güterverkehr transportierten Tonnen. Es werden also bei diesem Maß alle transportierten Tonnen, egal ob sie nur über eine kurze Distanz oder quer durch Österreich transportiert werden, gleichwertig aufsummiert. Die Einheit des Transportaufkommens ist Tonnen (t).
- **Transportleistung:** Im Gegensatz zum Transportaufkommen fließt bei der Transportleistung die Transportdistanz mit ein. Sie ergibt sich durch die Multiplikation der transportierten Tonnen (also des Aufkommens) mit den jeweils zurückgelegten Entfernungen. Die Einheit der Transportleistung ist damit folgerichtig Tonnen-Kilometer (tkm). (Vgl. [Q 19])

Zuerst wird das **Transportaufkommen** in Österreich untersucht. Dazu werden Auswertungen präsentiert, deren Daten einer Veröffentlichung vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Transport (BMVIT) aus dem Jahr 2005 [Q 20] entnommen sind. Abb. 2.5 zeigt die Aufteilung des Güterverkehrsaufkommens auf die verschiedenen Transportmittel. Tab. 2.2 enthält die dazugehörigen Zahlen mitsamt den jüngsten Entwicklungen.

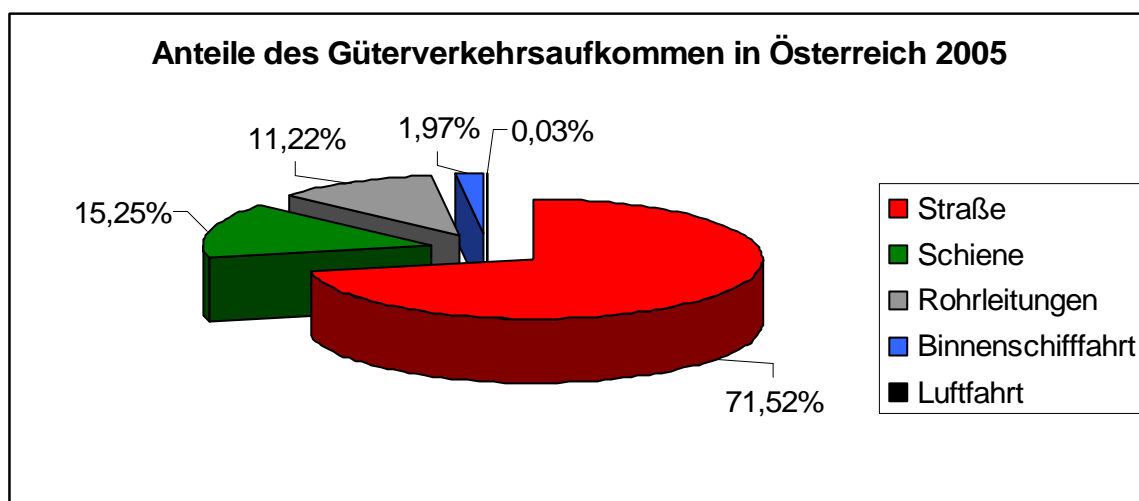


Abb. 2.5: Güterverkehrsaufkommen im Jahr 2005 in Österreich aufgeschlüsselt nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 20]

Gütertransportaufkommen nach Verkehrsträger in Österreich 1999-2005

Verkehrsträger	1999 (in 1000t)	2005 (in 1000t)	Anteil 2005	Wachstum 1999-2005
Straße	386.000	425.499	71,52%	+10,23%
Schiene	70.295	90.715	15,25%	+29,05%
Rohrleitungen	57.120	66.750	11,22%	+16,86%
Binnenschifffahrt	9.987	11.747	1,97%	+17,62%
Luftfahrt	134	195	0,03%	+45,52%
Gesamt	523.536	594.906	100,00%	+13,63%

Tab. 2.2: Transportaufkommen 1999 und 2005 und Entwicklung, aufgeschlüsselt nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 20]

Demgemäß übernimmt der Straßengüterverkehr den überwiegenden Anteil des Transportaufkommens, gefolgt von Schiene, Rohrleitungen und Binnenschifffahrt. Die Luftfahrt ist für den Gütertransport nahezu unbedeutend. Man erkennt auch, dass das Aufkommen tendenziell steigt. Insgesamt verzeichnete der Güterverkehr zwischen 1999 und 2005 ein Wachstum von fast 14%. Das größte relative Wachstum unter den Verkehrsträgern verzeichnete zwischen 1999 und 2005 zwar die Schiene (+29%), in absoluten Zahlen aber stieg der Gütertransport auf der Straße am stärksten.

Im Weiteren sei die **Transportleistung** untersucht. Hierbei zeigt sich ein anderes Bild:

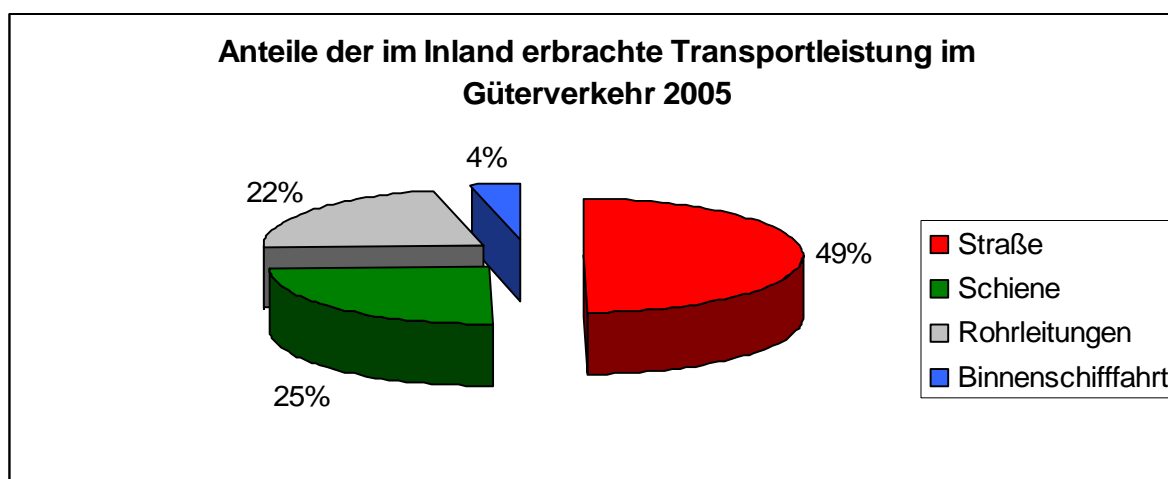


Abb. 2.6: Transportleistung im Jahr 2005 in Österreich, aufgeschlüsselt nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 21]

Transportleistung nach Verkehrsträger in Österreich 2005 in Mio. tkm						
Verkehrsträger	2005	Anteil 2005	Wachstum 1999-2005	Binnenverkehr	Quell-/ Zielverkehr	Transit
Straße	35.343	49,63%	16%	13876	10760	10707
Schiene	17.790	24,98%	25%	4200	8428	5162
Rohrleitungen	15.484	21,74%	12%	160	3807	11517
Binnenschifffahrt	2.596	3,65%	-1%	37	1275	1284
Gesamt	71.213	100,00%	16%	18273	24270	28670

Tab. 2.3: Transportleistung 1999 und 2005 und Entwicklung, aufgeschlüsselt nach Transportmittel und Verkehrsart; eigene Darstellung, Quelle: [Q 21]

Insgesamt wurden also auf Österreichs Verkehrswegen im Jahre 2005 über 71 Milliarden Tonnenkilometer geleistet. Die Anteile haben sich im Vergleich zum Aufkommen merkbar verschoben. So ist der Prozentsatz des Straßengüterverkehrs bei der Transportleistung wesentlich geringer als der beim Transportaufkommen (etwa 49%). Schiene (etwa 25%) und Rohrleitungen (etwa 22%) können hingegen einen bedeutend größeren Anteil verbuchen. Zu erklären ist diese Tatsache dadurch, dass in das Maß der Transportleistung die Wegdistanz multiplikativ einfließt. Bekanntermaßen sind gerade dieser Faktor bei Schiene, Pipelines und Binnenschifffahrt durchschnittlich größer als bei der Straße.

Eine Aufschlüsselung der Transportleistung nach Verkehrsart, und zwar Transit, Quell-/ Zielverkehr und Binnenverkehr, zeigt folgendes Bild:

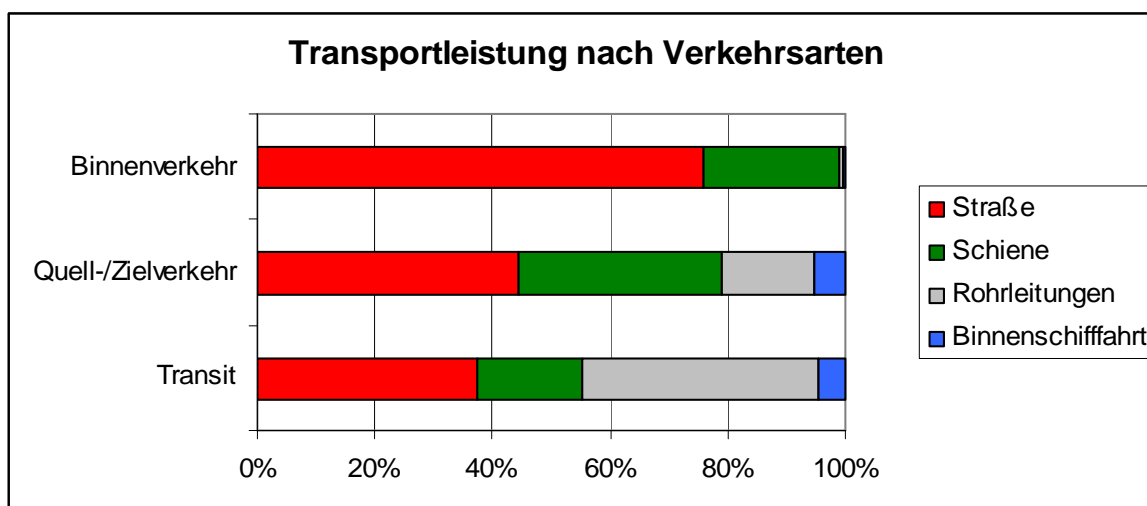


Abb. 2.7: Aufschlüsselung der Transportleistung der Verkehrsarten nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 21]

Je länger die Transportroute, umso geringer ist der Anteil der Straße an der Transportleistung. Liegt dieser Anteil beim Binnenverkehr noch bei etwa drei Viertel, so ist er beim Transit bei nur noch etwa einem guten Drittel. Die Bahn schneidet vor allem beim Quell-/Zielverkehr gut ab und die Rohrleitungen beim Transit.

Wie weiter oben beschrieben, setzt sich der Güterkraftverkehr aus dem Werkverkehr und dem gewerblichen Verkehr (Fuhrgewerbe) zusammen. Obwohl nur ein Sechstel aller gewerblich in Österreich zugelassenen LKWs dem Fuhrgewerbe zuzuordnen sind, entfielen im Jahr 2006 55% des inländischen Transportaufkommens und 71% der im Inland erbrachten Transportleistung auf das Fuhrgewerbe [Q 22].

Ein geringer Prozentsatz an Nutzfahrzeugen erbringt also die meiste Transportleistung. Dies lässt darauf schließen, dass das Segment des Werkverkehrs, das bei weitem die größte Anzahl an LKWs unterhält, im Durchschnitt mit wesentlich geringerer Nutzlast und über kürzere Distanzen auf Österreichs Straßen unterwegs ist.

Die Bedeutung des Werkverkehrs ist in Europa unterschiedlich zu bewerten, wie man in Abb. 2.8 erkennt. Der Anteil des Werkverkehrs am gesamten österreichischen Güterkraftverkehr (gemessen in Tonnenkilometern) lag im Jahr 2006 bei 19%. In Deutschland beispielsweise war er etwa gleich hoch, während in Großbritannien der Werkverkehrsanteil bei vergleichsweise hohen 27% lag.

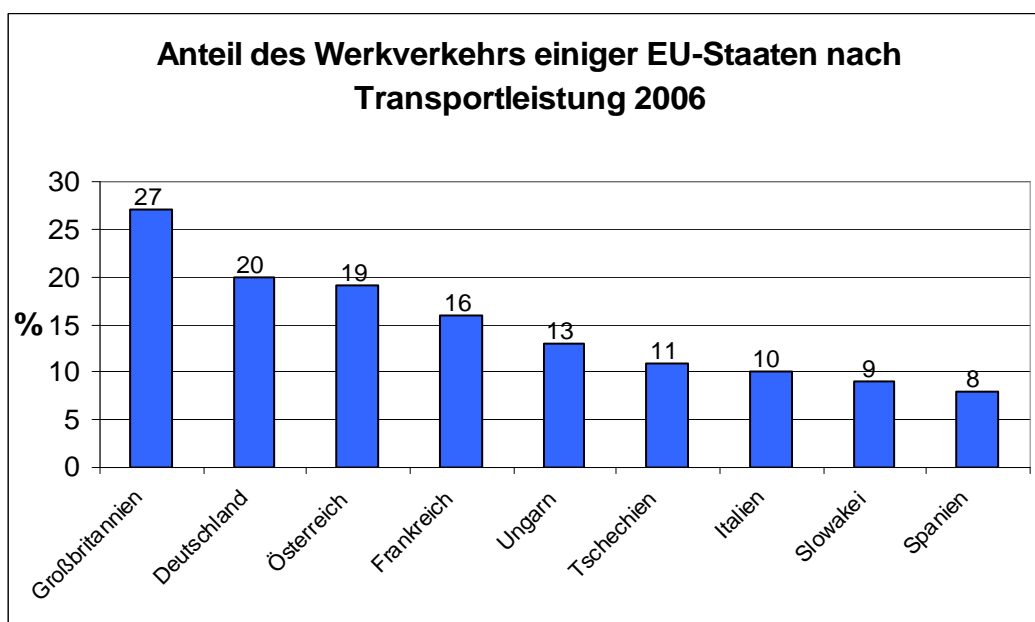


Abb. 2.8: Anteil des Werkverkehrs an der im jeweiligen Land erbrachten Transportleistung des Jahres 2006 in einigen EU-Staaten; eigene Darstellung, Quelle: [Q 22]

2.5 Transportweiten

Auch bezüglich der Transportdistanz lassen sich eindeutige Zusammenhänge entdecken. Abb. 2.9 zeigt den Vergleich der Transportweiten zwischen Schiene und Straße. So wird etwa die Hälfte des Aufkommens auf der Schiene über mehr als 150 km transportiert. Hingegen wird nur jede zehnte Tonne des Straßen-Aufkommens über diese Distanz transportiert. Etwa vier Fünftel aller auf österreichischen Straßen beförderten Tonnen Ware werden nicht weiter als 80 km vom Versandort entfernt wieder in Empfang genommen. (Vgl. [Q 22])

Ein Großteil der auf Straßen beförderten Güter wird also auf kurzer Streckenlänge transportiert. Im Schienenverkehr sind die zurückgelegten Strecken im Allgemeinen wesentlich größer.

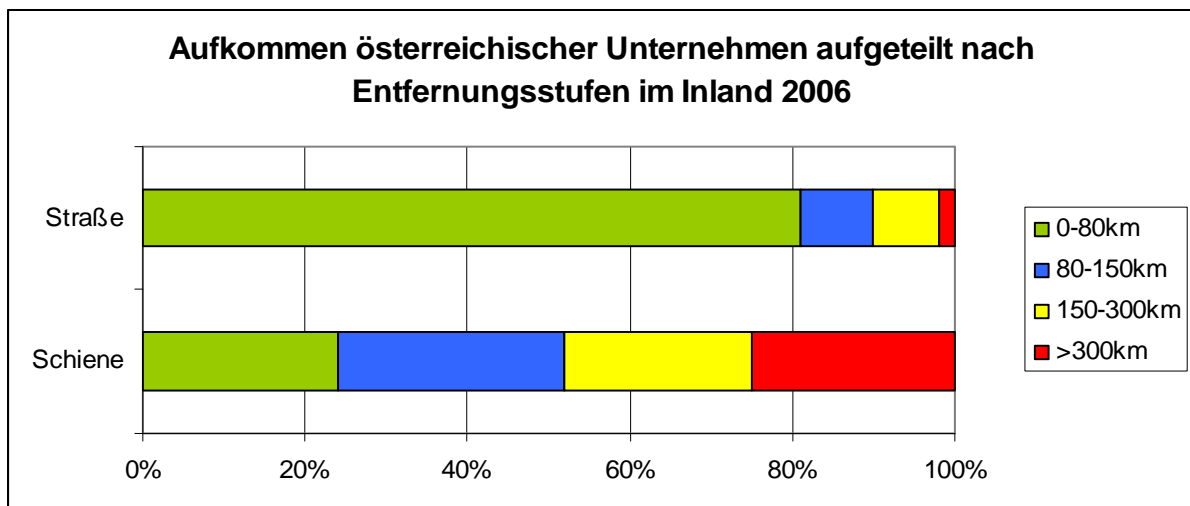


Abb. 2.9: Transportaufkommen von Schiene und Straße aufgeteilt nach Entfernungsstufen in Österreich im Jahr 2006; eigene Darstellung, Quelle: [Q 22]

Im letzten Jahrzehnt wurde von P. FALLER in [Q 23] eine Statistik erhoben, die die durchschnittliche Transportweite aufgeschlüsselt nach Verkehrsart (Binnenverkehr, Transit, Quell- und Zielverkehr) im Jahr 1994 darstellt. Und er kam zu einem Ergebnis, welches in der Abb. 2.10 veranschaulicht wird:

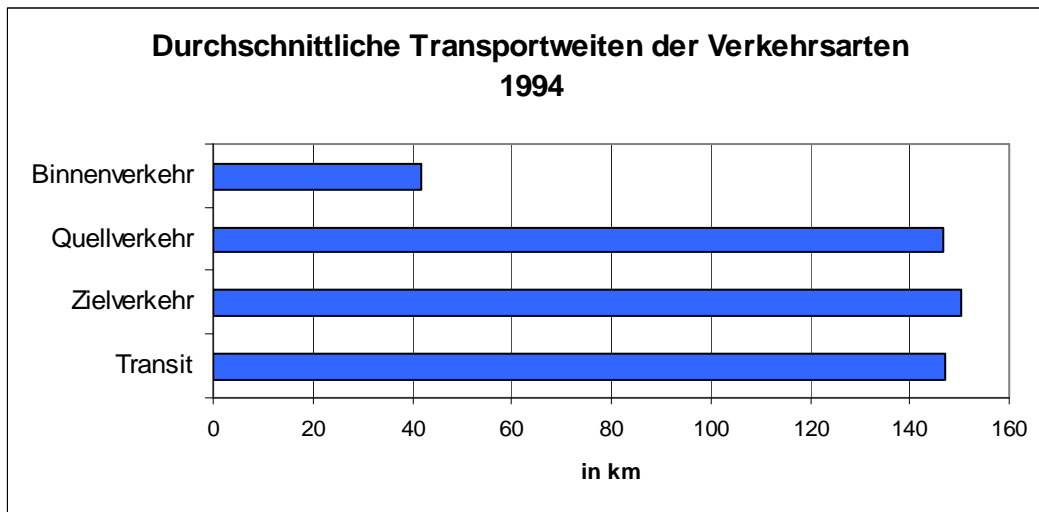


Abb. 2.10: Durchschnittliche Transportweiten der Verkehrsarten im Jahr 1994; eigene Darstellung, Quelle: [Q 23]

Im Binnenverkehr geht eine durchschnittliche Fahrt nur über 41,7 km. Der Quell- und Zielverkehr, sowie der Transit waren im Jahr 1994 durchschnittlich allesamt über mehr als dreimal so lange Strecken unterwegs. Zwar sind die Zahlen nicht mehr aktuell und die Rahmenbedingungen haben sich seitdem stark verändert (Stichworte: EU-Beitritt Österreichs, Osterweiterung); sie sind aber relevant genug, um Tendenzen ablesen zu können.

Ein interessanter Zusammenhang sei hier noch angeführt, der bestätigt, was schon im Abschnitt 2.4 angesprochen wurde. Je größer die Transportweite des Transportaufkommens, umso eher ist sie dem Fuhrgewerbe zuzuordnen [Q 22]. Abb. 2.11 bestätigt somit die getroffene Annahme, dass der Werkverkehr grundsätzlich eher kürzere Strecken bedient und das Fuhrgewerbe eher für Langstrecken ausgelegt ist. Der relativ kleine Fuhrgewerbe-Anteil bei Fahrten über 300 km scheint dieser These zu widersprechen. Aufgrund der im Vergleich geringen Anzahl von Fahrten über 300 km (siehe oben) ist der Abfall in dieser Kategorie kaum relevant und stellt somit diese Tendenz nicht in Frage.

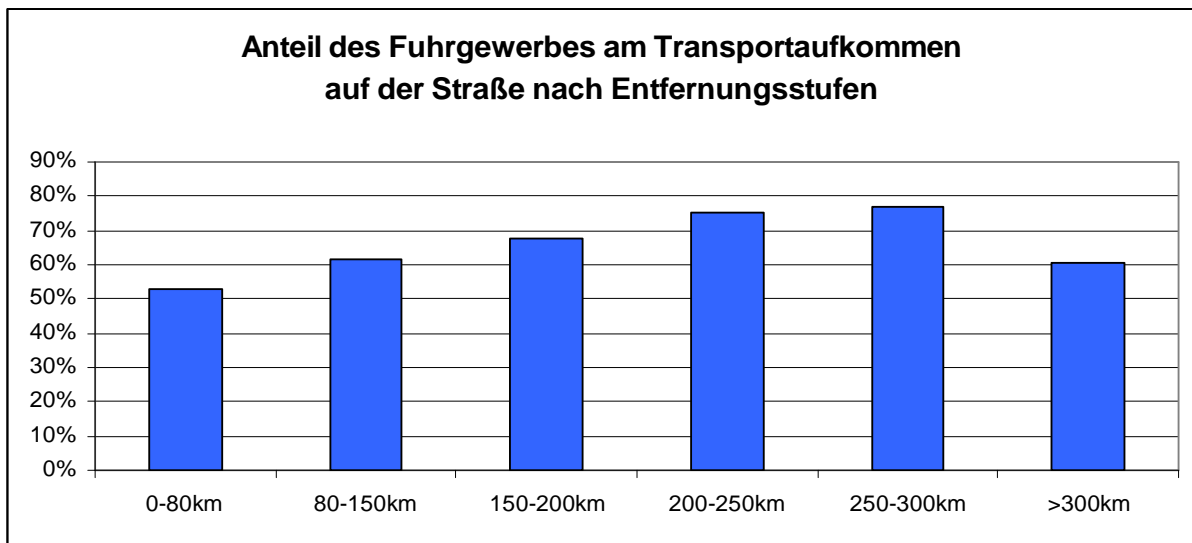


Abb. 2.11: Anteil des Fuhrgewerbes am Transportaufkommen aufgeschlüsselt nach Entfernungsstufen; eigene Darstellung, Quelle: [Q 22]

2.6 Treibhausgas-Emissionen

Eine Studie des UMWELTBUNDESAMTES [Q 24] stellt die Basis für diesen Abschnitt dar, in dem die Rolle des Güterverkehrs an den Schadstoffemissionen untersucht wird.

Kyoto-Protokoll

Im Rahmen des Kyoto-Protokolls haben sich die Mitglieder der Europäischen Union, und somit auch Österreich, damit einverstanden erklärt, den Treibhausgasausstoß zu verringern. Die EU verpflichtete sich dabei, ihre Emissionen innerhalb des Zeitraums 2008 bis 2012 zusammen um 8% gegenüber dem Basisjahr 1990 zu reduzieren. Und innerhalb der europäischen „Glockenlösung“ sollte Österreich zwischen 2008 und 2012 durchschnittlich 13% seiner Emissionen des Basisjahres 1990 einsparen. Die Abb. 2.12 zeigt die tatsächliche Entwicklung bis zu Jahr 2003. In diesem Zeitraum hat sich Österreich vom Kyoto-Zielpfad weit entfernt, es war statt der Einsparungen sogar ein Anstieg der Emissionen um fast 17% seit 1990 zu verzeichnen. Aktuellere Zahlen zeigen ebenso keine Trendumkehr in jüngster Vergangenheit.

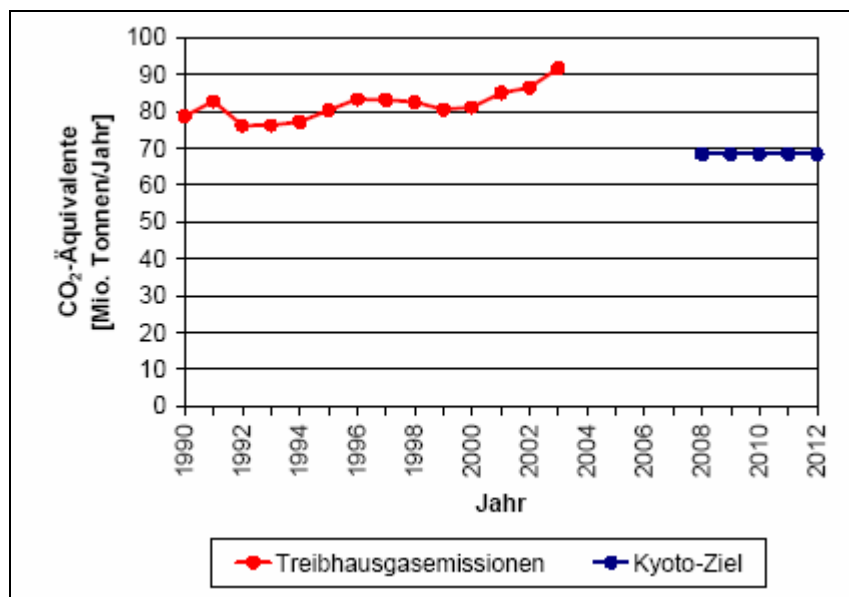


Abb. 2.12: Treibhausgasemissionen Österreichs von 1990 – 2003, Kyoto-Ziel 2008 – 2012; Quelle: [Q 25]

Treibhausgase (THG)

Die wichtigsten anthropogenen Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O), mit jeweils unterschiedlichem „Global Warming Potential“ (GWP, siehe [Q 26]). Methan fördert den Treibhauseffekt je freigesetzter Gewichtseinheit 21-mal stärker als Kohlendioxid und besitzt daher ein GWP von 21. Lachgas besitzt sogar einen GWP-Wert von ungefähr 310. Kohlendioxid ist das mit Abstand meistemittierte THG und war im Jahr 2003 mit einem Anteil von über 83% hauptverantwortlich für die hohe Summe an THG. Insgesamt wurden im Jahr 2003 in Österreich 91,57 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente emittiert. Das Kyoto-Ziel für Österreich liegt bei etwa 68 Millionen Tonnen jährlich. Methan und Lachgas werden in die THG-Emissionen mit eingerechnet, werden aber auf direkte Weise kaum durch den Verkehr verursacht und daher im Weiteren vernachlässigt.

Verursacher

Im Zuge einer Vereinheitlichung der UN-Berichtsformate über Luftemissionen wurden insgesamt sechs Verursachersektoren definiert. Dabei handelt es sich um:

1. Energieversorgung
2. Kleinverbraucher
3. Industrie
4. Verkehr (Straße, Bahn, Luftfahrt und Schifffahrt)
5. Landwirtschaft
6. Sonstige

Eine Auswertung der Treibhausgasemissionen für das Jahr 2003 zeigt die Anteile dieser sechs Verbrauchersektoren, siehe Abb. 2.13.

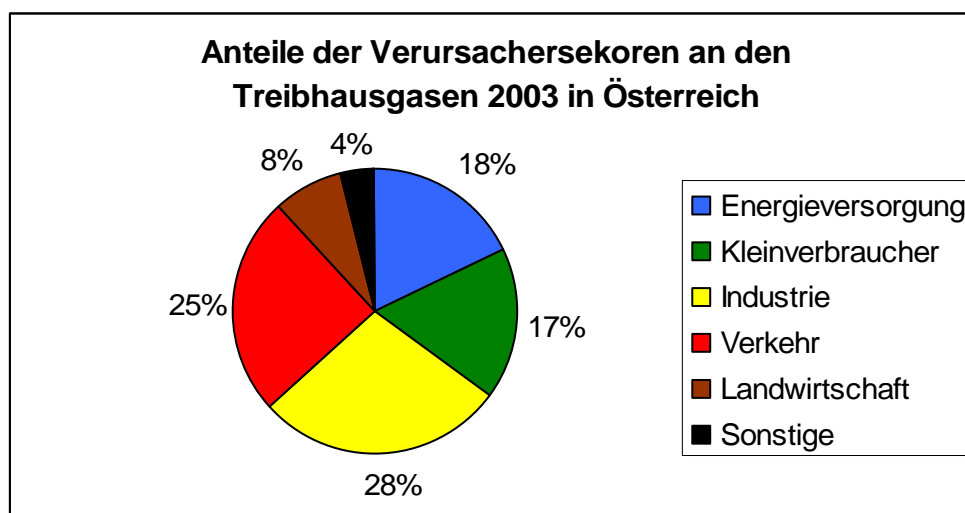


Abb. 2.13: Anteile der Verursacher an den Treibhausgasen in Österreich im Jahr 2003; eigene Darstellung, Quelle: [Q 27]

Der Verkehr ist also für ein Viertel aller Treibhausgasemissionen in Österreich verantwortlich und damit der zweitgrößte Verursacher nach der Industrie. Insgesamt emittierte der Verkehr im Jahr 2003 demgemäß landesweit 22,7 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente.

Verkehr

Der Verkehr verzeichnet auch die bei weitem größten Zuwächse seit 1990 im Vergleich zu den anderen Sektoren. Während die Treibhausgasemissionen in den Sektoren Landwirtschaft und Sonstige sogar rückläufig sind und in den Sektoren Industrie, Kleinverbraucher und Energieversorgung relativ moderat steigen, haben sie beim Verkehr um mehr als 80% zugenommen (siehe Abb. 2.14). Dies ist eine Entwicklung, die dem Kyoto-Ziel krass entgegensteht.

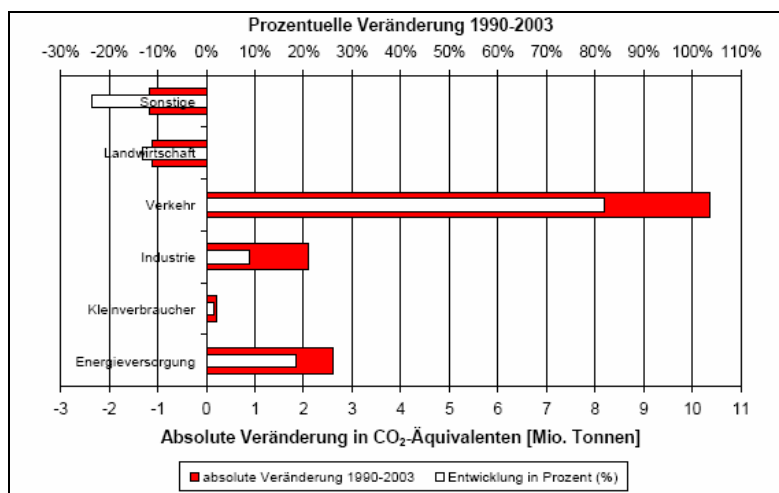


Abb. 2.14: Veränderung der THG-Emissionen von 1990 - 2003 nach Verbrauchersektoren;
Quelle: [Q 28]

Die wichtigsten Ursachen für diesen stark ansteigenden Trend sind zum einen das nach wie vor stark steigende Verkehrsvolumen und zum anderen der Tanktourismus. Der Tanktourismus bezeichnet das Phänomen, dass Kraftfahrer – sowohl private als auch gewerbliche – in grenznahen Gebieten aufgrund steuerbedingter Preisunterschiede im jeweils günstigeren Nachbarland Kraftstoffe tanken und diesen aber im Heimatland verbrauchen. Im Vergleich zu Deutschland oder Italien sind die Kraftstoffpreise in Österreich traditionell etwas niedriger (je nach Treibstoffart um 5 bis 25% [Q 29]). Eine Studie des Lebensministeriums zeigt, dass knapp 30% der bilanzierten Verkehrsemissionen auf den Tanktourismus entfallen [Q 30].

Der Verkehrssektor stellt einen der Hauptverursacher von Luftschadstoffen in Österreich dar. Betrachtet man die Zahlen genauer, so zeigt sich, dass der überwiegende Teil der THG-Emissionen im Verkehrssektor dem Straßenverkehr entstammt (96% bei CO₂ für 2003).

Kohlendioxid war im Jahr 2003 anteilmäßig unter den THG für 99% der gesamten Treibhausgasemissionen im Verkehr verantwortlich.

LKW-Verkehr und Einsparungspotenzial

Von den 22,7 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr 2003, die dem Verkehr zuzuschreiben sind, entfallen ca. 9,4 Millionen Tonnen auf den LKW-Verkehr. Diese Mengen stellen einen Anteil von 43% am gesamten Straßenverkehr dar. 1990 waren es noch 26%. Die zwischenzeitlichen Steigerungsraten erklären sich vor allem durch den überdurchschnittlichen Anstieg des LKW-Verkehrs. Die Fahrleistung der LKWs ist im Zeitraum 1990 bis 2003 um ca. 176% gestiegen, die der PKWs vergleichsweise nur um etwa 60%.

Der LKW-Verkehr leistet also einen Beitrag von 10,3% an den gesamten THG-

Emissionen Österreichs. Bereinigt man diese Rechnung um den oben erwähnten Anteil des Tanktourismus, so bleiben etwa 6,6 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente, die LKWs verursachen. Auch die gesamten THG-Emissionen reduzieren sich ohne Tanktourismus von 91,57 Millionen Tonnen auf 84,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente in Österreich. Damit bleibt ein Beitrag des Straßengüterverkehrs von 7,8% an den gesamten THG-Emissionen.

Mit diesen Überlegungen sollte deutlich gemacht werden, wie viel Potenzial an Emissionseinsparungen es im LKW-Verkehr gibt. Einsparungen in diesem Sektor würden daher schnell große Effekte erzielen. Es ist nicht realistisch, die ganzen oder auch nur einen Großteil der Emissionen des Straßengüterverkehrs in absehbarer Zeit zu vermeiden. Aber eine Einsparung auch nur eines Teils der vielen Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente kann einen wertvollen Beitrag zu einer positiveren Treibhausgasbilanz Österreichs liefern. Für das Kyoto-Ziel kommt so ein Ansatz zu spät, aber für Vereinbarungen im Post-Kyoto-Zeitraum steht theoretisch mit dem Straßengüterverkehr ein weiteres großes Einsparungspotenzial zur Verfügung.

3. Konventionelle Antriebe

Was auch immer die Zukunft bringt, wie erfolgreich alternative Antriebskonzepte auch immer sein werden, die konventionellen Antriebe werden noch lange eine wichtige Rolle spielen. Eine abrupte Abkehr von ihnen ist ausgeschlossen. Vor allem im Segment des Straßenfernverkehrs werden sie weiterhin eingesetzt werden. Daher wird den konventionellen Antrieben dieses Kapitel gewidmet.

Wenn von konventionellen Antrieben im Lastwagenverkehr die Rede ist, so spricht man eigentlich vom Dieselmotor. Die meisten LKWs sind mit Dieselantrieben ausgestattet (siehe Abschnitt 2.3.3). Dieser wird im Folgenden vorgestellt. Ein weiterer wichtiger Punkt, auf den eingegangen wird, sind die europäischen Abgasvorschriften, die über die Zeit immer strengere Schadstoffgrenzwerte festlegen. Abschließend werden weitere Möglichkeiten der Effizienzsteigerung behandelt. Es geht dabei um Maßnahmen, die auch bei LKWs, die nicht auf alternative Antriebe setzen, einen wertvollen Beitrag zur Schadstoffminderung leisten können.

3.1 Dieselmotor

3.1.1 Anforderungen und Auslegungskriterien

Der Dieselmotor stellt bei Lastkraftwagen aller Größe die dominierende Antriebsform dar. Etwa 96% aller in Österreich zugelassenen LKWs werden von Dieselmotoren angetrieben. Sie finden in allen Gewichtsklassen Anwendung. Das Leistungsangebot erstreckt sich bei Nutzfahrzeug-Motoren bis zu 485 kW. Es müssen aber je nach Einsatzgebiet unterschiedliche Fahrzeugkonzepte mit jeweils darauf abgestimmter Antriebstechnik in Betracht gezogen werden. Im Fernverkehr beispielsweise werden andere Anforderungen an die Fahrzeugmotoren gestellt als im innerstädtischen Verteilverkehr. Es lassen sich also Tendenzen nach Fahrzeugklasse ausmachen. Bei der Entwicklung neuer Motoren werden Kundenanforderungen vorrangig behandelt. Die Einhaltung der Abgasgrenzwerte ist dabei eine wichtige Randbedingung. (Vgl. [Q 31])

Wie in Tab. 3.1 ersichtlich, sind bei schweren Nutzfahrzeugen besonders der Kraftstoffverbrauch, die Haltbarkeit und die Zuverlässigkeit von Bedeutung. Grund dafür ist vor allem die große jährliche Fahrleistung. Die Anschaffungskosten treten dabei eher in den Hintergrund. Je kleiner die Nutzlast und die jährliche Fahrleistung, umso wichtiger werden die Fahrzeugkosten, die Kraftstoffkosten fallen anteilmäßig weniger ins Gewicht.

Nutzfahrzeugklasse	leicht	mittel	schwer
Abgasemissionen	●●●	●●●	●●●
Geräusch	●●●	●●●	●●●
Motorgewicht	●	●●	●●●
Kraftstoffverbrauch	●	●●	●●●
Haltbarkeit	●	●●	●●●
Zuverlässigkeit	●	●●	●●●
Motorkosten	●●●	●●	●

Wichtig: ●
 Sehr wichtig: ●●
 Muss: ●●●

Tab. 3.1: Wichtigkeit der Auslegungskriterien nach Nutzfahrzeugklassen, eigene Darstellung, Quelle: [Q 32]

Grundsätzlich ist bei den Auslegungskriterien darauf zu achten, dass ein neu zu entwickelnder Motor allen derzeit geltenden Anforderungen und Gesetzesvorschriften gewachsen ist und auch die in absehbarer Zeit in Kraft tretenden erfüllt. Trotz dieser hohen Anforderungen muss auf ein günstiges Kosten/Nutzenverhältnis für Hersteller und Käufer geachtet werden.

Zu den Auslegungskriterien zählen unter anderem:

- Kompakte Bauform
- Hohe Lebensdauer
- Erfüllung derzeitiger und künftiger Abgasgrenzwerte
- Niedriger Kraftstoffverbrauch
- Lange Wartungsintervalle
- Geringe Geräuschemissionen
- Gutes dynamisches Verhalten
- Niedrige Herstellungs- und Betriebskosten

Ein niedriger Kraftstoffverbrauch ist bei Fahrleistungen im Fernverkehr von besonderer Wichtigkeit. Ein unwirtschaftlicher Motor bei Fahrleistungen von bis zu 180.000 km/Jahr lässt sich aufgrund des starken Wettbewerbs nicht verkaufen. (Vgl. [Q 33])

An die Lebensdauer werden auch immer höhere Anforderungen gestellt. Je nach Klasse muss ein Motor eine B10-Lebensdauer von bis über eine Million km erreichen. „Das heißt, dass bei dieser Laufleistung erst für zehn Prozent der eingesetzten Motoren eine Grundüberholung oder ein Austauschmotor erforderlich ist. In den USA werden künftig 1,92 Mio. km Laufleistung gefordert [Q 34].“

Für die Wartung werden modernste Diagnose- und Steuergeräte gefordert, die ein schnelles Erkennen der Fehlfunktion ermöglichen und somit ein kostengünstiges Wartungskonzept ermöglichen. Durchschnittliche Ölwechselintervalle von mehr als 100.000 km werden vorausgesetzt. (Vgl. [Q 35])

3.1.2 Unterschied Ottomotor - Dieselmotor

Als Erfinder und Namensgeber des Dieselmotors gilt der bekannte deutsche Ingenieur Rudolf Diesel (1858 – 1913, Abb. 3.1). Er ließ im Jahre 1893 sein Arbeitsverfahren für Schwerölmotoren patentieren.

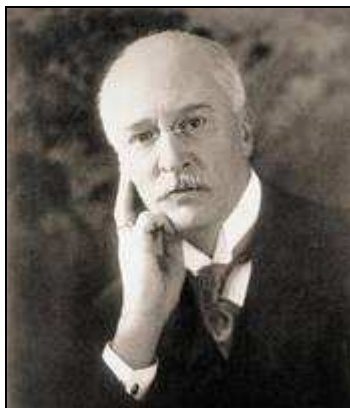


Abb. 3.1: Rudolf Diesel

Der größte Unterschied zum damals schon existierenden Ottomotor ist das Prinzip der Selbstzündung. Während der Ottomotor ein Benzin-Luftgemisch in den Brennraum einsprüht, das mithilfe einer Zündkerze entzündet wird, wird im Dieselmotor aufgrund des höheren Drucks und damit der höheren Temperatur der eingebrachte Dieselmotorkraftstoff zur Selbstzündung gebracht. Dadurch steigt der Verbrennungsdruck und es können im Allgemeinen höhere Wirkungsgrade als mit Benzinmotoren erreicht werden. Der Dieselmotor hat einen geringeren Kraftstoffverbrauch und ist aufgrund des größeren Drehmoments im meist genutzten unteren Drehzahlbereich (siehe Abb. 3.2) vorteilhaft für Nutzfahrzeuge. Dieselmotoren sind heute in vielfältiger Form anzutreffen. Auf Schiffen, Propellerflugzeugen, Eisenbahnen, in PKWs und vor allem in LKWs. (Vgl. [Q 36])

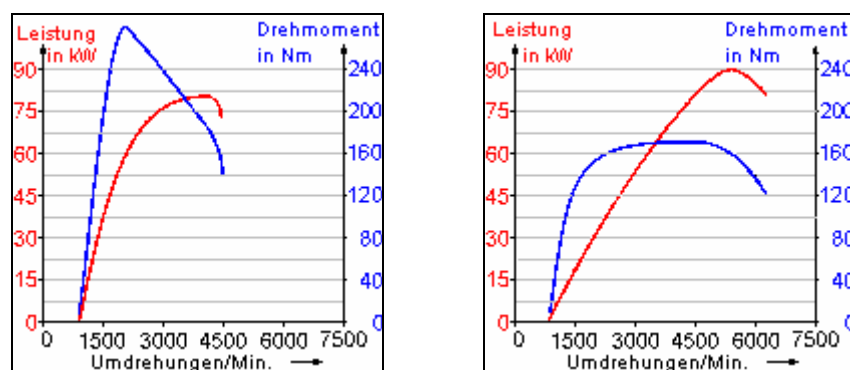


Abb. 3.2: Drehmoment- Drehzahl-Kurve bzw. Leistung-Drehzahl-Kurve eines Dieselmotors (links) und eines Benzinmotors (rechts); Quelle: [Q 36]

3.1.3 Arbeitsweise

„Die meisten Dieselmotoren arbeiten nach dem 4-Takt-Verfahren (siehe Abb. 3.3):

1. Takt: Beim Abwärtsgehen des Kolbens entsteht eine Saugwirkung, reine Luft strömt durch das geöffnete Einlassventil in den Zylinderraum. Auf der Höhe des unteren Totpunktes (...) schließt das Einlassventil (Ansaugtakt). Als „Totpunkt“ bezeichnet man den Umkehrpunkt des Kolbens nach oben (unterer Totpunkt) oder nach unten (oberer Totpunkt).

2. Takt: Der Kolben geht aufwärts und drückt die eingeschlossene Luft zusammen, wobei diese sich auf etwa 900°C erhitzt (Verdichtungstakt).

3. Takt: Kurz vor dem oberen Totpunkt wird der Dieselkraftstoff feinerstäubt eingespritzt. Er vermischt sich mit der heißen Luft und entzündet sich selbst (innere Gemischbildung und Selbstzündung). Der hohe Verbrennungsdruck von ca. 80 bar drückt den Kolben abwärts (Arbeitstakt).

4. Takt: Beim Aufwärtsgehen öffnet das Auslassventil, die verbrannten Gase werden ausgestoßen (Auspufttakt). [Q 37]“

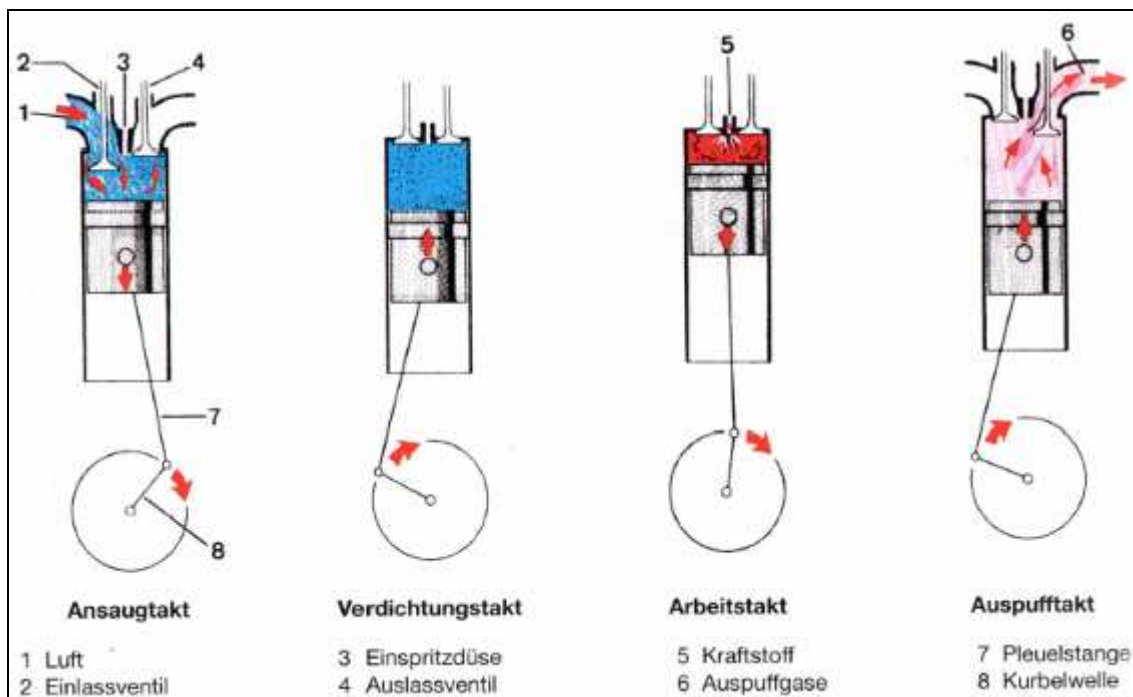


Abb. 3.3: Dieselmotor-Arbeitsweise nach dem 4-Takt-Verfahren; Quelle: [Q 37]

3.1.4 Aufbau

In diesem Punkt wird der Aufbau des Dieselmotors in gebotener Kürze nach H. BRAUN in [Q 38] dargestellt. Für tiefer gehendes Interesse sei auf die Literatur verwiesen: [Q 39].

Eine Prinzipskizze eines Dieselmotors ist im Abb. 3.4 zu sehen. Im Wesentlichen besteht ein Dieselmotor aus folgenden Bauteilen:

- Zylinder
- Kolben
- Pleuelstange
- Kurbelwelle
- Kurbelgehäuse

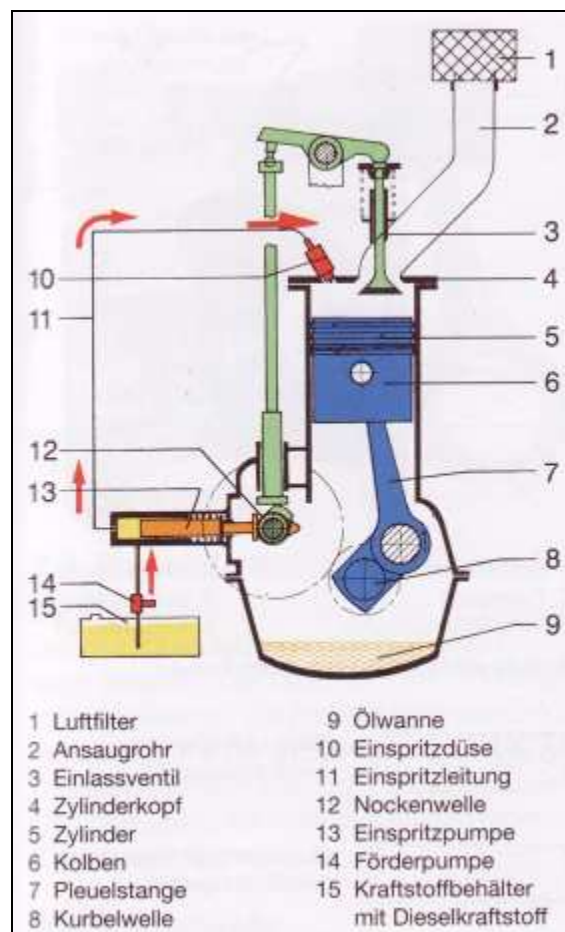


Abb. 3.4: Prinzipskizze eines Dieselmotors mit Benennung der Komponenten; Quelle: [Q 39]

Gemäß Abb. 3.4 führt der **Zylinder** (5) den Kolben (6). Da er hohen Drücken und Temperaturen standhalten muss, ist er aus speziellen verschleißfesten Legierungen hergestellt. In den Zylinderköpfen (4) sind die Einspritzdüsen (10) und die Einlass- und Auslassventile (3), welche die Luftzufuhr und den Abgasausstoß regeln, eingebaut. Die Ventile selbst werden durch die Nockenwelle gesteuert. Der Zylinderkopf bildet den oberen Abschluss des Brennraums.

Auf den **Kolben** (6) wirken große Druckkräfte, die bei der explosionsartigen Verbrennung des Treibstoffes entstehen. Er muss den Zylinder zum Kurbelgehäuse hin abdichten. Für diese Zwecke sind wieder Werkstoffe aus speziellen Legierungen notwendig, die den thermischen und mechanischen Belastungen standhalten. Aufgabe des Kolbenbolzens ist es, die auf den Kolben wirkenden Kräfte auf die **Pleuelstange** (7) zu übertragen. Dieses Prinzip ist in Abb. 3.5 gut zu erkennen.

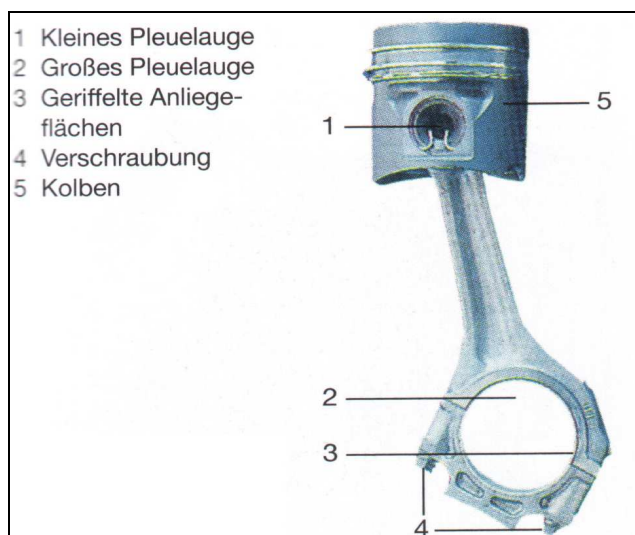


Abb. 3.5: Pleuelstange samt Kolben, Quelle: [Q 40]

Im kleinen Pleuelauge ((1) in Abb. 3.5) ist der Kolbenbolzen angebracht. Die Pleuelstange ist unten im großen Pleuelauge ((2) in Abb.3.5) auf der Pleuelstange gelagert. Die linear gerichteten Schubkräfte des Kolbens werden durch die Pleuelstange mithilfe der Pleuelstange in eine Drehbewegung umgewandelt. Aus dieser Drehbewegung resultiert ein entsprechendes Drehmoment.

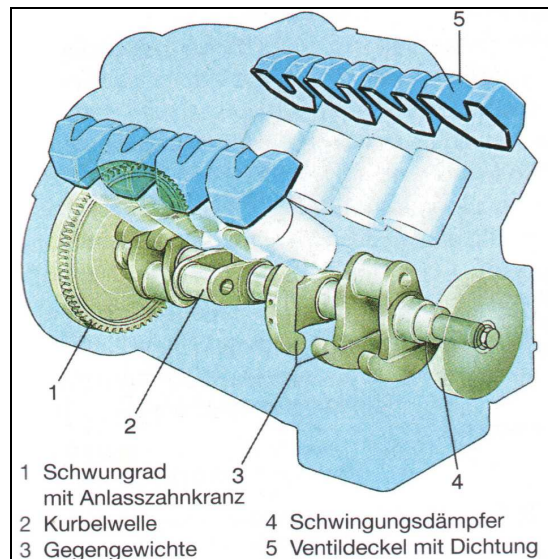


Abb. 3.6: Kurbelwelle; Quelle: [Q 40]

Die **Kurbelwelle** (siehe (2) in Abb. 3.6) ist den Kräften mehrerer Zylinder ausgesetzt. Der Arbeitstakt eines einzelnen Zylinders wirkt drehungsfördernd, während der Verdichtungstakt drehungsbremsend wirkt. Da an die Kurbelwelle gleichzeitig sowohl drehungsfördernde als auch drehungshemmende Kräfte mehrerer Zylinder angreifen, muss die Kurbelwelle genau dimensioniert und mit Gegengewichten (3) ausgewuchtet bzw. mit Schwingungsdämpfern (4) versehen werden. Das Schwungrad (1) dient zur Überwindung der Totpunkte und Leertakte.

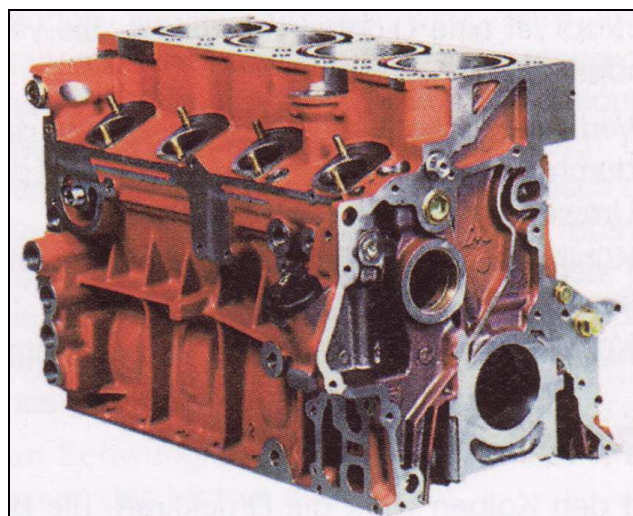


Abb. 3.7: Kurbelgehäuse; Quelle [Q 39]

Das **Kurbelgehäuse** (siehe Abb. 3.7) beinhaltet im Wesentlichen alle Motorbauteile und stellt somit das zentrale Bauteil eines Motors dar. Es ist aus Gusseisen gefertigt und muss großen Beanspruchungen durch Zug, Druck, Torsion und Biegung standhalten. Nach unten hin ist der Motor durch die Ölwanne ((9) in Abb. 3.4) abgeschlossen.

Durch Keilriemen werden an die Kurbelwelle Nebenaggregate wie Lüfter, Wasser- und Ölpumpe, Drehstromgenerator, Klimakompressor usw. angeschlossen (siehe Abb. 3.8). Die Nebenaggregate belasten den Dieselmotor zusätzlich, wenn sie aktiviert werden. (Vgl. [Q 40])

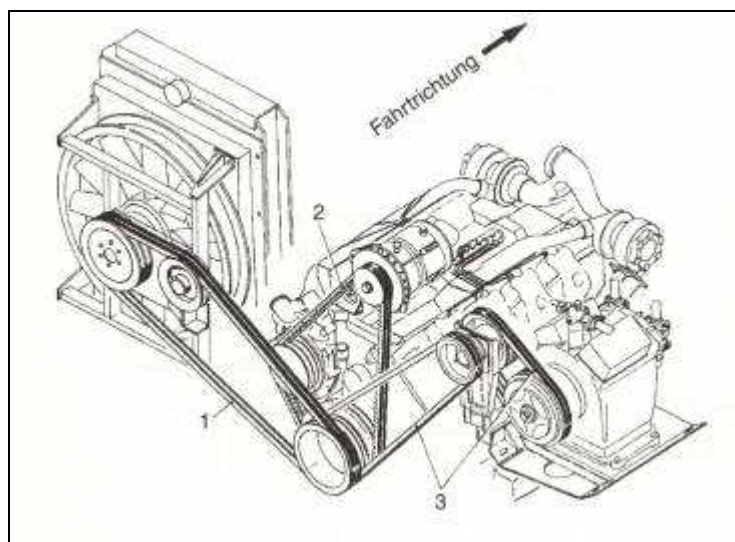


Abb. 3.8: (1) Lüfter, (2) Wasserpumpe und Lichtmaschine, (3) Kältekompressor;
Quelle: [Q 40]

Einen guten Überblick über die gesamten Komponenten bietet folgende Abb. 3.9.

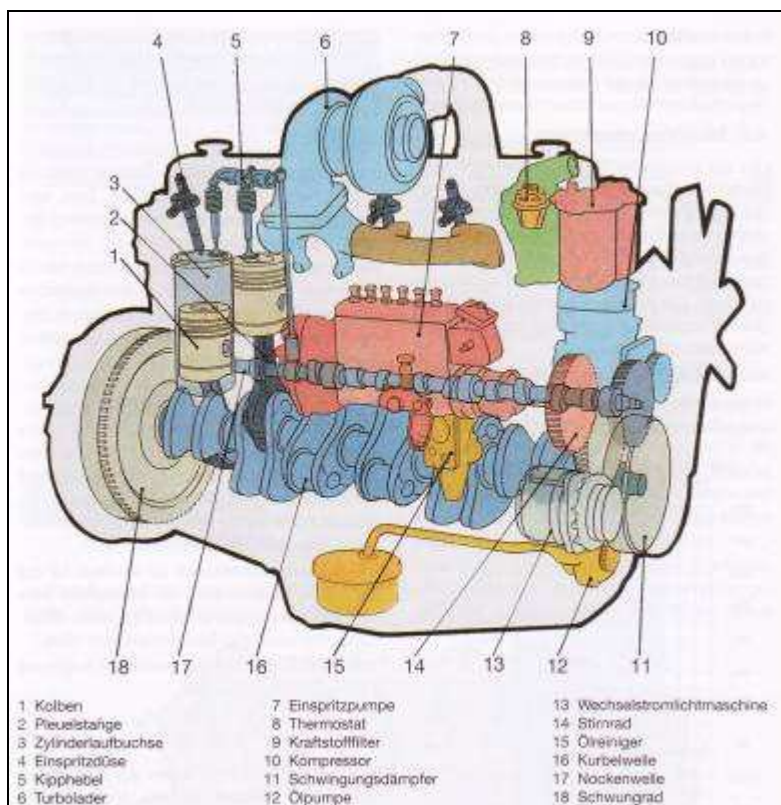


Abb. 3.9: Komponenten eines Dieselmotors; Quelle: [Q 41]

Natürlich besteht ein heute in Kraftfahrzeugen üblicher Motor aus mehreren Zylindern. Eine hohe Zylinderzahl gewährleistet einen ruhigen Lauf und ein gleichmäßiges Drehmoment. In schwereren Nutzfahrzeugen sind heute 6-, 8- und 10-Zylindermotoren als Reihen-, V- oder Unterflurmotoren eingebaut [Q 42]. Je nach Anordnung der Zylinder unterscheidet man die Motorenbauart (siehe Abb. 3.10).

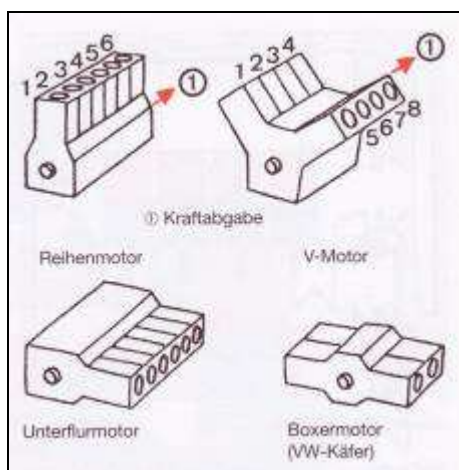


Abb. 3.10: Verschiedene Motorbauarten; Quelle: [Q 42]

3.2 Dieselkraftstoff

Der Dieselkraftstoff ist der vorherrschende Treibstoff bei Nutzfahrzeugen. Er wird – genauso wie Benzin – aus Erdöl gewonnen. Aus dem Rohstoff Erdöl entsteht durch Destillation und/oder Cracken der Dieselkraftstoff. Wie alle Kraftstoffe ist auch Diesel im Wesentlichen ein Gemisch aus Kohlenwasserstoffen. Die Qualität des Kraftstoffs hat Auswirkungen auf die Emissionen, den Verbrauch, die Leistung und die Akustik des Motors. Als Qualitätsmerkmale gelten unter anderem die Cetanzahl, der Schwefelgehalt und der Aromatengehalt. Mit diesen Kennzahlen lässt sich der Verbrennungsprozess optimieren. Eine präzise eingestellte Verbrennung zusammen mit einer geeigneten Abgasnachbehandlung sollen die Schadstoffemissionen möglichst gering halten.

Die **Cetanzahl** ist ein Maß für die Zündwilligkeit des Dieselkraftstoffs und entspricht in ihrer Bedeutung der Oktanzahl beim Ottomotor. Dieselmotoren funktionieren nach dem Prinzip der Selbstzündung. Der Treibstoff muss sich nach dem Einspritzen in die durch die Kompression erhitzte Luft möglichst rasch selbst entzünden. Die Zündverzugszeit, die Zeit die zwischen dem Beginn des Einspritzvorgangs und dem Beginn der Entflammung verstreicht, beträgt etwa 1,5 Millisekunden. Je leichter sich der Kraftstoff entzünden lässt, umso höher die Cetanzahl. Motorenhersteller schreiben eine Cetanzahl von mindestens 45 vor, an heimischen Tankstellen erhältlicher Dieselkraftstoff hat üblicherweise Cetanzahlen von über 50. Dieser Wert kann mittels Additiven verbessert werden. Dabei handelt es sich insbesondere um organische Nitrate und Peroxyde, die als Zündbeschleuniger wirken. Eine höhere Cetanzahl wirkt sich durch die verbesserte Verbrennung auch positiv auf das Geräuschverhalten und auf die Emissionen, insbesondere bezüglich Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Stickoxiden, aus.

Der **Schwefelgehalt** ist für das Abgasverhalten von Bedeutung. 95% des Schwefelgehalts wird bei der Verbrennung des Dieselkraftstoffes zu Schwefeldioxid verbrannt, ein giftiges Gas, das erheblich zur Luftverschmutzung beiträgt. Seit 1. Jänner 2009 ist der Schwefelgehalt des Dieselkraftstoffes in Europa auf maximal 10 ppm reglementiert (Vgl. [Q 43], [Q 44], [Q 45]).

Die Tab. 3.2 bietet einen Überblick über die wichtigsten Kennwerte von Diesel.

	Anforderungen für Dieselkraftstoffe
Dichte bei 15°C	0,82 - 0,845 kg/l
Cetanzahl	>51
Heizwert	ca. 42,5 MJ/kg
Flammpunkt	>55°C
Schwefelgehalt	<10 ppm
Viskosität bei 40°C	2,0 - 4,5 mm ² /s

Tab. 3.2: Kennwerte von Dieselkraftstoff; eigene Darstellung, Quellen: [Q 46], [Q 45]

3.3 Abgase und Normen

3.3.1 Abgase

Als Abgase bei der Verbrennung des Dieseltreibstoffes gelten vor allem folgende Stoffe:

- Kohlendioxid (CO₂)
- Wasserdampf (H₂O)
- Schwefeldioxid (SO₂)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Kohlenwasserstoffe (HC)
- Stickoxide (NO_x)
- Partikel, Russ

Bei der idealen, vollständigen Verbrennung des Dieseltreibstoffes mit ausreichender Sauerstoffzufuhr entstehen in Folge der Oxidation nur die für den Menschen ungiftigen Stoffe **Kohlendioxid** (CO₂) und **Wasserdampf** (H₂O). Im Gegensatz zu den anderen Abgasen aber baut sich Kohlendioxid nicht schnell wieder ab, sondern verweilt lange in der Atmosphäre. Die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre steigt seit dem Beginn des intensiven Einsatzes fossiler Brennstoffe in Industrie, Transport und Heizen stark an. Sie wird für den beobachteten weltweiten Temperaturanstieg („Klimawandel“) und den damit einhergehenden Schäden verantwortlich gemacht.

Durch den Schwefelgehalt des Diesels entsteht außerdem **Schwefeldioxid** (SO₂), welches in Verbindung mit Wasser zu einer schwefeligen Säure führt. Sie hat eine starke Reizwirkung und wirkt ätzend auf Schleimhäute.

Kohlenmonoxid (CO) ist auf die unvollständige Verbrennung des Dieseltreibstoffes zurückzuführen. Je weniger Sauerstoff für die Oxidation vorhanden ist (Maß: Luftüberschusszahl λ), umso mehr Kohlenmonoxid entsteht dabei. Kohlenmonoxid ist ein giftiges, farb- und geruchloses Gas und kann schon in geringer Konzentration in der Atemluft zum Tod führen (Kohlenmonoxidvergiftung). Der CO-Gehalt kann aber durch Erhöhung der Luftüberschusszahl verringert werden, z.B. mithilfe eines Turboladers.

Bei extremem Luftmangel ($\lambda < 1$) wird sogar reiner Kohlenstoff in Form von **Russ** ausgestoßen (siehe Abb. 3.11). Es handelt sich dabei aber nicht nur um reinen Kohlenstoff. Auch Öladditive, Korrosionsprodukte, Abriebprodukte etc. lagern sich an Kohlenstoffkernen an. Russ in der Atemluft gilt als krebserregend und kann mit

einer hohen Luftüberschusszahl, guter Gemischaufbereitung bzw. Partikelfiltern stark reduziert werden.

Kohlenwasserstoffe (HC) sind komplizierte Verbindungen von Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen und sind in verschiedenster Form im Abgas vorhanden. Mangelhafte Zerstäubung des Dieselmotors bzw. unvollständige Gemischverbrennung durch vorzeitiges Erlöschen der Flamme gelten als Hauptverursacher. Ungesättigte Kohlenwasserstoffe tragen zur Smog-Bildung bei und manche davon gelten als krebserregend. Man kann der Kohlenwasserstoffbildung z.B. durch eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur entgegenwirken.

Auch **Stickoxide** (NO_x), welche durch den Stickstoffanteil der Verbrennungsluft entstehen, haben schädliche Auswirkungen auf den Menschen (Beeinträchtigung der Lungenfunktion). Begünstigend für die Entstehung wirkt eine hohe Verbrennungstemperatur.

In Abb. 3.11 sind die bedeutendsten Schadstoffemissionen in Abhängigkeit von der Luftüberschusszahl aufgetragen. Es gibt keinen idealen Bereich, in dem alle Schadstoffe ihr Minimum haben, es kommt immer zu einem gewissen Trade-Off. (Vgl. [Q 47])

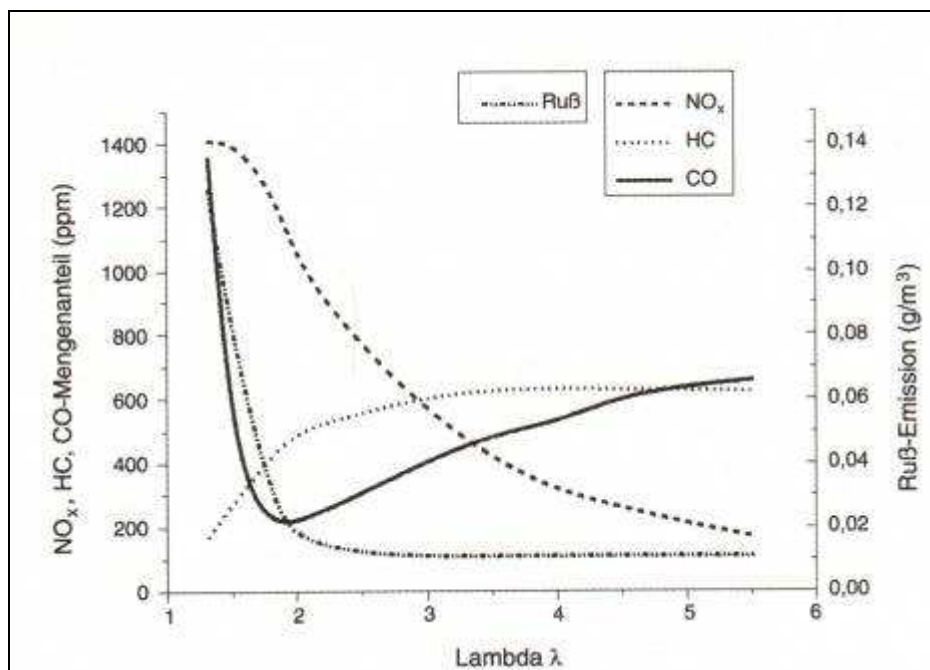


Abb. 3.11: Schadstoffemissionen über die Luftüberschusszahl Lambda; Quelle: [Q 48]

3.3.2 Abgasnormen in der EU

Um die schädlichen Einflüsse der Abgase zu minimieren, wurden bereits in den Achtzigerjahren von der Europäischen Gemeinschaft Emissionsbeschränkungen für Dieselmotoren eingeführt. Diese hatten aber in keinem Land Gesetzeskraft. Im Sinne einer Vereinheitlichung wurden von der EU Richtlinien erlassen, die von den Mitgliedsstaaten im Hinblick auf die damalige Öffnung des freien Binnenmarktes bis Ende 1992 erfüllt werden mussten. Es gibt Grenzwerte für Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Russpartikel. Für die Ermittlung der Messwerte existieren spezielle Prüfbedingungen („13-Stufen-Test“, Informationen dazu in: [Q 49]). Beginnend mit der EURO-0-Norm im Jahre 1990 wurden die Grenzwerte bis zur EURO-VI-Norm, die ab dem Jahr 2014 für alle Dieselmotoren neu zugelassener Fahrzeuge gilt, immer weiter verschärft (siehe Tab. 3.3 und Tab. 3.4). (Vgl. [Q 50], [Q 49])

EU-Emissionsgrenzwerte für Dieselmotoren (Straße) in g/kWh (für Schienenfahrzeuge existieren <u>keine</u> rechtsverbindlichen Abgasnormen)							
	1990	1993	1996	2001	2006	2009	2014*
	EURO 0	EURO I	EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V	EURO VI
HC	2,60	1,23	1,10	0,66	0,46	0,46	0,13
CO	12,30	4,90	4,00	2,10	1,50	1,50	1,50
NO _x	15,80	9,00	7,00	5,00	3,50	2,00	0,40
Ruß	-	0,40	0,15	0,10	0,03	0,03	0,01

Tab. 3.3: EU-Emissionsgrenzwerte seit 1990 in g/kWh, Quelle: [Q 50]

Reduzierung gegenüber Euro 0							
	1990	1993	1996	2001	2006	2009	2014*
	EURO 0	EURO I	EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V	EURO VI
HC	0%	-52,7%	-57,7%	-74,6%	-82,3%	-82,3%	95,0%
CO	0%	-60,2%	-67,5%	-82,9%	-87,8%	-87,8%	87,8%
NO _x	0%	-43,0%	-55,7%	-68,4%	-77,8%	-87,3%	97,5%
Ruß	0%	0,0%	-62,5%	-75,0%	-95,0%	-95,0%	97,5%

Tab. 3.4: Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte seit der EURO-0-Norm im Jahr 1990 in Prozent, Quelle: [Q 50]

3.4 Weitere Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung

Abgesehen vom Einsatz alternativer Antriebe oder Kraftstoffe gibt es auch Maßnahmen, mit denen vor allem im Segment der Langstrecken- bzw. Schwerlast-LKWs große Effizienzsteigerungspotenziale realisiert werden können. Unter anderem mit den nun folgenden Maßnahmen soll laut dem US Department of Energy langfristig eine LKW-Energieintensitätssenkung von 30 bis 40 Prozent möglich sein [Q 51]:

- Volumenoptimierung und Gewichtseinsparungen

Gesetze und Vorschriften regulieren die höchstzulässigen Systemlängen bzw. Gesamtgewichte. Die maximale Gesamtlänge eines Lastkraftwagens liegt bei 18,75 m, die maximale Fahrzeugbreite bei 2,55m und die maximale Höhe bei 4m. Im Rahmen dieser Bedingungen gibt es immer neue Bemühungen, die Ladevolumina durch technische Neuheiten wie Kurzkuppelsysteme etc. zu vergrößern. Als konstruktiv durchführbare Obergrenze sind Ladevolumina von etwa 110 m³ erreichbar.

Außerdem ist der Trend zu immer leichteren Fahrzeugen ungebrochen. Jedes Gewicht, das am Fahrzeug selbst eingespart werden kann, ist mit einer Steigerung der möglichen Nutzlast verbunden. Ersetzt man beispielsweise den Stahl-Leiterrahmen durch eine Aluminiumkonstruktion, so sind große Gewichtseinsparungen möglich. Fahrerhäuser nach dem Space-Cage-Prinzip oder aus Faserverbundwerkstoffen sind weitere Möglichkeiten.

Solche Gewichtseinsparungen bringen außer einer Erhöhung der Nutzlast noch mit sich, dass die dadurch leichteren Nutzfahrzeuge bei Leerfahrten weniger Kraftstoff verbrauchen. (Vgl. [Q 52])

- Erhöhung des höchst zulässigen Gesamtgewichts

Das maximal zulässige Gesamtgewicht liegt in Österreich bei 32 Tonnen für Solo-LKWs bzw. mit Anhängern bei 40 Tonnen. In anderen Ländern, wie zum Beispiel Dänemark oder Schweden, sind bis zu 60 Tonnen erlaubt. Berechnungen des Bundesamtes des deutschen Groß- und Außenhandels haben ergeben, dass mit 60 Tonnen-LKWs etwa 15 Prozent an Kraftstoff durch die verminderte Anzahl an benötigten Nutzfahrzeugen eingespart werden können [Q 53]. Die maximale Gesamtlänge erhöht sich damit auf 25,25m.

Dem muss man aber entgegenstellen, dass durch eine Erhöhung des höchst zulässigen Gesamtgewichtes (hzGG) die Straßenabnutzung zunimmt, was zu Mehrkosten bei Instandhaltung und Reparatur der Verkehrsinfrastruktur führt. Außerdem gibt es Befürchtungen, dass durch größere und schwerere Lastkraftwagen das aus ökologischen Gründen vorzuziehende

Transportmittel Schiene noch unattraktiver wird [Q 54]. Zudem würden solche „Gigaliner“ zu Problemen wie dem erhöhten Platzbedarf bei engen Kurven usw. führen.

- Verbesserung an der Aerodynamik

Speziell für Langstreckenfahrzeuge, die eine lange Zeit durchgehend mit hoher Geschwindigkeit gegen den Fahrtwind unterwegs sind, machen sich aerodynamische Verbesserungen schnell bezahlt. Dachhauben sind heute schon Standard, immer öfter werden Seitenverkleidungen oder Windleitkörper angebracht, die dem Fahrtwind weniger Widerstand entgegenbringen und somit helfen, Kraftstoff zu sparen.



Abb. 3.12: Windleitkörper; Quelle: [Q 55]

- Vermindern des Reifenrollwiderstands

Der Reifenrollwiderstand ist ein Maß für die Verlustenergie eines Reifens und verursacht eine der größten Kräfte, die jedes Fahrzeug mit Motorleistung zu überwinden hat. LKW-Reifen haben sich im Laufe der Zeit bereits stark verbessert und beinahe alle heute verwendeten Reifen sind Radialreifen zweiter Generation. Aber dennoch sind weitere Reduktionen beim Reifen-Rollwiderstand und damit eine Senkung des Kraftstoffverbrauchs für die Zukunft möglich. (Vgl. [Q 56])

- Effizientere Hilfssysteme

Mit Hilfssystemen sind Kabinenheizung, Klimaanlage, Beleuchtung und andere Komfort erhöhende Gerätschaften gemeint. Sich im Stillstand befindliche LKWs verbrauchen eine nicht zu vernachlässigende Menge an Kraftstoff. Oft wird der Motor bei Fahrpausen nicht ausgeschaltet, um die

Hilfssysteme in Betrieb zu lassen. Installiert man spezielle Auxiliary Power Units (APUs), so werden die Hilfssysteme von diesen betrieben und wirken somit Kraftstoff sparend.

- Verringerung der Anzahl von Leerfahrten

Bei den Vorschlägen zu einer umweltverträglicheren Gestaltung des Gütertransportwesens werden immer wieder Strategien zur Vermeidung von Verkehr im Sinne einer besseren Auslastung genannt. Im gewerblichen Transport sind die Lastkraftwagen nur zu etwa zwei Drittel ausgelastet. Das bedeutet, etwa ein Drittel aller LKWs fahren leer auf den Straßen. Gütertransporte ließen sich umweltverträglicher gestalten, wenn das Verkehrsgeschehen integrativ betrachtet werden würde und eine intensivere Kommunikation praktiziert werden würde. Mit intelligenten Logistiksystemen, die sich der modernen Mittel der Telekommunikation und Datenverarbeitung bedienen, ließe sich die Auslastung entsprechend erhöhen und der Anteil der Leerfahrten würde sinken. Dies gilt insbesondere für den Güternahverkehr. Hier sollte der Schwerpunkt auf Kapazitätsauslastung und effizientere Logistik und somit der Vermeidung überflüssiger Fahrten liegen. (Vgl. [Q 57])

4. Alternative Kraftstoffe

Konventionelle Verbrennungskraftmaschinen, im Gütertransport vor allem der Dieselmotor, sind seit vielen Jahrzehnten erprobte Systeme. Sie können auf eine lange Einsatzzeit mit vielen Erfahrungswerten zurückblicken und wurden dabei auch ständig verbessert. Im Vergleich zu den Anfängen wurde der Kraftstoffverbrauch und somit die Energieintensität stark reduziert. Zugleich sind neben vielen anderen Verbesserungen auch bei den Schadstoffemissionen große Fortschritte gemacht worden, nicht zuletzt aufgrund gesetzlicher Vorschriften (siehe Abschnitt 3.3.2). Man kann also davon sprechen, dass Dieselmotoren ausgereifte technische Systeme sind. Jede Alternative hat sich an diesen zu messen.

Nachdem aber weltweit die Zahl der Kraftwagen seit den Anfängen der Verbrennungskraftmaschine steigt und Prognosen zufolge auch weiter steigen wird, spielen umwelttechnische Bedenken eine immer größere Rolle. Fakt ist außerdem, dass die Ressource Erdöl erschöpflich ist. Es sind also Veränderungen im Transportbereich nötig und die Suche nach Alternativen ist unausweichlich. Es ist aber mit Gewissheit davon auszugehen, dass Veränderungen auch Bedenken auf den Plan rufen, die nachzuweisen versuchen, dass die Alternativen nicht funktionieren oder zu teuer sind. Aus einem vor über 130 Jahren in den USA verfassten Text über die damals anstehende Revolution im Transportsektor sind große Veränderungsängste zu erkennen:

„Eine neue Energiequelle mit dem Namen Benzin ist von einem Bostoner Ingenieur erzeugt worden. Dieser Brennstoff wird nicht unter einem Kessel verbrannt, sondern explodiert im Zylinder eines Motors. (...) Die Gefahren sind offensichtlich. Benzin in den Händen von Leuten, die vor allem an Profit interessiert sind, stellt eine Feuer- und Explosionsgefahr erster Klasse dar. Pferdlose, von Benzin angetriebene Kutschen können Geschwindigkeiten von 14 oder sogar 20 Meilen pro Stunde erreichen. Die Bedrohung, die von solchen Fahrzeugen ausgeht, die durch unsere Straßen rasen und unsere Atmosphäre vergiften, verlangt nach einer gesetzlichen Antwort, auch wenn die militärischen und ökonomischen Implikationen überwältigend sind. (...) Im Übrigen sind die Herstellungskosten des Benzins jenseits der Finanzkraft unserer privaten Industrie. (...) Außerdem werden durch diese Entwicklungen unsere Pferde überflüssig. Dadurch wird unsere Landwirtschaft ruiniert [Q 58].“

Manche dieser Ängste scheinen im Nachhinein absurd. Dennoch muss auch vor übertriebenem Optimismus bei alternativen Antriebskonzepten gewarnt werden. Im Allgemeinen sind diese noch nicht marktreif oder können mit den erprobten Dieselskonzepten preislich nicht mithalten. Außerdem sind viele Konzepte schlechter als ihr Ruf. Dennoch wäre es fahrlässig, nicht weiter nach Alternativen zu suchen und sie weiter zu entwickeln.

Wenn man von Alternativen beim Transport spricht, gibt es zwei Möglichkeiten. Einerseits kann man weiter auf das erfolgreiche Konzept der Verbrennungskraftmaschine bauen und aufgrund ökonomischer bzw. ökologischer Überlegungen auf alternative Kraftstoffe setzen. Diese sind in diesem Abschnitt das Thema. Die zweite Option bricht mit der Verbrennungskraftmaschine und setzt auf elektrische Antriebe. Diese werden im fünften Kapitel behandelt.

Alternative Kraftstoffe werden statt des Dieseltreibstoffs in die Zylinder der Kolbenmotoren eingebracht. Das Prinzip der Verbrennungskraftmaschine bleibt aber dasselbe. Es sind gegebenenfalls nur Änderungen im Kraftstoffspeicher und in den Zuleitungen erforderlich, sprich aller Komponenten, die mit dem alternativen Kraftstoff in Kontakt treten.

Die bedeutendsten Alternativkraftstoffe für den Gütertransport, nämlich Biodiesel, Ethanol und Erdgas, werden in Folgendem besprochen. Es werden unter anderem deren Kosten und Umwelteinwirkungen analysiert, immer im Vergleich zum konventionellen Dieselbetrieb.

4.1 Biodiesel

Biodiesel ist ein Kraftstoff, der auf pflanzliche oder tierische Fettsäuren zurückgeht, und ist somit ein Sammelbegriff für alle Fettsäuremethylester (FAME: Fatty Acid Methyl Ester). In Amerika dient vor allem das Sojaöl und in Asien das Palmöl als Ausgangsstoff. In Europa hat sich das aus der gelb blühenden Rapspflanze (siehe Abb. 4.1) gewonnene Rapsöl durchgesetzt, vor allem weil die Rapssaat einen für mitteleuropäische Breiten hohen Ölgehalt von 40 Prozent hat [Q 59]. Aus dem Rapsöl entsteht die für Europa vorherrschende Form von Biodiesel, der so genannte Rapsölmethylester (RME). Neben den bereits angeführten Ausgangsstoffen sind aber auch die in gemäßigten Klimazonen heimischen Rüben, Sonnenblumen und Flachs anwendbar. In tropischen Klimazonen kommen Olivenbäume, Öl- und Kokospalmen, Erdnuss, Rizinus und Kakao in Frage [Q 60]. Auch Altspeseöle können verwendet werden. (Vgl. [Q 61])



Abb. 4.1: Rapspflanze; Quelle: [Q 62]

4.1.1 Eigenschaften und Herstellung

Pflanzenöl, Rapsöl im Speziellen, ist für die Verwendung in Verbrennungsmotoren eher ungeeignet. Vor allem eine störende Eigenschaft erschwert den Einsatz der in klassischer Form gewonnen Öle beträchtlich. Und zwar deren hohe Viskosität (siehe Tab. 4.1). Das zähflüssige Verhalten bereitet große Probleme bei der Zerstäubung des Treibstoffes, indem es zu Verkokungen an Einspritzdüsen, Ventilen und Brennraumwänden kommt. Dies liegt am langen, verzweigten Molekülaufbau des Öls, welcher das bei der Verbrennung notwendige Durchdringen von Sauerstoffmolekülen zum Kohlenstoff erschwert. Um dieses Problem zu umgehen, werden die Moleküle gekürzt. Man spricht bei diesem Vorgang von Umesterung.

	Cetanzahl	Dichte (15°C) g/cm ³	Heizwert kJ/Kg	Viskosität (20°C) mm ² /sec
Diesel	52	0,83	42500	2
Rapsöl	40	0,915	35000	74
RME	54	0,88	37000	7

Tab. 4.1: Kennwerte von Rapsöl und RME im Vergleich zu Diesel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 63]

Bei der Umesterung wird das Rapsöl mit Methanol unter bestimmten Bedingungen (Temperatur, Druck) in Reaktion gebracht. Die langen Rapsölmoleküle werden dadurch gespalten, Glycerin (ein in Ölen gebundener Alkohol) wird abgetrennt und durch einen anderen Alkohol (Methanol) ersetzt. Es entsteht Rapsölmethylester. Dabei wird, wie in Tab. 4.1 ersichtlich, die Cetanzahl erhöht und die Viskosität verringert sich auf etwa ein Zehntel des Ausgangswertes. Zu beachten ist aber der hohe verfahrenstechnische Aufwand, der etwa 360 kJ/l beträgt. (Vgl. [Q 61], [Q 64])

Man kann also sagen, durch die Umesterung wird das Rapsöl auf die Bedürfnisse des Dieselmotors eingestellt. Das Ergebnis ist Rapsölmethylester, eine Form von Biodiesel. Seit 2005 besteht in Österreich eine Beimischungspflicht zum normalen Diesel, anfangs von 2,5%. Dieser Wert wurde seither schrittweise angehoben. Im Oktober 2008 ist der gesetzlich vorgeschriebene Biodieselanteil auf 5,75% festgesetzt worden [Q 65].

Bei der Verwendung des mit RME versetzten Dieseltreibstoffs bestehen keine Beschränkungen. Wird hingegen reiner Biodiesel verwendet, sind gewisse Umstände zu beachten. Durch den niedrigeren Heizwert des Biodiesels gegenüber Mineralöldiesel ist bei gleicher Leistung von einem Mehrverbrauch von bis zu 5%, je nach Fahrweise, auszugehen [Q 66]. Weiters sind nicht alle LKW-Motoren für den Betrieb mit reinem Biodiesel freigegeben. Die meisten LKW-Hersteller führen Listen, in denen eingesehen werden kann, welche Fahrzeugtypen biodieseltauglich sind. Werden nicht biodieseltaugliche LKWs dennoch mit Biodiesel betrieben, kann es aufgrund des Lösungsmittelverhaltens von RME zu Problemen kommen. Mit Kraftstoff in Kontakt tretende Kunststoffe, beispielsweise in Dichtungen und Zuleitungen, können angegriffen werden und aufweichen. Es werden aber von den Herstellern in der Regel Biodiesel-Pakete angeboten, gegen Aufpreis beim Neukauf oder auch zur Nachrüstung.

Außerdem ist bei abwechselndem Gebrauch von Diesel und Biodiesel ein regelmäßiges Wechseln der Kraftstofffilter vorzusehen, da Biodiesel alte Ablagerungen des mineralischen Kraftstoffs im Tank und in den Leitungen löst. Es wird auch empfohlen, die Wartungsintervalle auf die Hälfte zu reduzieren. (Vgl. [Q 61], [Q 66])

4.1.2 Ökologische Betrachtungen

Der Name Biodiesel impliziert eine naturverträgliche Alternative zum herkömmlichen Diesel, dennoch ist die ökologische Bilanz durchaus ambivalent. Unumstritten ist, dass Pflanzenölmethylester für die **Landwirtschaft** eine große Chance darstellt. Mit Energiepflanzen („Energy Farming“) entsteht ein ganz neuer Zweig, der große Erträge für die Zukunft und eine Aufwertung der Landwirtschaft verspricht. Es würden aber auch die mit Monokulturen einhergehenden Probleme für die Böden auftreten. Regenerationszeiten und Kulturwechsel sind nur zwei Schlagworte, die in diesem Zusammenhang beachtet werden müssen. Dem massenhaften Anbau einzelner Pflanzen in Monokulturen sind durch das Ökosystem relativ enge Grenzen gesetzt [Q 67]. Als nachteilig zu werten sind außerdem die Emissionen aus der landwirtschaftlichen Produktion der Biomasse. Umweltprobleme wie die Eutrophierung (Anstieg der Nährstoffzufuhr, meist in Gewässern) usw. müssen auch mitberücksichtigt werden.

Die **Klimabilanz** stellt sich schwierig dar. Das Pflanzenwachstum entzieht der Atmosphäre Kohlendioxid, das bei der Verbrennung des Biodiesels wieder frei wird. Die von allen gewünschte CO₂-Neutralität hält aber einer genaueren Betrachtung nicht Stand. Grund dafür ist der Herstellungsprozess. Denn das zur Biodieselproduktion benötigte Methanol wird zu 90% aus fossilem Erdgas hergestellt. Auch der oben erwähnte verfahrenstechnische Aufwand ist in diese Kalkulation mit einzubeziehen. Ein weiterer nachteiliger Punkt ist, dass Raps eine relativ düngerintensive Pflanze ist. Durch Düngung entsteht klimaschädliches Lachgas (N₂O). Die Emissionen betragen etwa 12 Gramm N₂O pro eingesetztes Kilogramm Stickstoffdünger [Q 68], was aufgrund des hohen Global Warming Potentials von Lachgas einer CO₂-Emission zwischen 1,8 und 3,5 Kilogramm entspricht [Q 69]. Werden die bei der Produktion anfallenden Kuppelprodukte sinnvoll verwendet, z.B. anfallender Rapsschrot als Futtermittel anstatt importierter Sojabohnen, so kann die Klimabilanz aufgebessert werden. Unter dem Strich bleiben die Emissionsvorteile nach einer Well-to-Wheel-Analyse bei einer Bandbreite von 0,5 bis 3 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Hektar eingesetzter Anbaufläche [Q 70]. Ein geringer Wert, wenn man bedenkt, dass es sich um einen beinahe geschlossenen Kohlenstoffkreislauf handelt. Die große Bandbreite der Zahlen und die damit behafteten Unsicherheiten liegen an den vielen Einflüssen (v.a. beim Anbau und bei der Verwendung der Raps-Nebenprodukte), die berücksichtigt werden müssen und deren Quantifizierung sehr schwer fällt. Vgl. [Q 69])

Die **Emissionen bei der Verbrennung** des Bio-Kraftstoffs stellen sich im Vergleich zum herkömmlichen Diesel wie folgt dar: Kohlenmonoxid kann um 10% reduziert werden, die Kohlenwasserstoffe um 10%, Partikel um 24% und Russ um 52% [Q 66]. Die Stickoxidemissionen steigen hingegen um etwa 8% an [Q 71]. Aufgrund der Schwefelfreiheit können so gut wie keine Schwefeldioxidemissionen registriert werden. Moderne Abgasreinigungssysteme können somit effektiv eingesetzt werden. Dieser Vorteil ist aber seit der Schwefelgehaltsbegrenzung von Mineralöldiesel auf

unter 10ppm nicht mehr bedeutend, weil damit auch herkömmlicher Diesel annähernd schwefelfrei ist.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass es bei der ökologischen Betrachtung des RME stark auf die Gewichtung ankommt. Gewichtet man – wie allgemein üblich – die Klimafolgen schwerer als die unmittelbaren Umwelteinflüsse bei der landwirtschaftlichen Produktion beispielsweise, so ist ein kleiner ökologischer Vorteil erkennbar. Dieser fällt aber deutlich geringer aus als erwartet. (Vgl. [Q 71])

4.1.3 Kosten

Um einen LKW mit reinem Biodiesel betreiben zu können, ist es von Nöten, den Motor auf den Biodieselbetrieb einzustellen. LKW-Produzenten bieten Biodieseltauglichkeit bei einem Neukauf gegen einen Aufpreis von 1.200 bis 2.500 Euro an [Q 72]. Eine **Umrüstung**, um einen vorhandenen LKW biodieseltauglich zu machen, beläuft sich etwa auf denselben Preis. Bei der Umrüstung werden unter anderem Kunststoffe der Dichtungen und Zuleitungen, welche vom Biodiesel angegriffen werden können, ausgetauscht. Nutzfahrzeuge, die einmal biodieseltauglich gemacht worden sind, können ohne Einschränkung auch mit fossilem Diesekraftstoff betrieben werden.

Weiters sind auch die **RME-Kraftstoffpreise** von Interesse. Zuallererst ist anzumerken, dass Österreich ein für Biokraftstoffe ansprechendes Netz von Biodiesel-Tankstellen besitzt. Mit dem Stand Mai 2009 bieten laut ÖAMTC (in [Q 73]) 78 Tankstellen in Österreich reinen Biodiesel an. Was die Preise betrifft, so ist eine eindeutige Tendenz auszumachen. Bei den heutigen Preisen für Mineralöle sind Biokraftstoffe ohne staatliche Subventionierung oder Steuererleichterungen schlichtweg nicht wirtschaftlich. Die Bereitstellungskosten, also die Kosten für Produktion, Konversion und Distribution von Biokraftstoffen, liegen in allen bekannten Studien durchwegs höher als bei fossilen Brennstoffen [Q 74]. In Österreich ist Biodiesel von der Mineralölsteuer befreit und nur so sind die Preise wettbewerbsfähig.

Die Preise unterliegen aber einer großen Volatilität. Eine eigene Recherche von Biodieselpreisen in Österreich ergab große Preisunterschiede auch im Vergleich zu fossilem Diesel. Beispielsweise ist an der Tankstelle „Tanke Blaguss“ in Oberpullendorf im Burgenland der Biodiesel je Liter sogar um 23 Cent teurer als herkömmlicher Diesel (Biodiesel: 1,149 €/l; Diesel: 0,919 €/l; Stand: 25. Mai 2009; Quelle: [Q 73]). An der Tankstelle „Scheier Brennstoffe“ in Vorarlberg hingegen ist Biodiesel um 12,3 Cent günstiger (Biodiesel: 0,85 €/l; Diesel: 0,973 €/l; Stand: 25. Mai 2009; Quelle: [Q 73]). Im Durchschnitt ist aber zu beobachten, dass Biodiesel um ca. 4-8 Cent je Liter günstiger als fossiler Diesel ist.

Berücksichtigt man die Umrüstkosten, Kraftstoffpreise und die durch die kürzeren Serviceintervalle entstehenden Mehrkosten beim Biodieselbetrieb, so kommt man bei einer Wirtschaftlichkeitsrechnung nach [Q 75] zu folgendem Ergebnis in Tab. 4.2:

	Diesel	Biodiesel	Einheit
Kilometerleistung gesamt pro Jahr	120000	120000	km/a
LKW Nutzungsdauer	5	5	a
Zinnsatz	5,5	5,5	%
Kraftstoffverbrauch je 100km	33	34,7	l
Kraftstoffpreis je Liter	0,93	0,85	€
Serviceintervall	80000	30000	km
Kosten je Öl- und Filterwechsel	184	184	€
Anschaffungswert Umrüstung		1200	€
Treibstoffkosten pro Jahr	36828	35394	€
Kosten Öl- und Filterwechsel	277	737	€
Abschreibung Umrüstung		240	€
Finanzierungskosten Umrüstung		33	€
Kosten pro Jahr	37105	36404	€
Kostensparnis zu Mineralöldiesel	701		€

Tab. 4.2: Wirtschaftlichkeit von Biodiesel in LKWs; eigene Darstellung; Quelle: [Q 75]

Bei einem Treibstoffpreisunterschied von durchschnittlich acht Cent je Liter, käme man unter Berücksichtigung sämtlicher Umrüstkosten und Wartungskosten bei reinem Biodieselbetrieb auf eine Kostensparnis von 701 € pro Jahr im Vergleich zu reinem Normaldieselbetrieb. Bereits bei einem Treibstoffpreisunterschied von weniger als sechs Cent je Liter kommt aber der Betrieb mit Biodiesel schon teurer. Die Kostensparnis fällt höher aus, wenn man nur zu Zeiten Biodiesel tankt, in denen dies wirtschaftlich sinnvoll ist und den Rest der Zeit fossilen Diesel tankt.

Anzumerken ist, dass bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung von durchschnittlichen Referenzwerten für LKWs ausgegangen wird. Dabei ist auch der Kraftstoffverbrauch für Biodieselbetrieb um etwa 5% höher angesetzt (s.o.). Die höheren Kosten für Öl- und Filterwechsel erklären sich dadurch, dass diese bei Biodieselbetrieb häufiger vorzunehmen sind (s.o.).

4.1.4 Fazit

Biodiesel ist mit Sicherheit nicht die Lösung aller Kraftstoffprobleme. Die Umweltbilanz fällt ambivalent aus: Probleme, die durch Biodiesel gelöst werden verursachen anderswo neue, oft nicht weniger gravierende. Der Kohlenstoffkreislauf ist zwar gegeben, aber während zusätzliche Kohlendioxidemissionen vermieden werden, emittiert man bei der RME-Produktion andere Treibhausgase in einem Umfang, die diesen Vorteil nahezu zunichte machen.

Außerdem ist Biodiesel im Allgemeinen zu teuer, um eine wirtschaftlich reizvolle Alternative für alle LKW-Betreiber darzustellen. Nur der Mineralölsteuerbefreiung ist es zu verdanken, dass einige LKWs auf Biodiesel umgestellt haben. Vor allem für schwere LKWs mit einer hohen Kilometerleistung ist Biodiesel eine interessante Variante, da sich für diese eine Umrüstung am ehesten amortisiert. Für den Werkverkehr und den Kurzstrecken-, bzw. Verteilverkehr rentiert sich eine Anschaffung kaum. Da der Produktionsvorgang schon lange bekannt und wissenschaftlich gut erforscht ist, ist auch nicht davon auszugehen, dass es aufgrund technologischen Lernens noch einen großen Preisverfall im Vergleich zu Diesel geben wird. (Vgl. [Q 76])

Ein weiterer kritischer Aspekt ist die technische Verfügbarkeit. Eine Studie von OLHOFF [Q 77] kam zu folgendem Ergebnis: Selbst bei einer Ausnützung sämtlicher verfügbarer Anbauflächen hat RME das Potenzial, nur 2,5 bis 3 Prozent des gesamten derzeitigen Treibstoffverbrauchs zu decken. Sogar für den Fall, man würde diesen Anteil für den Straßengüterverkehr „reservieren“, wäre das bei weitem nicht ausreichend.

Nicht zuletzt aufgrund dieser Tatsache ist davon auszugehen, dass Biodiesel weiterhin ein Nischendasein führen wird. Diese Nische wird hauptsächlich vom Fernlast-Verkehr in Anspruch genommen. Aber als Zumischung zum fossilen Diesel mag es auch in Zukunft in vernünftigen Rahmen einen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten.

4.2 Ethanol

Ethanol ist ein flüssiger Treibstoff aus Alkohol und weltweit der bisher am meisten verbreitete biogene Treibstoff. Ausgangsstoffe sind zucker- oder stärkehaltige Pflanzen, wie Zuckerrohr (siehe Abb.4.3), Zuckerrübe (siehe Abb. 4.2), Weizen, Roggen und Mais. Auch aus lignozellulosehaltiger Biomasse kann Ethanol hergestellt werden. Hauptsächlich wird es aber nicht in unseren Breiten verwendet, sondern vor allem in Brasilien und in den USA. In Europa liegt der Marktanteil Ethanols bei nur etwa einem Fünftel aller „Biokraftstoffe“. Dies liegt daran, dass heimische Pflanzen, die für die Ethanolproduktion in Frage kommen, viel weniger umwandelbaren Zucker enthalten als etwa die in Brasilien heimische Zuckerrohrpflanze. Außerdem sind heimische Pflanzen düngerintensiver und stellen deutlich höhere Ansprüche an die Bodenqualität. Die Ethanolproduktion verzeichnet trotz alledem auch in Europa inzwischen starke Wachstumsraten, nicht zuletzt aufgrund der gesetzlich vorgeschriebenen Beimischung. (Vgl. [Q 78])



Abb. 4.2 (links): Zuckerrübe; Quelle: [Q 79]

Abb. 4.3 (rechts): Zuckerrohrplantage; Quelle: [Q 80]

4.2.1 Herstellung

Ethanol ist das Endprodukt einer auf die Ausgangs-Pflanze abgestimmten Produktionskette. Werden stärkehaltige Pflanzen verwendet, wie etwa verschiedene Getreidesorten, so muss die Stärke durch eine entsprechende Vorbehandlung in Zucker umgewandelt werden. Dies geschieht beim Nassmahl- oder beim Trockenmahl-Verfahren. Im Interesse der Kürze sei bezüglich dieser Verfahren auf die Literatur verwiesen: [Q 81], [Q 82]. Zuckerhaltige Pflanzen, in gemäßigten Klimazonen vor allem die Zuckerrübe, werden nach dem Schema in Abb. 4.4 zu Ethanol verarbeitet:

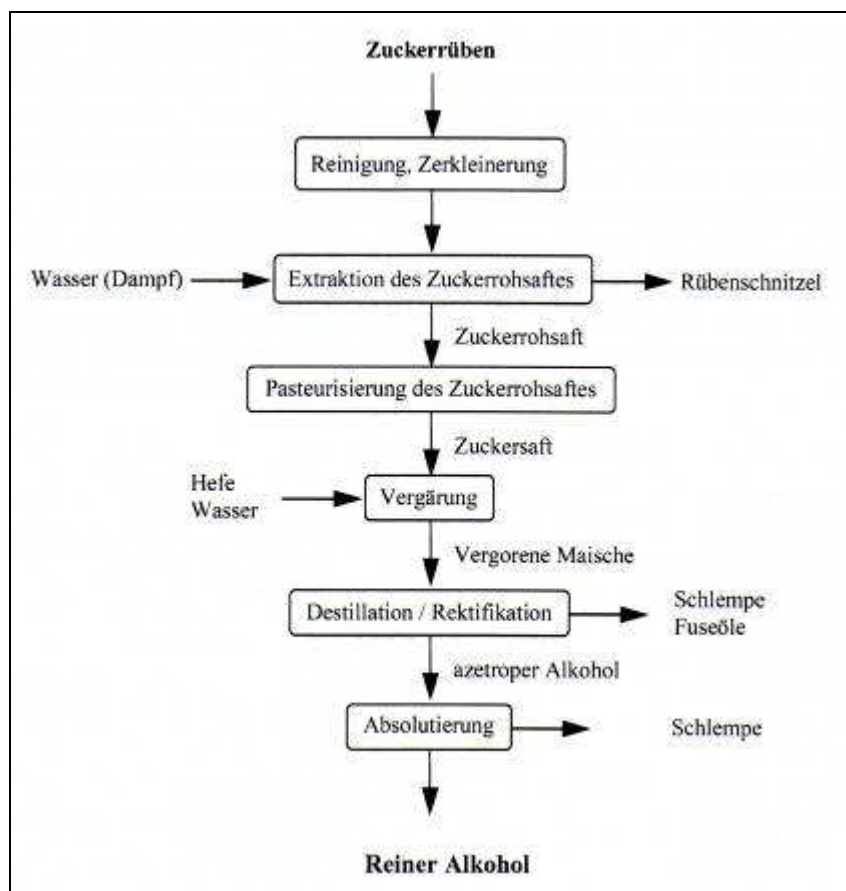


Abb. 4.4: Schema der Verarbeitung von Zuckerrüben zu Ethanol; Quelle: [Q 82]

Nachdem die Pflanzen gereinigt und zerkleinert worden sind, wird ihnen durch Wasserdampf der Zuckerrohsaft entzogen. Die Pasteurisierung bewirkt das Absterben störender Keime. Dem Zuckersaft werden anschließend Hefe oder spezielle Bakterien zugeführt, die Ethanol als Stoffwechselprodukt bilden. Diesen Prozess der Vergärung nennt man Fermentation. Dabei entstehen Flüssigkeiten mit einem Ethanolgehalt von etwa 15%. Bei einem höheren Gehalt sterben die Bakterien und Hefen ab. Mehrstufige Destillation erhöht im Anschluss den Reinheitsgrad auf bis zu 95,6%. Die Reinheit kann aber durch zusätzliche Verfahren (z.B. durch Beimischung von Schleppmitteln) noch weiter erhöht werden. Kuppelprodukte, die bei der Ethanolproduktion anfallen, können unter anderem als Tierfutter oder Dünger verwendet werden (vgl. [Q 82], [Q 83], [Q 84]).

Je nach eingesetzter Biomasse ergeben sich auch unterschiedliche Erträge, siehe Tab. 4.3. In dieser Hinsicht schneidet die Zuckerrübe am besten ab; der durchschnittliche Kraftstoffenergieertrag je Hektar eingesetztem Ackerland ist im Vergleich zu den anderen heimischen Pflanzen am größten, bei den Getreidesorten dagegen erheblich niedriger.

Rohstoff	Kraftstofftrag [l/ha]	erforderl. Biomasse [kg/l]
Mais	3520	2,6
Weizen	2760	2,6
Roggen	2030	2,2
Kartoffel	3550	12,4
Zuckerrübe	6620	9,3

Tab. 4.3: Ethanol-Erträge und erforderliche Biomasse der einzelnen heimischen Ausgangsrohstoffe; Quelle: [Q 85]

Wie oben erwähnt kann auch aus lignozellulosehaltigen Pflanzen so genanntes Zellulose-Ethanol gewonnen werden. Hierbei finden vor allem schnell wachsende Hölzer wie z.B. Pappel, Weide, Rutenhirse und Miscanthus Verwendung [Q 86]. Dieses relativ neue Verfahren wird in dieser Arbeit nicht behandelt; es sei auf die Literatur verwiesen: [Q 86], [Q 87].

4.2.2 Eigenschaften

Wie aus der Tab. 4.4 zu entnehmen ist, hat Ethanol einen geringeren Energiegehalt als Benzin oder Diesel. Ein Liter Ethanol entspricht bezüglich des Energiegehaltes etwa 0,65 Liter Ottokraftstoff. Dadurch ist mit einem Mehrverbrauch von etwa 30% zu rechnen. Da aber die Oktanzahl von Ethanol höher ist als bei Benzin, bringt der Ethanolbetrieb bis zu ungefähr 10% mehr Leistung (Vgl. [Q 84]).

	Ethanol	Diesel	Benzin
Dichte bei 15°C	0,79 kg/l	0,82 - 0,845 kg/l	0,72 - 0,77 kg/l
Oktanzahl	>100		>80
Cetanzahl	3	>49	
Heizwert	ca. 26,8 MJ/kg	ca. 42,5 MJ/kg	ca. 41 MJ/kg
Flammpunkt	<21°C	>55°C	- 21°C
Schwefelgehalt	<10 ppm	<10 ppm	<10 ppm
Viskosität	1,5 mm ² /s (20°C)	2,0 - 4,5 mm ² /s (40°C)	0,53 mm ² /s (20°C)

Tab. 4.4: Kennwerte von Ethanol im Vergleich zu Diesel und Benzin; eigene Darstellung, Quellen: [Q 88], [Q 85]

Vor allem aufgrund der geringen Zündwilligkeit (Cetanzahl) kann reines Ethanol nur dem Ottokraftstoff beigemischt werden, nicht aber Dieselkraftstoff. Die hochprozentigste an Tankstellen erhältliche Mischung ist E85 (85% Ethanol und 15% Ottokraftstoff). Der 15%ige Benzinanteil dient der Verbesserung der bei reinen Alkoholen kritischen Kaltstart- und Kaltlaufeigenschaften unterhalb von etwa 15°C. Da die meisten Nutzfahrzeuge mit Dieselkraftstoff betrieben werden, gibt es auch Bestrebungen, Dieselmotoren mit Ethanol zu betreiben. Dafür sind zum reinen Ethanol noch fünf bis sieben Prozent Additive notwendig, die die Zündwilligkeit erhöhen und die bei Ethanol unzureichende Schmierung verbessern. (Vgl. [Q 89])

Eine andere Möglichkeit ist, Dieselmotoren mit reiner Ethanoleinspritzung parallel zu einer Dieselkraftstoffeinspritzung zu betreiben. Hier müssen nach E. HOEPKE umfangreiche motorseitige Anpassungen vorgenommen werden: „Die Anpassung des Dieselmotors an den reinen Betrieb mit Ethanol erfordert den Einbau einer zweiten parallel arbeitenden Einspritzanlage – für den Kaltstart bzw. Leerlauf eine Dieselkraftstoffeinspritzung und mit steigender Last zunehmender Anteil der Alkoholeinspritzung –, oder die Verwendung einer Glühkerze. [Q 88]“

4.2.3 Ökologische Betrachtungen

Ähnlich wie beim Biodiesel, wird von Befürwortern des Ethanolbetriebs oftmals der positive Kohlendioxid-Effekt zur Geltung gebracht. Das Kohlendioxid, das bei der Verbrennung frei wird, wurde zuvor beim Pflanzenwachstum aus der Atmosphäre gebunden („Klimaneutralität“). Bei dieser Betrachtung wird aber der Energieaufwand beim Anbau und der Pflege vernachlässigt. Außerdem entstehen bei der Düngung wie beim Biodiesel schädliche Klimagase (Lachgas). Kritiker sprechen daher von einem geringen Kohlendioxid-Einspareffekt. Tatsächlich gestaltet sich die **Klima-Bilanzierung** wieder äußerst schwierig. Die Ergebnisse divergieren stark und hängen von vielen Faktoren ab:

- Pflanzenwahl
- Wahl des Umwandlungsprozesses
- Anbau, Düngung
- Weiter verwendete Kuppelprodukte, die andere energieintensive Produkte überflüssig machen
- Viele weitere...

Allein die Wahl des Ursprungs der Prozessenergie hat einen großen Einfluss auf die Klimabilanz (siehe Tab. 4.5). Verwendet man für die Energie der Umwandlung nur fossile Energieträger, so werden bei der Bereitstellung von einem Liter Ethanol im Mittel etwa 1,1 kg CO₂-Äquivalente emittiert. Das ist mehr als das Dreifache der Bereitstellung von der einem Liter Ethanol entsprechenden Energiemenge an Benzin. Nimmt man dagegen regenerative Energieträger, könnte man die Treibhausgasemissionen auf etwa 0,4 kg CO₂-Äquivalente senken. Die Nutzungsphase allein ist – wie oben erwähnt – tatsächlich klimaneutral, im Gegensatz zum Benzin. Betrachtet man also die Bereitstellung und Nutzung zusammen, so ist ein positiver Treibhausgas-Einsparungseffekt erkennbar, jedoch stark abhängig von der Wahl der Prozessenergie. Neue Studien sprechen von einer Einsparung an Kohlendioxid-Äquivalenten unter Berücksichtigung aller Vorketten (Transport, Dünger, Anbau, Kuppelprodukte) von 0,5 kg/l Ethanol bei Weizen und bis zu 2,2 kg/l bei Zuckerrohr als Rohstoffbasis. Diese Spitzenwerte sind in Europa aber kaum zu erreichen. Hier kann man von maximal 1,5 kg/l bei der Zuckerrübe ausgehen. In einer flächenbezogenen Betrachtung resultiert daraus eine Einsparbandbreite von drei bis elf Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Hektar. (Vgl. [Q 84])

Alle Angaben beziehen sich auf den Energieinhalt von einem Liter Ethanol (21,2 MJ)	Benzin	Ethanol	
		Mittelwert: fossile Energieträger	Mittelwert: nicht ausschließlich fossile Energieträger
Bereitstellung			
Treibhausgasemissionen in CO ₂ -Äquivalenten	0,33 kg	1,1 kg	0,4 kg
Nutzung			
Treibhausgasemissionen in CO ₂ -Äquivalenten	1,53 kg	–	–
Kumuliert			
Treibhausgasemissionen in CO ₂ -Äquivalenten	1,86 kg	1,1 kg	0,4 kg
Primärenergieaufwand	26,1 MJ	14,1 MJ	3,0 MJ

Tab. 4.5: Primärenergieaufwand bei der Nutzung und Bereitstellung von Ethanol, je nach verwendeten Energieträgern, im Vergleich zu Benzin; Quelle: [Q 90]

Diese Betrachtungen relativieren die Klimaneutralität deutlich. In Bezug auf Nutzfahrzeuge müssen aufgrund des zusätzlichen Aufwandes wie Lösungsmittler noch weitere Abstriche in Kauf genommen werden. Es bleibt bei einer Well-to-Wheel-Betrachtung – wenn überhaupt – mit den heutigen technologischen Mitteln nur ein relativ kleiner positiver Klimateffekt übrig.

Bezüglich der direkten Umwelteinflüsse und Auswirkungen auf die **Landwirtschaft** gilt sinngemäß das beim Biodiesel Gesagte (siehe Abschnitt 4.1.2). Eutrophierung der Gewässer, Versauerung der Böden und die Probleme der Monokulturen zeigen auch hier Schattenseiten auf.

Eindeutige Vorteile sind hingegen bei der **Emission von Schadstoffen** zu verzeichnen. So emittieren Ethanolfahrzeuge weniger Russ, Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxide (vgl. [Q 88], [Q 85]). Bei den Stickoxiden kann keine markante Minderung festgestellt werden. (Vgl. [Q 91])

4.2.4 Kosten

Auch Ethanol wird dem herkömmlichen Treibstoff bereits zugemischt. Benzin enthält seit 2008 ebenfalls zu etwa 5% Ethanol. Ein Ethanol-Anteil von bis zu zehn Prozent stellt für Ottomotoren kein Problem dar. Höhere Beimengungsraten machen Anpassungen nötig. Dr. Bernhard Geringer, Professor am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugbau an der TU Wien, nennt die Erfordernisse: „Das volle Potenzial von Bioethanol zur Wirkungsgradsteigerung lässt sich erst durch eine Optimierung des Motors auf die speziellen Kraftstoffeigenschaften voll ausnützen. (...) Dazu bedarf es – neben Materialanpassungen – adaptierter Motorsteuerungsparameter wie Einspritzmenge, Zündzeitpunkt und dergleichen [Q 92].“

Nutzfahrzeuge mit Ottomotoren, das sind in der Regel kleine Transporter, können umgerüstet werden. Der Preis für einen Umbausatz liegt zwischen 50 und 600 Euro. Dieser amortisiert sich aber im Allgemeinen nicht. Der Preis für E85 liegt zurzeit im Mittel etwas unter 90 Cent je Liter (Quelle: [Q 73], Stand: 31. Mai 2009). Man muss aber dazu noch den etwa 30%-igen Mehrverbrauch mit einrechnen, um diesen Preis mit Superbenzin vergleichen zu können. Und da zeigt sich, dass Ethanol momentan noch unwirtschaftlich ist. Der Superbenzinpreis liegt in Österreich zwischen 95 und 110 Cent je Liter (Quelle: [Q 73], Stand: 31. Mai 2009). Dieselbe Energiemenge in E85 würde günstigstenfalls etwa 114 Cent kosten. Es sei an dieser Stelle auch noch erwähnt, dass Ethanol in Österreich von der Mineralölsteuer befreit ist. Ohne diesen Vorteil wäre für E85 der Preisnachteil noch viel größer. (Vgl. [Q 93])

Die Hauptursache dafür liegt in den hohen Produktionskosten von Bioethanol. Diese fallen in Europa im Vergleich zu anderen Teilen der Welt ungünstig aus. In Mitteleuropa ist im Optimalfall von Kosten im Bereich von 63 bis 72 Cent je Liter Benzinäquivalent auszugehen. In den USA wird hauptsächlich Mais zur Ethanolproduktion verwendet und der Ethanolproduktionspreis liegt dort etwa bei deutlich niedrigeren 40 Cent je Liter. In Brasilien, dem Vorreiter in Sachen Ethanolnutzung, ist man mit Produktionskosten von 20 bis 25 Cent je Liter Benzinäquivalent bereits günstiger als die Bereitstellungskosten für ein Liter Ottokraftstoff. Der Produktionspreisunterschied liegt vor allem in der besseren Rohstoffsituation und dem höheren Produktionsvolumen begründet. Weiters sind auch die Arbeitskosten in Brasilien wesentlich niedriger. (Vgl. [Q 94])

Die Umstellung der Infrastruktur ist hingegen relativ kostengünstig. Zwar gibt es in Österreich bislang nur wenige E85-Tankstellen, doch aufgrund der benzinähnlichen

Beschaffenheit fallen für die Umrüstung der Tankstellen und Zulieferungsbetriebe im Vergleich zu gasförmigen Brennstoffen beispielsweise kaum Kosten an.

4.2.5 Einsatzbeispiele

Neben Brasilien ist in Europa vor allem Schweden als Pionierland in Sachen Ethanol zu bezeichnen. Schweden hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2020 unabhängig von Erdölimporten zu werden und setzt auch ernsthafte Anstrengungen in die Vermarktung Ethanols als Kraftstoffalternative. So gibt es in dem skandinavischen Land bereits 450 Tankstellen mit E85 [Q 95]. In Österreich sind es zum Vergleich nur sieben [Q 96].

Etwa 15% aller in Schweden verkaufter Neuwagen sind so genannte **Flexible Fuel Vehicles (FFV)**. Diese Technologie kommt für alle benzinbetriebenen Fahrzeuge, also PKW und auch viele Transporter, in Frage. Vor allem Ford, Saab, Volvo und Mazda sind auf diesem Gebiet führend. FFV-Motoren können mit einem beliebigen Mischverhältnis von Ethanol und Benzin betrieben werden. Messfühler, die mit den Motorsteuersätzen gekoppelt sind, erkennen das Mischverhältnis und passen die Einspritzmenge und Einspritzzeitpunkt dem vorhandenen Mix an, um eine optimale Verbrennung zu ermöglichen. Außerdem müssen natürlich alle Kraftstoff führenden Teile dem Ethanol angepasst werden. (Vgl. [Q 97])

Als schwedisches Unternehmen ist auch der Lastwagenproduzent Scania federführend bei **ethanolbetriebenen LKWs**. Eigenen Angaben zufolge hält „Scania Ethanol für den zurzeit kosteneffizientesten erneuerbaren Kraftstoff für den Stadtverkehr. (...) Scania baut seit fast 20 Jahren Ethanol-Motoren für Busse. Die Technologie ist ausgereift und hat sich im intensiven harten Alltag der Stadtbusse bewährt [Q 98].“ Im Jahr 2007 hat Scania als bisher einziger LKW-Hersteller einen LKW mit einem Dieselmotor entwickelt, der nur mit Ethanol – versetzt mit etwa 5% Additiven zur Verbesserung des Zündverhaltens – betrieben wird: den Scania P 270 (siehe Abb. 4.5).



Abb. 4.5: Ethanolbetriebener LKW: Scania P270; Quelle: [Q 99]

Es handelt sich dabei um einen angepassten 9-Liter-Scania-Dieselmotor mit 270 PS und einem maximalen Drehmoment von 1200 Nm. Die Effizienz dieses Motors entspricht dabei dem Dieselmotor-Standard. Im Vergleich zu herkömmlichen Diesel-LKWs umfassen die Modifikationen eine höhere Verdichtung, revidierte Materialien, großvolumigere Kraftstofftanks (aufgrund des niedrigeren Energiegehalts von Ethanol) und angepasste Wartungspläne. Mit diesen Eigenschaften eignet sich das Modell speziell für den Stadt- und Verteilverkehr und somit auch für die meisten Anforderungen des Werkverkehrs. Im Stadtverkehr bewähren sich Ethanolbusse von Scania bereits seit den späten 80er-Jahren in vielen Ländern wie Schweden, Spanien, Italien, Brasilien oder Polen. (Vgl. [Q 100])

Da der für diese Motoren notwendige, spezielle Kraftstoff noch nicht an Tankstellen erhältlich ist, ist man bisher noch auf betriebseigene Tankmöglichkeiten angewiesen. Dies beschränkt den Einsatz vor allem auf größere Konzerne und Kommunen, die sich eine eigene Infrastruktur leisten können und wollen.

4.2.6 Fazit

Ethanol muss sich als biogener Treibstoff vor allem mit Biodiesel messen. Aus ökologischer Sicht ähnelt die Bilanz des Biodiesels. Die Verbrennung ist relativ schadstoffarm. Die Klimavorteile sind zwar nicht eindeutig erwiesen, Studien tendieren aber zu einem positiven Effekt. Negative Umwelteinflüsse vor allem bei Anbau und Pflege der Pflanzen trüben hingegen die Bilanz.

Eine weitere Parallele zum Biodiesel ist die Wirtschaftlichkeit. Die ist in Mitteleuropa aufgrund hoher Produktionskosten und der im Vergleich zu anderen Erdteilen geringen Hektarerträge noch nicht gegeben. Fahrzeuge mit reinem Ethanol oder E85

zu betreiben ist derzeit trotz Mineralölsteuerbefreiung teurer als mit Benzin oder Diesel zu fahren. Daher besteht derzeit kaum ein Anreiz umzusteigen. Allerdings sind durch Ausweitung der Produktion und Optimierung der Herstellungsverfahren noch Preisminderungen realistisch.

Für Ethanol spricht, dass im Vergleich zu gasförmigen alternativen Kraftstoffen die Anpassungen bei Tank und Tank-Infrastruktur nur marginal sind. Man könnte bestehende Tankanlagen aufgrund der benzinähnlichen Beschaffenheit ohne große Probleme auf Ethanol umrüsten.

Die fünfprozentige Ethanolbeimischung zu Benzin ist bereits Realität und verhilft damit Ethanol bereits jetzt zu großem Absatz. Auch darüber hinausgehende Beimischungsstufen werden von Ottomotoren z.B. in FFV-Fahrzeuge genutzt. Erste rein ethanolbetriebene Nutzfahrzeuge sind schon im Einsatz und bewähren sich vor allem im Stadt-, Verteil- und Werkverkehr. Andererseits ist aufgrund des größeren nötigen Tankvolumens reines Ethanol für den Fernverkehr eher unpraktikabel.

Ethanol kann aber auch langfristig und mit optimalem Ausbau der Anbauflächen den Kraftstoffbedarf der Welt nicht stillen und stellt somit nur eine sehr beschränkte Ausweichmöglichkeit dar. Insgesamt ist das Substitutionspotenzial von Ethanol im hohen einstelligen Prozentbereich anzusiedeln [Q 101]. Das ist zwar genug, um eine interessante Nische auch für Nutzfahrzeuge darzustellen, wohl wird aber auch mittelfristig das Hauptaugenmerk auf der Ethanol-Beimischung bleiben, um somit – ähnlich wie Biodiesel – unter idealen Voraussetzungen eine sanfte Abkehr von den fossilen Kraftstoffen zu ermöglichen.

4.3 Erdgas – CNG

Auf der Suche nach emissionsarmen Antriebsarten stößt man sowohl im Personenverkehr als auch im Gütertransport immer wieder auf den Erdgasantrieb. Tatsächlich läuft ein mit Erdgas betriebener Motor im Allgemeinen umweltverträglicher. Außerdem geht man davon aus, dass die Erdgasressourcen noch um einiges weiter in die Zukunft reichen als die von Erdöl: Die Angaben reichen von 60 Jahren bis über 200 Jahre, in denen noch über ausreichend Erdgas verfügt werden kann. Trotz dieser Vorteile ist auch Erdgas ein fossiler, nicht regenerativer Rohstoff, über den nicht beliebig lang verfügt werden kann. Daher stellt Erdgas langfristig höchstens einen Zwischenschritt bei der Abkehr von mineralölbasierten Kraftstoffen dar.

Im Allgemeinen sind aber gasförmige Kraftstoffe für mobile Anwendungen unbequemer als flüssige, da der volumenbezogene Energieinhalt wesentlich niedriger ist. Dies erfordert technisch aufwändige Lösungen für Kraftstofftanks und die Versorgungsinfrastruktur und stellt somit den wesentlichsten Hinderungsgrund dar. Während im Personenverkehr schon viele Fortschritte gemacht wurden, gibt es im Güterverkehr noch relativ wenige erdgasbetriebene Fahrzeuge. Nichtsdestotrotz sind Ansätze vorhanden und werden im Folgenden behandelt.

4.3.1 Eigenschaften und Förderung

Die Hauptvorkommen an Erdgas sind im Wesentlichen in denselben Regionen zu finden wie die von Erdöl. Für Europa sind Russland, Zentralasien und der Nahe Osten die wichtigsten Erdgaslieferanten. Viele dieser Länder sind als politisch instabil zu bezeichnen. Die Versorgungssicherheit wird dadurch beeinträchtigt, zumal der Anteil der Eigenproduktion in Europa im Allgemeinen klein ist.

Erdgas ist ein brennbares Naturgas und besteht hauptsächlich aus Methan (CH_4). Je nach Quelle beträgt der Methananteil bis zu 98%. Weitere Komponenten sind höhere Kohlenwasserstoffe (z.B. Ethan, Propan), Stickstoff, Schwefelverbindungen und bis zu 9% Kohlendioxid. (Vgl. [Q 102])

Grundsätzlich wird Erdgas ohne zusätzliche Hilfsmittel aus den Lagerstätten entnommen, vor Ort gereinigt und getrocknet und im Weiteren dem Transportsystem (zumeist Pipelines) zugeführt [Q 103]. Ist der Methangehalt im Gas zu niedrig, muss es vor der Verwendung einem Reinigungsprozess unterzogen werden, indem das enthaltene Kohlendioxid in die Luft abgegeben wird [Q 102].

Das Methanmolekül (CH_4) besteht, wie in Abb. 4.6 angedeutet, aus vier Wasserstoffatomen und einem Kohlenstoffatom. Das günstige H:C-Verhältnis von 4:1 führt dazu, dass Erdgas mit 56 Tonnen Kohlendioxid pro Terajoule unter den fossilen Treibstoffen die niedrigsten direkten CO_2 -Emissionen je erzeugte

Energieeinheit verursacht. Im Vergleich dazu verursachen Benzin oder Diesel etwa 78 Tonnen je Terajoule [Q 104].

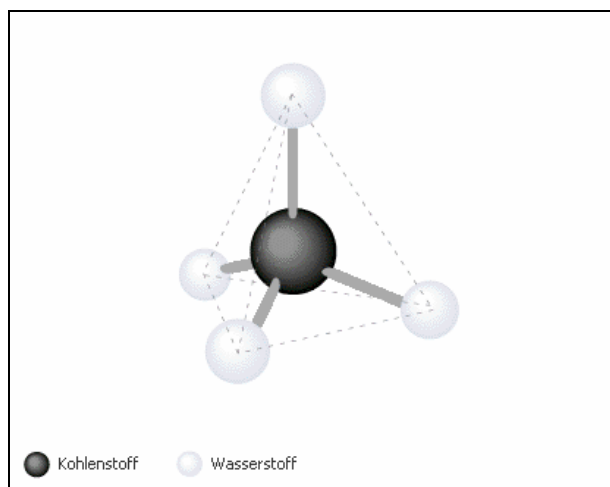


Abb. 4.6: Aufbau des Methanmoleküls; Quelle: [Q 105]

Aufgrund des gasförmigen Aggregatzustands bei normalen Umgebungstemperaturen steigt der technische Aufwand bei der Speicherung. Wie in Tab. 4.6 ersichtlich, beläuft sich der volumetrische Heizwert von Erdgas unkomprimiert auf etwa 0,03-0,04 MJ/l. Erst wenn das Erdgas mit 200 bar unter Druck gesetzt wird, sind für den Transportgebrauch annehmbare volumetrische Heizwerte von 8,9 MJ/l erreichbar. Trotzdem ist damit der Wert von flüssigen Kraftstoffen bei weitem nicht erreicht.

Hervorzuheben ist jedoch die im Vergleich zu Benzin höhere Oktanzahl, die unter anderem zu höherer Laufruhe und damit zu geringeren Geräuschemissionen führt.

	Diesel	Benzin	Erdgas
Dichte (15°C, 1bar)	0,82 - 0,845 kg/l	0,72 - 0,77 k g/l	0,0007 - 0,00084 kg/l (1bar) ca. 0,18 kg/l (200 bar)
Oktanzahl		>80	120 - 130
Heizwert	ca. 42,5 MJ/kg	ca. 41 MJ/kg	40 - 50 MJ/kg
Vol. Heizwert (15°C)	ca. 35,5 MJ/l	ca. 31 MJ/l	0,028 - 0,042 MJ/l (1 bar) ca. 8,9 MJ/l (200 bar)

Tab. 4.6: Kennwerte von Erdgas im Vergleich zu Diesel und Benzin; eigene Darstellung, Quelle: [Q 103]

4.3.2 Technik

4.3.2.1 Monovalent – Bivalent

Man unterscheidet im Wesentlichen zwei Antriebsarten. Fahrzeuge, die sowohl mit Benzin als auch mit Erdgas betrieben werden können, nennt man **bivalent**. Zumeist kann der Fahrer mittels eines Schalters am Armaturenbrett während der Fahrt zwischen den zwei Kraftstoffen wählen. Dies erfordert zwei getrennte Tanksysteme: einen Benzintank und einen oder mehrere Erdgasdruckbehälter. Bivalente Fahrzeuge können jederzeit mit Benzin betrieben werden und sind somit nicht auf das noch lückenhafte Gastankstellennetz angewiesen.

Monovalente Erdgasfahrzeuge sind nur für den Erdgasbetrieb ausgelegt. Sie haben den Vorteil, dass sie nur ein Tanksystem benötigen. Der Motor ist außerdem für Erdgas optimiert und man muss keine Kompromisse für den Benzinbetrieb eingehen. Daher ist mit reduziertem Kraftstoffverbrauch und besseren Leistungseigenschaften zu rechnen. Die Reichweite fällt wegen des fehlenden Benzintanks im Allgemeinen aber geringer aus.

4.3.2.2 CNG – Speicherung

Wie unter Abschnitt 4.3.1 erwähnt, muss Erdgas komprimiert werden, um für mobile Anwendungen interessant zu werden. In Druckspeichertanks, so genannten CNG-Flaschen (CNG: Compressed Natural Gas), wird das Gas auf 200-300 bar komprimiert. Es erreicht so volumetrische Heizwerte, die zwar mehr als das zweihundertfache von unkomprimiertem Erdgas betragen, dennoch liegen sie noch weit unter denen von flüssigen Kraftstoffen. Abb. 4.7 zeigt die im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen ungünstigen Verhältnisse. Es sind für die Speicherung von 55 Liter Benzinäquivalent an Erdgas etwa viermal so viel Volumen und fünfmal so viel Gewicht von Nöten.

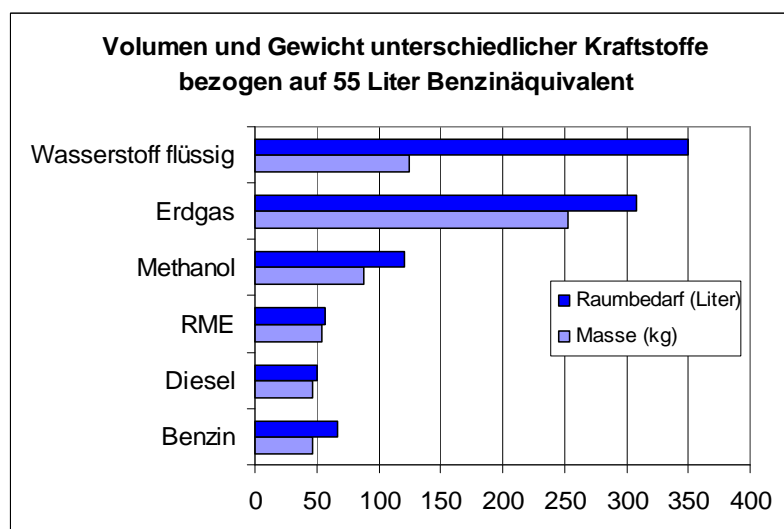


Abb. 4.7: Volumen und Gewicht unterschiedlicher Kraftstoffe bezogen auf 55 Liter Benzinäquivalent; eigene Darstellung, Quelle: [Q 106]

Handelsübliche Stahlflaschen für den Straßenverkehr sind meist zylinderförmig und setzen das Erdgas mit 200 bar unter Druck. Je nach Länge und Durchmesser haben sie ein Fassungsvermögen von 20 bis 110 Liter. Damit können 3,6 bis 19,8 kg Erdgas entsprechend 5,7 bis 31,5 Liter Benzinäquivalent gespeichert werden. Dem Gewicht kommt dabei entscheidende Bedeutung zu. Denn je schwerer die Tanksysteme, umso höher der Nutzlastverlust.

Ein konkretes Beispiel: Eine übliche 50 Liter fassende 200bar-Stahlflasche hat einen Außendurchmesser von 229 mm und ist 1515 mm lang bei einem Leergewicht von 65 kg [Q 107]. Damit erhält man ein spezifisches Eigengewicht von 1,3 kg/l. In gefülltem Zustand beträgt das Gewicht der Stahlflasche etwa 74 kg. Sie enthält damit soviel Energie wie etwa 14,2 Liter oder 10,7 kg Benzin (ohne Tank).

Um das Gewicht der Erdgastankanlagen und den Nutzlastverlust zu senken, gibt es zwei Möglichkeiten:

- Man kann den **Druck erhöhen**. Bei einer Stahlflasche mit 300 bar Nennfülldruck mit denselben Abmessungen wie oben erhöht sich der maximale Gasinhalt um ca. die Hälfte. Das Leergewicht erhöht sich um nur 12 kg auf 77 kg [Q 107], wobei das spezifische Eigengewicht auf 1,54 kg/l steigt.
- Eine andere Möglichkeit Gewicht zu sparen, ist auf andere Materialien zu setzen. Es wird intensiv an möglichen Alternativen zu Stahl geforscht, die eine Leergewichtsreduktion bewirken. Im mobilen Bereich werden daher auch **Composite-Tanks** verwendet. Stahlcomposite-Behälter beispielsweise setzen sich aus einem nahtlosen Kernbehälter (Liner) aus Chrom-Molybdän-Stahl umwickelt von Kohlefasern zusammen. Der Liner ist für die Dichtigkeit verantwortlich, während das Netz aus Kohlefasern für die notwendige Festigkeit der Gasdruckbehälter sorgt. Vollcomposite-Behälter zeichnen sich dadurch aus, dass der Liner aus leichtem Kunststoff hergestellt ist und dadurch ein besonders günstiges Gewicht/Volumen-Verhältnis aufweisen. Bei entsprechender Größe der Tanks ist ein spezifisches Eigengewicht bei Stahlcomposite-Tanks von unter 0,7 kg/l bereits möglich. Bei großen Vollcomposite-Tanks sind Werte von unter 0,4 kg/l in Zukunft realistisch. Composite-Tanks sind zwar leichter, aber auch wesentlich teurer [Q 108], [Q 109].

4.3.2.3 Motor

Erdgas kann ohne große Probleme als Benzinersatz in Ottomotoren verwendet werden. Dieselmotoren können zwar auch umgerüstet werden, diese werden aber so modifiziert (z.B. durch Anbringung von Zündkerzen), dass die Gemischaufbereitung nach dem Ottoprinzip arbeitet. Als reiner Dieselerersatz kann Erdgas aufgrund der fehlenden Selbstzündungseigenschaft nicht dienen.

Die Kraftstoffzufuhr erfolgt bei Erdgasbetrieb ganz ähnlich wie die Benzinzufuhr (siehe Abb. 4.8). Die Sensorik, Aktorik und die Einspritztechnik unterscheiden sich

nur geringfügig von denen des benzinbetriebenen Motors. Eine Umrüstung ist daher prinzipiell für jeden modernen Ottomotor möglich. Dieser kann dann sowohl benzin- als auch erdgasbetrieben werden.

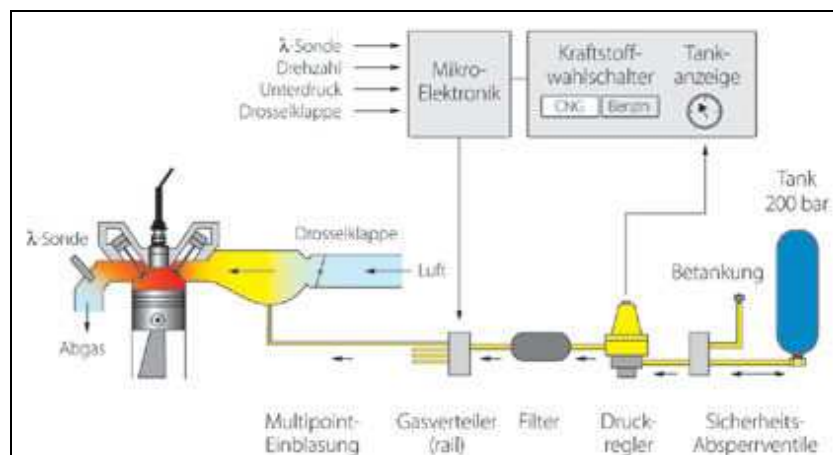


Abb. 4.8: Prinzip der Gasinjektion in einen Verbrennungsmotor; Quelle: [Q 110]

Schaltet der Fahrer eines bivalenten Fahrzeuges auf CNG-Antrieb um, strömt das Erdgas von der Hochdruck-Seite (üblich sind 200 bar-Tanks) über Druckregler auf die Niederdruckseite. Ein von einem Mikrokontroller gesteuerter Verteiler sorgt für die richtige Gasmenge je Zylinder. Einzelne Leitungen führen den Treibstoff für jeden Zylinder über Einblasventile bis vor die Einlassventile. Hier wird der Treibstoff mit Luft vermischt und es entsteht ein zündfähiges Erdgas-Luftgemisch. Die Lambdasonde liefert Informationen über die aktuelle Abgaszusammensetzung an die Mikroelektronik, die die Luftzufuhr über die Drosselklappe dementsprechend regelt. Die Mikrorechner lassen sich für optimale Abgaswerte auf verschiedene Motortypen und Erdgasqualitäten abstimmen. Trotzdem ist bei bivalenten Fahrzeugen aufgrund der Kompromisse, die für den ebenso möglichen Benzinbetrieb eingegangen werden müssen, mit schlechteren Eigenschaften zu rechnen als bei monovalenten Fahrzeugen. (Vgl. [Q 111], [Q 112], [Q 113])

Umgerüstete Fahrzeuge können im Erdgasbetrieb geringe Leistungseinbußen gegenüber dem Benzinbetrieb aufweisen. Erdgasoptimierte Motoren nutzen die produktspezifischen Vorteile von CNG und können wegen ihres hohen Entwicklungspotenzials einen Leistungsgewinn von 5 - 10% gegenüber herkömmlichen Benzinmotoren erzielen [Q 114].

Der Treibstoffverbrauch ist aufgrund der etwas höheren massespezifischen Heizwerte von Erdgas etwas niedriger als bei Benzin und Diesel: Speziell monovalente Fahrzeuge fahren effizienter. Die im Allgemeinen niedrigeren Treibstoffkosten führen dazu, dass sich die Mehrkosten für die Umrüstung oder Anschaffung nach gewisser Zeit amortisieren (siehe später).

4.3.2.4 Infrastruktur

Die erste öffentliche CNG-Tankstelle wurde im Jahr 1997 in Graz errichtet. Seit 2003 ist das CNG-Tankstellennetz so dicht, dass man ohne Probleme nur mit CNG durch Österreich hindurch fahren kann. Ende des Jahres 2006 gab es österreichweit 36 öffentliche CNG-Tankstellen. Ab diesem Zeitpunkt geht der Ausbau rapide voran. Zum jetzigen Zeitpunkt sind es bereits 143 (Stand: 12. Juni 2009, Quelle: [Q 115]) und noch im Jahr 2010 soll die 200. Tankstelle CNG anbieten können. (Vgl. [Q 116])

Wie in Abb. 4.9 gezeigt, konzentriert sich das Tankstellennetz aber hauptsächlich auf Autobahnen und Ballungszentren. Vor allem in ländlichen und abgelegeneren Gebieten ist die Versorgungssicherheit noch nicht gewährleistet.

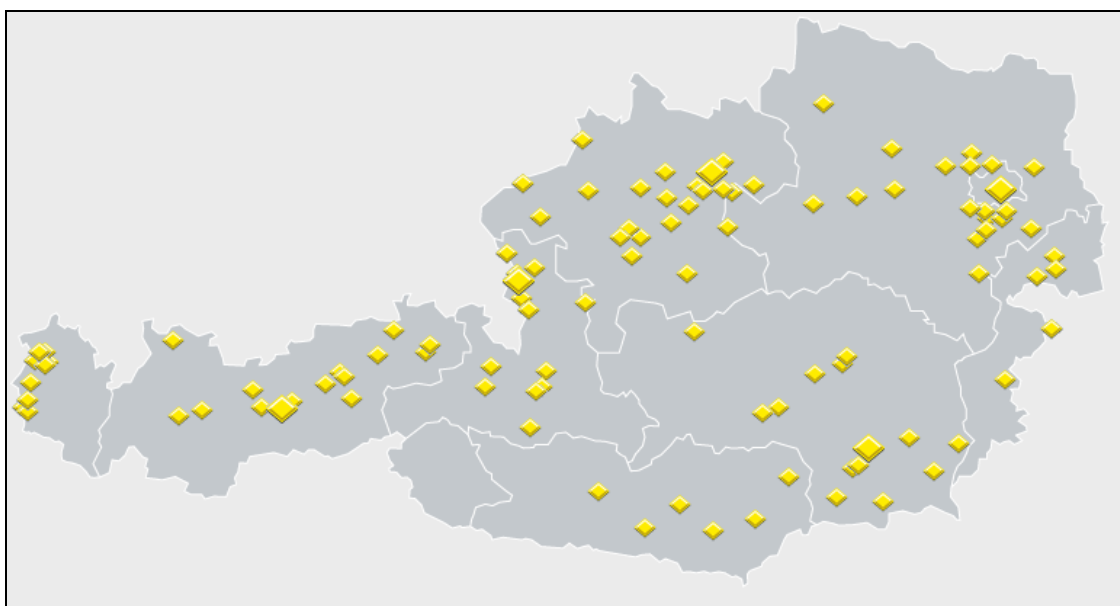


Abb. 4.9: CNG-Tankstellennetz in Österreich, Stand: Juni 2009; Quelle: [Q 117]

Eine flächendeckende CNG-Versorgung erfordert ein gut ausgebautes Netz an Gasleitungen. Wo ein solches gewährleistet ist, beschränken sich die Investitionen in die Infrastruktur lediglich auf lokale Anschlüsse. In vielen Regionen Europas ist das Gasleitungsnetz gut genug, um die durch den Straßenverkehr zusätzlich benötigten Gasmengen zu transportieren. Abseits der Ballungszentren und Autobahnen, wo das Gasnetz nicht entsprechend ausgebaut ist, ist mit höheren Kosten zu rechnen. Es kommt somit zu erheblichen regionalen Unterschieden bei den Investitionskosten.

Der höchste Investitionsbedarf fällt aber bei den Tankstellen selbst an. Die Anlagen zur Verdichtung (Kompressoren) und Speicherung (große Gasspeicher) sind kostspielig. Außerdem muss mit höheren Betriebskosten gerechnet werden. Die Angaben über die Investitionskosten schwanken je nach Größe der Tankstelle zwischen 150.000 Euro und einer Million Euro, wobei der Mittelwert etwa bei 250.000 Euro zu liegen kommt. Die durchschnittlichen Betriebskosten, die Wartungs- und Ausbildungskosten beinhalten, belaufen sich auf durchschnittlich 60.000 Euro pro Jahr. Diese Zahlen verdeutlichen, dass sich derzeit nur große CNG-Tankstellen

wirtschaftlich rechnen. Kleine CNG-Tankstellen am Land sind im Allgemeinen unwirtschaftlich. [Q 118]

Neben öffentlichen Tankstellen können auch CNG-Betriebstankstellen für große Betriebe oder Kommunen mit eigenem Fuhrpark eine Lösung darstellen. Im Verteil-, Sammel- und Werkverkehr, sowie bei städtischen Bus- oder Nutzfahrzeug-Flotten sind sie schon Realität. Gerade wenn die Transportleistung aus fixen Routen besteht, kann eine zentrale Versorgung über Betriebstankstellen vorteilhaft sein. Um die hohen Investitionskosten zu rechtfertigen, muss die Fahrzeugflotte aber entsprechend groß sein.

4.3.2.5 Tanken

Da es sich bei Erdgas um einen gasförmigen Kraftstoff handelt, stellt sich der Tankvorgang prinzipiell anders als bei flüssigen Kraftstoffen dar. Dabei unterscheidet man im Wesentlichen zwei Betankungsmöglichkeiten: Fast Fill- und Slow Fill-Betankungsanlagen.

Fast Fill – Betankungsanlagen (siehe Abb. 4.10) werden vor allem an öffentlichen Tankstellen zur Verfügung gestellt. Hierbei wird das Erdgas mittels eines Kompressors verdichtet. Um Vereisungen aufgrund der schnellen Entspannung zu vermeiden, wird das Gas getrocknet und in einem Zwischenspeicher gelagert (Vgl. [Q 119]).



Abb. 4.10: CNG-Fast-Fill-Tankanlage an einer öffentlichen Tankstelle; Quelle: [Q 120]

Um die Akzeptanz des CNG an öffentlichen Tankstellen zu steigern ist neben ansprechenden Kraftstoffpreisen und Investitionskosten auch ein zügiger, problemloser und trotzdem sicherer Tankvorgang von Nöten. Dabei muss nach SEIDLINGER in [Q 121] aus technischer Hinsicht auf folgende Punkte geachtet werden:

- „Kleinstmögliche Sicherheitsabstände bei CNG-Anlagen:
Damit wird nicht nur die bestmögliche bauliche Integration sichergestellt, sondern auch die Möglichkeit geschaffen, bei einem Stopp CNG und Benzin für bivalente Fahrzeuge tanken zu können, ohne das Fahrzeug bewegen zu müssen (siehe Abb. 4.11).



Abb. 4.11: CNG- und Benzin-Tank-Einlässe am Fahrzeug; Quelle: [Q 122]

- Druckhalteprüfung:
Als zusätzliches Sicherheitsfeature wird über einen Druckstoß der Druck im Fahrzeug auf 30 bar aufgebaut und über einen kurzen Zeitraum das Halten dieses Druckes überprüft. Erfolgt in dieser Zeit kein Druckabfall, ist das Gesamtsystem dicht, die Betankung wird gestartet(...).
- Sicherheit und Selbstbedienungsbetankung von CNG:
Neben den (...) Sicherheitseinrichtungen in Hard- und Software geht es hier um einfache Handhabung der Zapfkupplung für die Kunden (...). Gute, selbsterklärende Bedienführung des Betankungsvorganges, sowie sicheres Überführen in eine sichere Parkposition im Falle von Fehlbedienungen durch den Kunden. (...)
- Betankungszeiten analog Flüssigkraftstoffe (Benzin, Diesel):
Zielvorgabe für einen rund 20 kg CNG fassenden PKW CNG-Fahrzeugtank sind Betankungszeiten von weniger als zwei Minuten (inkl. Druckhalteprüfung, siehe oben) (...). [Q 121]“

Slow-Fill-Betankungsanlagen (siehe Abb. 4.12) werden vor allem auf Betriebstankstellen eingesetzt. Hierbei wird das Erdgas via Kompressor direkt, d.h. ohne Zwischenspeicher, in den Fahrzeugtank gepumpt. Der Tankprozess dauert je nach Tankvolumen einige Stunden. Für Betriebe und Kommunen mit Fahrzeugflotten, die über Nacht oder zu bestimmten regelmäßigen Ruhezeiten betankt werden können, stellen Slow-Fill-Anlagen eine geeignete Möglichkeit dar. Für andere Zwecke sind sie aber unpraktikabel.



Abb. 4.12: CNG-Slow-Fill-Tankanlage; Quelle: [Q 123]

4.3.3 Ökologische Betrachtungen

Anders als bei den bisher behandelten alternativen Kraftstoffen, handelt es sich bei Erdgas um einen nicht regenerativen, fossilen Kraftstoff, wie Benzin. Im Kapitel 4.3.1 wurde bereits erwähnt, dass Erdgas einen Vorteil bei den *direkten* Kohlendioxidemissionen – das sind Emissionen, die bei der Verbrennung anfallen – von etwa 28 Prozent gegenüber Benzin aufweist. Dieser direkte Vergleich ist aber wenig aussagekräftig, da er nur einen Teil der Klimabilanz berücksichtigt. Für die Evaluierung der gesamten Bilanz sind auch die *indirekten* Emissionen zu berücksichtigen. Dabei handelt es sich um Emissionen, die beim Transport, bei der Speicherung und bei eventuellen Leckagen anfallen.

Die Energieaufwendungen für den Transport in Pipelines sind enorm und steigen mit der Transportdistanz an. Russland beispielsweise betreibt allein an zwei für den Export nach Europa wichtigen Erdgasfernleitungen Kompressoren mit einer Gesamtleistung von 20.000 Megawatt zur Aufrechterhaltung des Transports. Bei der heutigen Transportstruktur muss man mit Emissionen von durchschnittlich 12,5 t

CO₂-Äquivalenten je Terajoule importierter Energie für Erdgas rechnen. Benzin verursacht im Vergleich etwa 10 t/TJ. Man kann aber davon ausgehen, dass der Wert für Erdgas noch weiter steigen wird, da immer mehr Erdgas aus immer weiter entfernten Gebieten importiert werden muss. Andererseits sind technische Fortschritte und somit Energieaufwandssenkungen bei der Komprimierungs- und Transporttechnik nicht ausgeschlossen, die diesen Effekt abschwächen könnten.

Weitere indirekte Emissionen fallen an Leckagen der Pipelines und beim damit einhergehenden Methanverlust an. In die Atmosphäre entfliehendes Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas, ist ein äußerst schädliches Treibhausgas mit einem GWP von 21 (siehe Kapitel 2.6). Im Durchschnitt ist je nach Transportdistanz mit Verlusten von 0,7 bis 1,5% der geförderten Menge zu rechnen. Als Werte für die indirekten Emissionen werden für eine Transportleitung von Russland nach Deutschland CO₂-Äquivalente von 4,7 bis 8,2 t/TJ angegeben, die der Klimabilanz aufgerechnet werden müssen.

Allein mit den Aufschlägen von Transport und Leckage erhält man in Summe eine Bandbreite von 13,4 bis 22,8 t/TJ an indirekten Emissionen. Diese reduzieren den Vorteil der direkten Emissionen von 28% auf 18% für optimistische Annahmen. Berücksichtigt man außerdem noch den Energieaufwand bei der Verdichtung in den Fahrzeugtanks, der immerhin bis zu 3,5% des Energieinhaltes des getankten Erdgases ausmacht, wird die Bilanz noch weniger vorteilhaft. Weitere Nachteile entstehen, wenn entlegene Tankstellen, welche nicht ans Erdgasnetz angeschlossen werden können, mit Erdgas in flüssiger Form auf dem Straßenweg beliefert werden müssen. Die für diesen Transport notwendigen Zwischenschritte verursachen weitere nicht zu vernachlässigende Verluste.

Zu guter Letzt ist noch anzumerken, dass Erdgasmotoren etwa 5 bis 20% mehr Primärenergieaufwand benötigen als benzinbetriebene Motoren. Bivalente Fahrzeuge, die nicht rein für Erdgas ausgelegt sind, verbrauchen mehr Erdgas als monovalente, welche für den Betrieb mit Erdgas optimiert sind. Das Gewicht der Erdgastanks, wirkt sich ebenfalls negativ auf den Verbrauch aus. Ein Transporter, der im Benzinbetrieb 15 l (das sind ca. 11,25 kg) auf 100 km benötigt, verbraucht also im Erdgasbetrieb je nach Methangehalt und Antriebsart 10 bis 13 kg Erdgas auf 100km.

Zusammenfassend kann man also anmerken, dass das THG-Minderungspotenzial eher überschaubar ist. In manchen Modellen wird Erdgas sogar ein Nachteil gegenüber Benzin attestiert. (Vgl. [Q 124])

Anders ist die Situation bei den Schadstoffemissionen. Hier kann Erdgas mit guten Werten überzeugen. Es können gegenüber von erdölbasierten Kraftstoffen große Anteile an Schadstoffen eingespart werden (siehe Tab. 4.7).

Substanz	Verringerung
Stickoxide	80%
Kohlenwasserstoffe	60%
Kohlenmonoxid	80%
Schwefeldioxid, Partikel	100%
Geräusche	50%
Smog-Verursacher	80%
Gerüche, Verdampfung	100%

Tab. 4.7: Schadstoffminderungen von CNG im Vergleich zu Benzin;
eigene Darstellung, Quelle: [Q 125]

Kohlenmonoxid und die Kohlenwasserstoffe stellen aber auch in mit mineralölbasierten Kraftstoffen betriebenen Motoren kein großes Problem mehr dar, weshalb sich die Gewichtung des Emissionsvorteils verringert. Partikel- und Schwefelemissionen kommen gar nicht vor. In dicht besiedelten Gebieten wirkt sich außerdem die Tatsache vorteilhaft aus, dass Erdgasfahrzeuge wesentlich geräuschärmer fahren als vergleichbare Benzin- und Dieselfahrzeuge (vgl. [Q 127]).

4.3.4 Kosten

Wie bei den anderen alternativen Kraftstoffen gilt es, die Anschaffungskosten und die Kraftstoffkosten zu berücksichtigen.

Die **Umrüstung** von PKWs und kleinen Transportern stellt bei neueren Modellen technisch grundsätzlich kein Problem dar. Die Kosten für eine Nachrüstung auf Erdgasbetrieb sind sehr unterschiedlich und werden in der Literatur mit zwischen 2.500 bis 6.500 Euro beziffert [Q 126].

Die Situation stellt sich aber bei größeren Transportern und LKWs anders dar. Eine Umrüstung ist hier aus Kostengründen und vor allem aus Platzgründen problematisch. Aufgrund des höheren Platzbedarfs der Tanks müsste oft der Radstand des Fahrzeugs vergrößert werden, was zu einem längeren Fahrzeug führen kann.

Bei der **Anschaffung eines neuen Erdgasfahrzeuges** muss man mit Mehrkosten gegenüber benzin- oder dieselbetriebenen Modellen rechnen. Diese bewegen sich je nach Modellgröße in folgendem Rahmen [Q 127]:

- PKW: Mehrkosten von 1.500 bis 3.500 Euro
- Transporter (< 3,5 t): Mehrkosten von 3.500 bis 5.000 Euro
- LKW: Mehrkosten von 10 – 30% des Anschaffungspreises

Diese Mehrkosten amortisieren sich aber in der Regel aufgrund der niedrigeren Kraftstoffkosten je nach jährlicher Fahrleistung nach einigen Jahren.

Die **Kraftstoffkosten** belaufen sich zur Zeit der Ausarbeitung (Ende Juni 2009) in Österreich auf durchschnittlich 0,85 bis 0,90 Euro je kg CNG [Q 128]. Dabei

entspricht bezüglich des Energieinhalts ein Kilogramm CNG-Kraftstoff im Durchschnitt etwa 1,5 Liter Benzin oder 1,3 Liter Diesel. Es sei auch noch angemerkt, dass in Österreich auf CNG-Kraftstoff keine Mineralölsteuer aufgeschlagen wird.

In folgendem Kapitel werden zwei Vertreter von Erdgas-Nutzfahrzeugen vorgestellt. Mit den darin enthaltenen Informationen lassen sich auch die zu erzielenden Kostenersparnisse gut abschätzen.

4.3.5 Einsatzbeispiele

Zwei typische Vertreter von CNG-Nutzfahrzeugen werden in diesem Kapitel vorgestellt und mit herkömmlichen, fossil betriebenen Fahrzeugen verglichen. Zum einen der Mercedes Sprinter 316 NGT, ein Transporter mit höchst zulässigem Gesamtgewicht von 3,5 Tonnen. Außerdem wird der Mercedes Econic NGT präsentiert, ein LKW mit bis zu 26 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht, der vor allem im Verteilverkehr und als kommunales Nutzfahrzeug (z.B. Müllsammeldienst) Verwendung findet.

4.3.5.1 Mercedes Sprinter 316 NGT

Bereits Ende der Neunziger Jahre wurde von Mercedes der Sprinter NGT (Natural Gas Technology) vorgestellt. Da dieser aber nur als monovalentes Erdgasfahrzeug zu erwerben war und das CNG-Tankstellennetz sich erst im Aufbau befand, war diese Version des Sprinters kein großer kommerzieller Erfolg. Weiters machte sich die geringe Reichweite von maximal 300 km negativ bemerkbar.

Um eine höhere Kundenakzeptanz zu erreichen, entwickelte man den neuen Sprinter NGT (siehe Abb. 4.13). Die seit Mai 2008 erhältliche neue Version ist leistungsstärker und auch bivalent erhältlich. Der bivalente Sprinter 316 NGT verfügt wegen des zusätzlichen Benzintanks über eine bedeutend höhere Reichweite. Weiters wurde Wert darauf gelegt, dass kein Leistungs- oder Drehmomentunterschied zwischen Benzin- und Gasbetrieb besteht.



Abb. 4.13: Mercedes Sprinter 316 NGT; Quelle: [Q 129]

Der Sprinter NGT wird in vielen Varianten angeboten; als Kastenwagen, Pritschenwagen und mit Kofferaufbau. Auch eine quasi monovalente Version ist erhältlich. Neben dem 316 NGT mit 3,5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht gibt es noch den 516 NGT mit 5 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht. Um eine gute Vergleichbarkeit zu ermöglichen, werden in der Tab. 4.8 der Sprinter 316 NGT in monovalenter und bivalenter Ausführung und der Sprinter 316 angeführt. Der Sprinter 316 ist eine reine Benzinversion, die von Ausstattung und Leistung her dem Sprinter 316 NGT gleicht. Es sei hier angemerkt, dass es sich bei den in Tab. 4.8 gezeigten Daten um Herstellerangaben von Mercedes Benz handelt.

	316 NGT monovalent	316 NGT bivalent	316
Zylinder	4	4	4
Anordnung	Reihe	Reihe	Reihe
Zul. Gesamtgewicht (t)	3,5	3,5	3,5
Hubraum (cm ³)	1796	1796	1796
Nennleistung (kW)	115	115	115
Nenn Drehmoment (Nm)	240	240	240
Kraftstoffart	CNG	CNG und Superbenzin	Superbenzin
Abgasnorm	EEV	EURO 4	EURO 4
Tankinhalt (l)	15 (Nottank)	100	100
Druckgasbehälterinhalt (l)	210 - 290	210 - 290	-
Reichweite (km)	bis 470	bis 1200 (kombiniert)	k.A.
Kraftstoffverbrauch fossil kombiniert (l/100km)	-	13,3 - 13,8	13,3 - 13,8
Erdgasverbrauch kombiniert (kg/100km)	9,3 - 9,6	9,3 - 9,6	-
Listenpreis inkl. MWSt. mit Standardausstattung	k.A.	41.196 Euro	33.276 Euro

Tab. 4.8: Technische Daten des Mercedes Sprinter in den CNG-Varianten 316 NGT monovalent, 316 NGT bivalent und der benzinbetriebenen Ausführung 316; eigene Darstellung; Quelle: [Q 130]

Auffallend ist bei diesem Vergleich die hohe Reichweite des bivalenten 316 NGT, die mit bis zu 1.200 km (nur Erdgas: max. 470 km) angegeben wird. Derlei Reichweiten können mit jeweils vollen Gas- und Benzintanks erreicht werden. Die Druckgasbehälter sind aus Stahl und werden bei allen 316 NGT – Versionen unterflur über Spannbänder an den Rahmen montiert (siehe Abb. 4.14). Die Behälter haben jeweils ein Volumen von 30 bis 110 Liter. Maximal 290 Liter können auf diese Weise angebracht werden. Durch die unterflur ausgeführte Anbringung wird gewährleistet, dass weiterhin über das volle Ladevolumen verfügt werden kann.

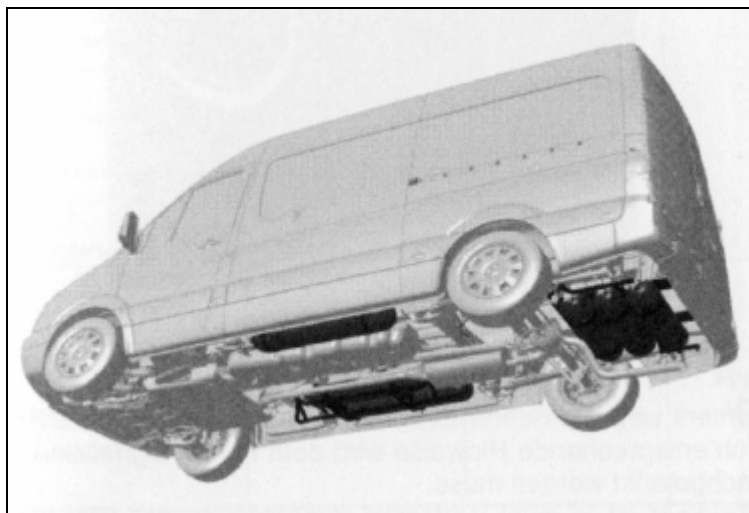


Abb. 4.14: Unterflur-Anbringung der Druckgasflaschen; Quelle: [Q 131]

Die monovalente Version erfüllt genauso wie die bivalente bei Erdgasbetrieb die strengste Abgasnorm EEV (Enhanced Environmentally Vehicle). Bei Benzinbetrieb werden lediglich die EURO 4 – Grenzwerte erreicht. (Vgl. [Q 132])

Weiters sticht der Preisunterschied ins Auge. Für den bivalenten Sprinter NGT 316 muss man mit 7.920 Euro höheren Anschaffungskosten rechnen als für den benzinbetriebenen Sprinter 316. Bei den derzeitigen Preisen für Superbenzin von durchschnittlich 1,15 Euro je Liter (Kraftstoffpreise: [Q 128], Stand: 28. Juni 2009) und Erdgas (siehe oben) ergeben sich nach Tab. 4.9 Kraftstoffkosten von etwa 8 € je 100 km für Erdgas und 15,58 € je 100 km für Superbenzin. Also fährt man im Falle des Sprinters 316 mit Erdgas um etwa 7,55 Euro günstiger je 100 km als mit Superbenzin.

Nach einfacher Rechnung amortisieren sich auf diese Weise die Mehrkosten der Anschaffung rein aufgrund der Kraftstoffkosten nach etwa 105.000 km Erdgasbetrieb; bei einer Jahresfahrleistung von 25.000 km beispielsweise nach etwa vier Jahren.

Der Sprinter 316 NGT eignet sich speziell für den leichten Sammel- und Verteilverkehr in der Stadt. Auf langen Überlandfahrten kann er nicht zuletzt aufgrund des noch lückenhaften CNG-Tankstellennetzes sein volles Potenzial nicht ausschöpfen. Fährt man die bivalente Version häufig mit Superbenzin, so amortisieren sich die Mehrkosten – wenn überhaupt – erst nach langer Zeit.

	Erdgas		Superbenzin	
Preis je Einheit	0,85	€/kg	1,15	€/l
durchschnittlicher Verbrauch je 100 km	9,45	kg	13,55	l
Kraftstoffkosten je 100 km	8,03	€	15,58	€
Preisersparnis je 100 km im Erdgasbetrieb	7,55	€		

Tab. 4.9: Vergleich der Kraftstoffkosten je 100km für die verschiedenen Kraftstoffe des Mercedes Sprinter 316; Quelle: eigene Berechnung

4.3.5.2 Mercedes Econic NGT

Eine Erdgasvariante für den schweren Sammel- und Verteilverkehr stellt der Mercedes Econic NGT (Natural Gas Technology) dar. Der Econic NGT wird als Zweiachser mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 18 Tonnen und als Dreiachser für 26 Tonnen Gesamtgewicht angeboten. Weiters ist er für den leichten Sattelzugeinsatz mit einem Gesamtzuggewicht von maximal 36 Tonnen freigegeben. Somit fällt der Econic als einer der wenigen Vertreter alternativer Kraftstoffe in die Kategorie „schweres Nutzfahrzeug“.

Der Mercedes Econic wird in 17 verschiedenen Baumustern angeboten, sieben davon in der NGT-Variante. Seit dem Jahr der Markteinführung 1998 steigen die Verkaufszahlen kontinuierlich. War der Anteil der NGT-Varianten an den abgesetzten Econic-Stückzahlen Anfang der 2000er Jahre mit Werten im niedrigen einstelligen Prozentbereich noch gering, so stieg er bis zum Jahr 2008 auf etwa 15 Prozent.



Abb. 4.15: Mercedes Econic NGT im Einsatz als Müllsammelfahrzeug; Quelle: [Q 133]



Abb. 4.16: Mercedes Econic NGT im Einsatz als Sattelzugmaschine; Quelle: [Q 134]

Die Einsatzbereiche (siehe Abb. 4.15 und Abb. 4.16), für die der Eonic entwickelt wurde, sind vor allem das Kommunalsegment (speziell der Müllsammeldienst), das Feuerwehrsegment, der Verteilverkehr, die innerstädtische Logistik und der Werksverkehr. Für den Einsatz in städtischen Umgebungen spricht das Niederflurkonzept mit tiefer Fahrerhauskabine, welches für solche Zwecke prädestiniert ist.

Motorisiert ist der Eonic NGT mit einem Sechs-Zylinder-Reihenmotor mit einer Nennleistung von 205 kW bei einem Hubraum von 6.880 cm³. Das Nenndrehmoment beträgt 1000 Nm. Die monovalente Betriebsart erlaubt nur CNG als Kraftstoff, Benzinbetrieb ist also nicht vorgesehen. Der Gasbetrieb samt Oxidationskatalysator ermöglicht die Erfüllung der strengsten Abgasnorm EEV.

Die Kraftstoffanlage besteht serienmäßig aus acht 80 Liter Behälter. Damit steht eine Tankkapazität von mehr als 100 kg CNG zur Verfügung. Die CNG-Tanks werden wie in Abb. 4.17 dargestellt am Fahrwerk angebracht und durch einen massiven Stahlrahmen von äußeren Einflüssen geschützt. Die Kraftstoffanlage führt aufgrund des hohen Eigengewichts zu einem Nutzlastverlust von etwa 1000 kg. (Vgl. [Q 135])

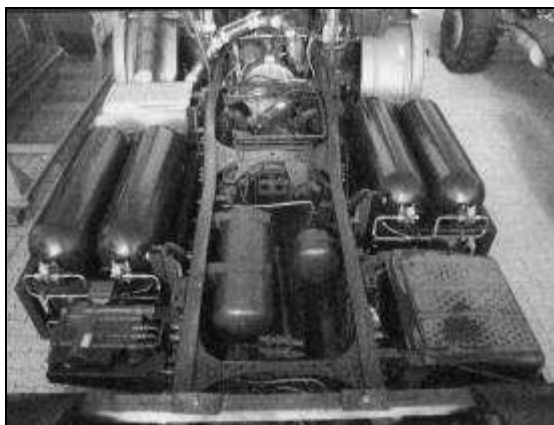


Abb. 4.17:Anbringung der CNG-Druckflaschen am Fahrwerk; Quelle: [Q 136]

Die Anschaffungskosten für den dieselbetriebenen Mercedes Eonic in Standardausführung liegen etwa bei 120.000 Euro inkl. MWSt., die Variante NGT ist mit 156.000 Euro um 30 Prozent teurer [Q 137].

Ein Einsatzbeispiel soll klären, ob sich diese Mehrkosten lohnen und wenn ja, ab wann man damit rechnen kann, mit dem Eonic NGT in die Gewinnzone zu gelangen: Dazu sei als Beispiel ein der Praxisbetrieb der Stadtwerke Speyer angeführt. Speyer ist eine Stadt mit mehr als 50.000 Einwohnern am Oberrhein in Deutschland. In dieser Stadt werden sowohl dieselbetriebene Eonics als auch Eonics NGT als Kommunalfahrzeuge eingesetzt. Der Verbrauch liegt im Müllsammelbetrieb bei etwa 73 Liter Diesel je 100 km und bei 63 kg Erdgas je 100 km. Ein Müllsammelfahrzeug legt in diesem Fall durchschnittlich 25.000 km pro Jahr zurück [Q 138]. In Tab. 4.10 wird mittels einer einfachen Rechnung ermittelt, ab wie

vielen Kilometern bzw. nach wie vielen Jahren sich die Mehrinvestitionen für die NGT-Variante lohnen.

	Econic Diesel		Econic NGT	
Nennleistung	205	kW	205	kW
Kraftstoff	Diesel		CNG	
Jahresfahrleistung	25.000		25.000	
Verbrauch je 100 km	73	l	63	kg
Kraftstoffkosten je Einheit	1,02	€	0,85	€
Kraftstoffkosten je 100 km	74,46	€	53,55	€
Kraftstoffkosten pro Jahr	18.615	€	13.387,5	€
Anschaffungskosten	120.000	€	156.000	€
Amortisation nach	172.166	km		
Amortisation nach	6,89	Jahren		

Tab. 4.10: Berechnung der Amortisationsdauer eines Econic NGT im Vergleich zur Diesel-Version; eigene Berechnung, Datenquelle: [Q 138]

Es zeigt sich, dass sich die Anschaffung bei derzeit gültigen Kraftstoffpreisen in Österreich nach etwa 172.000 km Fahrleistung rein aufgrund der Kraftstoffpreise rechnet. Bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 25.000 km pro Jahr kommt man nach knapp sieben Jahren in die Gewinnzone.

Diese Zahlen hängen sehr stark von den Kraftstoffpreisen ab. In Deutschland beispielsweise, wo die Mineralölsteuer höher ist und CNG ebenfalls zu einem großen Teil von dieser Steuer befreit ist, ergab sich folgendes Bild. Zur Zeit der Untersuchung lagen die Preise für Diesel bei etwa 1,5 Euro je Liter und für Erdgas bei 0,89 Euro je kg [141]. Nach gleicher Rechnung wie oben erhielt man eine Treibstoffkostensparnis von 13.500 Euro pro Jahr und somit eine Amortisation nach 2,66 Jahren.

Zusammenfassend ist anzumerken: Der Mercedes Econic NGT ist für den Verteil- und Sammelverkehr in Städten, sowie für den Werksverkehr über relativ kurze Distanzen durchaus eine Alternative. Günstige Betriebskosten, geringe Emissionen und geräuscharmer Betrieb sind eindeutige Vorteile des Econic NGT. Große finanzielle Ersparnisse sind aber aufgrund der doch erheblichen Mehrkosten bei der Anschaffung nicht zu erwarten. Erst nach einigen Jahren beginnt sich die Investition zu rechnen. Für den Fernverkehr ist der Econic NGT aufgrund des mit ca. 100 kg knapp bemessenen Erdgastanks kaum geeignet.

4.3.6 Fazit

Compressed Natural Gas (CNG) ist zwar ein alternativer Kraftstoff, aber dennoch fossil und daher nicht regenerativ. Da die Erdgasreserven länger in die Zukunft reichen als die von Erdöl, stellt Erdgas einen möglichen Zwischenschritt bei der Abkehr von fossilen Kraftstoffen dar. Die Umweltbilanz ist wie so oft bei alternativen Kraftstoffen umstritten. Die direkten Emissionen der Verbrennung weisen für Erdgas einen eindeutigen Vorteil gegenüber Benzin und Diesel aus. Erdgasmotoren emittieren weniger Schadstoffe und sind geräuschärmer. Das sind Umstände, die sie für städtische Anwendungen interessant machen. Auch entstehen weniger direkte Treibhausgasemissionen. Eine genauere Betrachtung – wie in Kapitel 4.3.3 unter Einbeziehung der indirekten Emissionen, die bei der Kompression und beim Transport anfallen – macht aber deutlich, dass bei einer Well-to-Wheel-Analyse die THG-Einsparpotenziale für Erdgas gegenüber mineralölbasierten Kraftstoffen eher gering sind.

Das Hauptproblem bei der Verwendung von Erdgas ist aber der geringe volumetrische Heizwert; selbst unter Druck von üblicherweise 200 bar erreicht es nicht annähernd die Werte von flüssigen Kraftstoffen. Die Speicherung und Tanks stellen also große technische Herausforderungen dar. Zwar sind die Entwicklungen im Gasbehälterbereich durchaus vielversprechend, dennoch wird die Speicherung immer umständlicher und kostspieliger bleiben als bei flüssigen Kraftstoffen.

Die CNG-Infrastruktur befindet sich im Aufbau. In Ballungsgebieten und an Fernverkehrsrouten ist das CNG-Tankstellennetz bereits heute relativ dicht; hier sind auch die nötigen Investitionskosten niedriger als in entlegenen Gebieten.

Für den Werkverkehr in Städten und den Kommunalverkehr weist Erdgas spürbare Vorteile auf. Die Anschaffungskosten eines Fahrzeuges sind zwar im Allgemeinen höher, diese rechnen sich aber nach einiger Zeit aufgrund der Mineralölsteuerbefreiung. Es gibt bereits erprobte Modelle, vor allem im Transportersegment unter 3,5 Tonnen. Aber auch schwere Nutzfahrzeuge wie der Eonic NGT, die für den städtischen Verteil- oder Sammeldienst ausgelegt sind, und Busse bewähren sich in jahrelangem Einsatz.

Für diese Zwecke wird Erdgas wohl auch in Zukunft eine größer werdende Rolle und einen ausgeprägten Nischentreibstoff darstellen. Das Potenzial des Werkverkehrs und der kleinen LKWs ist riesig. Außerdem ist Erdgas im Vergleich zu den bisher angeführten alternativen Treibstoffen wirtschaftlich, solange es von der Mineralölsteuer ausgenommen bleibt. In diesem Rahmen kann also CNG einen beschränkten, aber dennoch sinnvollen Beitrag zur Diversifikation der Primärenergieträger im Straßenverkehr leisten und bei der Reduktion der Schadstoffemissionen in Ballungsgebieten helfen [Q 139].

Im Fernverkehr sind die Nachteile von gasförmigen Kraftstoffen und deren technisch aufwändige Speicherung gegenüber Diesel aber zu groß, um in absehbarer Zeit eine ernsthafte Alternative darzustellen.

4.4 Flüssiggas – LPG

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch ein kurzes Kapitel über eine weitere Form alternativer Kraftstoffe angefügt. Es handelt sich hierbei um Flüssiggas, auch Autogas genannt. International wird Flüssiggas meist als „Liquefied Petroleum Gas“ bezeichnet, kurz LPG.

Flüssiggas besteht im Gegensatz zu Erdgas aus relativ leicht zu verflüssigenden Kohlenwasserstoffverbindungen mit drei oder vier Kohlenstoffatomen und ist in gasförmigen Zustand brennbar. Die Hauptbestandteile sind dabei Propan (C_3H_8) und Butan (C_4H_{10}), wobei die Zusammensetzung, die Qualität und der Reinheitsgrad stark schwanken.

LPG fällt bei der Förderung von Erdgas und Rohöl bzw. beim Raffinierungsprozess an und ist daher als fossiler, nicht regenerativer Kraftstoff zu bezeichnen. Oft wird es bei diesen Prozessen einfach abgepackelt, da sich ein Einsammeln und Weiterverwerten der anfallenden Gase aus Sicht der Betreiber nicht lohnt. Diese Praxis ist aber ökologisch und wegen der weltweiten Begrenztheit der Energieressourcen auch ökonomisch abzulehnen.

Der durchschnittliche Heizwert liegt mit etwa 46 MJ/kg in derselben Größenordnung wie Erdgas und etwas höher als Benzin oder Diesel. Die Dichte von LPG liegt unter Druck etwa bei 0,54 kg/l (zum Vergleich: Benzin: ca. 0,73 kg/l). Anders als Erdgas verflüssigt sich Flüssiggas bei relativ geringem Druck auf ein Zweihundertsechzigstel seines Volumens unter Normaldruck. Erdgas wird üblicherweise bei mindestens 200 bar gespeichert, für Flüssiggas reichen Drücke von drei bis acht bar, je nach Gaszusammensetzung und Umgebungstemperatur.

Diese Tatsache ermöglicht Erleichterungen bei der Handhabung. Es ist keine eigene Gasinfrastruktur notwendig. Flüssiggas wird mit Tankfahrzeugen an die Tankstellen geliefert und ist somit nicht leitungsgebunden. Der technische Aufwand der Tankbehälter ist wegen der niedrigeren Drücke ebenfalls geringer. Es ist aber zu beachten, dass LPG 1,56-mal so schwer ist wie Luft und sich am Boden sammelt. Bei Gasaustritt könnte es in geschlossenen Innenräumen (Parkhäuser, Garagen etc.) zu Explosionen kommen. Um das Gefahrenpotential einzuschränken, wären bauliche Maßnahmen wie geeignete Lüftungssysteme notwendig.

Das Tankstellennetz für Flüssiggas ist in Österreich lückenhaft. Anfang Juli 2009 zählte man in Österreich 13 LPG-Tankstellen [Q 140]. Ein großer Ausbau ist in Österreich nicht zu erwarten. Der Preis für ein Liter Autogas liegt bei etwa 0,7 bis 0,85 Euro, entsprechend etwa 1,3 bis 1,57 Euro je Kilogramm. Damit liegt der Kraftstoffpreis aufgrund fehlender steuerlicher Begünstigung deutlich über dem Erdgaspreis, jedoch unter dem Kilogramm-Preis von Benzin oder Diesel. LKW-Neufahrzeuge für den Flüssiggasbetrieb sind am Markt nicht erhältlich. Man ist also auf Umrüstung angewiesen. Die Umrüstkosten betragen bei PKWs und Kleintransportern zwischen 1.000 und 3.200 Euro. Bei schweren LKWs sind mit Umbaukosten von mindestens 21.000 Euro [Q 141] zu rechnen. Meist wird auf

bivalenten Antrieb mit Benzin und Flüssiggas umgerüstet, um eine höhere Reichweite zu erhalten und um nicht vom lückenhaften Tankstellennetz abhängig zu sein.

Flüssiggasmotoren sind in der Regel umgerüstete Ottomotoren, wobei der Motor selbst beinahe unverändert bleibt. Es sind nur einige zusätzliche Komponenten erforderlich. Bei Dieselmotoren gestaltet sich der Einsatz von Flüssiggas komplizierter. Da für den Betrieb mit reinem LPG eine Fremdzündung notwendig wäre, kann man es maximal zu 35% beimischen.

Der Aufbau eines flüssiggasbetriebenen Motors sieht vor, dass ein Verdampfer bzw. Druckregler das aus dem Tank kommende flüssige Autogas in den gasförmigen Zustand überführt und gleichzeitig auf den für die Gemischbildung notwendigen Druck reduziert. Der gasförmige Kraftstoff wird mittels Überdruck bis vor die Einspritzventile der einzelnen Zylinder geführt. Ein Mikroprozessor regelt über die Ventile den Einspritzvorgang und die Luftzufuhr für eine möglichst schadstoffarme und wirkungsoptimierte Verbrennung. Beim Betrieb eines Ottomotors mit Flüssiggas ist in der Praxis mit einer geringen Leistungsreduktion (sechs bis zwölf Prozent) und einem volumetrischen Mehrverbrauch von zehn bis zwanzig Prozent zu rechnen. Problematisch beim LPG-Betrieb sind die Kaltstartschwierigkeiten. Denn ab Temperaturen unter 0 °C abwärts sinkt je nach Gaszusammensetzung der Tanküberdruck gegen Null und erlaubt somit kaum einen Betrieb mit LPG.

Die Emissionen von Schadstoffen sind im Flüssiggasbetrieb im Allgemeinen niedriger als im Benzinbetrieb, aber höher als bei Erdgas. Im Vergleich zum Benzinbetrieb werden 15% direkte Kohlendioxidemissionen eingespart. Die Verwendung des „Abfallstoffes Flüssiggas“ bei der Produktion von Mineralöl-Kraftstoffen ist aber aus umwelttechnischer Sicht begrüßenswert und sinnvoller als es einfach abzufackeln und damit die Umwelt zu belasten, ohne einen Nutzen daraus zu ziehen. (Vgl. [Q 142], [Q 143])

In Österreich ist Flüssiggas aufgrund fehlender steuerlicher Begünstigungen kaum ein Thema. Einzig städtische Verkehrsbetriebe wie die „Wiener Linien“ setzen auf LPG-Busse. Für die gewerbliche Güterbeförderung waren im Jahr 2008 nur fünf LPG-LKWs registriert. Vier davon bivalent, einer monovalent. Bei PKWs ist die Akzeptanz größer. Auch in Zukunft ist aber nicht zu erwarten, dass der Straßengüterverkehr auf Flüssiggas setzt. Erstens ist das Tankstellennetz bei weitem nicht so gut ausgebaut wie für CNG und zweitens ist der Preis unwirtschaftlicher und man muss mit längeren Amortisationszeiten für die Umrüstung rechnen. Hinzu kommt, dass eigentlich nur Ottomotoren gut für die Umrüstung geeignet sind und die meisten LKW-Motoren sind Dieselmotoren. Probleme wie die Explosionsgefahr in Garagen und die Kaltstartschwierigkeiten erschweren außerdem den Markterfolg in unseren Breiten. LPG wird in Österreich also aus heutiger Sicht auch weiterhin ein eher begrenztes Nischendasein führen.

5. Elektrische Antriebe

Die Verbrennungskraftmaschine ist heute die dominante Antriebsform für Automobile und auch für Nutzfahrzeuge. Diese Tatsache war aber nicht von Anfang an absehbar. Ende des 19. Jahrhunderts wurden sowohl der elektrische Antrieb als auch die heute konventionellen Antriebe für Straßenfahrzeuge entwickelt. Es entstand ein Konkurrenzkampf ungewissen Ausgangs, welches Antriebssystem sich durchsetzen würde. Die Aussichten für Elektrofahrzeuge waren damals nicht schlecht; sie waren ob ihrer Geräuscharmheit und Abgasfreiheit beliebt und stellten in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts immer neue Geschwindigkeitsrekorde auf. Der Belgier Camille Jenatzky beispielsweise erreichte im Jahre 1899 mit 105,88 km/h auf der internationalen Motorwagen-Ausstellung in Berlin als erster die 100 km/h-Marke in einem Straßenfahrzeug (siehe Abb. 5.1).



Abb. 5.1: Der Belgier Camille in dem Elektro-Gefährt, mit dem er 1899 einen Geschwindigkeitsrekord aufstellte; Quelle: [Q 144]

Verbrennungsmotorfahrzeuge andererseits waren als laute „Stinkekarren“ (Zitat: Kaiser Wilhelm II) verschrien und die Bedienung dieser Fahrzeuge stellte sich als wesentlich umständlicher heraus. So war man vor der Entwicklung des elektrischen Anlassers im Jahre 1910 beim Starten des Motors auf manuelles Kurbeln angewiesen. Allmählich kompensierten aber mehr und mehr technische Neuerungen den Bedienvorteil der Elektrofahrzeuge. Die schweren Akkumulatoren und großen Motoren entwickelten sich zum entscheidenden Nachteil. Elektrofahrzeuge konnten einfach nicht mehr mit der Reichweite von Verbrennungsmotorfahrzeugen mithalten. Gerade im Bereich der Nutzfahrzeuge gab es aber Nischenbereiche, die bis in die Zwanziger Jahre von Elektro-LKWs ausgefüllt wurden. Beispiele dafür sind Verteilerfahrzeuge oder Feuerwehrmannschaftswagen (siehe Abb. 5.2). (Vgl. [Q 145])



Abb. 5.2: Elektrischer Feuerwehrmannschaftswagen der Mainzer Feuerwehr in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts; Quelle: [Q 146]

Während sich die Verbrennungsmotorfahrzeuge im Laufe des 20. Jahrhunderts durchsetzten und technisch weiterentwickelt wurden, sind die Elektrofahrzeuge größtenteils vernachlässigt worden. Billig und leicht verfügbares Rohöl und dessen hohe Energiedichte bzw. die einfache Handhabung machten dieses System bis heute konkurrenzlos. Nur zu Zeiten, in denen man sich der Begrenztheit der verfügbaren Rohöl-Ressourcen besann und die Preise für Benzin und Diesel stark stiegen, wurde die Entwicklung vorangetrieben. So wurden in den Siebzigerjahren als Antwort auf die Ölkrise erste hybrid-elektrische Busse erprobt. Einen Entwicklungsschub kann man auch seit Mitte der Neunziger aufgrund der allgegenwärtigen Forderung nach umweltfreundlicheren Fahrzeugen und der stetigen Verteuerung der Mineralölkraftstoffe verzeichnen. Elektrische und hybrid-elektrische Fahrzeuge werden wieder nachgefragt, sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr.

In diesem Kapitel soll beleuchtet werden wie ausgereift elektrische und hybrid-elektrische Fahrzeugantriebe sind und ob sie für den Einsatz im Straßengüterverkehr kurz- und mittelfristig in Frage kommen. Auf ein Kapitel für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge wurde verzichtet. Sie scheinen in absehbarer Zukunft keine denkbare Option darzustellen.

5.1 Batterie-elektrische Nutzfahrzeuge

Auch wenn man von außen betrachtet kaum einen Unterschied zu einem konventionellen Nutzfahrzeug erkennen kann, so ist das Innere eines batterie-elektrischen Nutzfahrzeugs technisch ganz anders aufgebaut. Die Komponenten, die den wesentlichen Unterschied ausmachen, sind die Energiespeicher und der elektrische Antrieb. Hierbei handelt es sich auch um die preisintensivsten Bauteile. Von deren Performance und Kosten hängt ab, ob batterie-elektrische Nutzfahrzeuge am Markt bestehen können. Daher wird im folgenden Abschnitt der technologische Stand aktuell verfügbarer Energiespeicher und Elektromotoren beleuchtet. Auch hybrid-elektrische Fahrzeuge sind auf diese Bauteile angewiesen, stellen aber teilweise andere spezifische Anforderungen, welche auch in diesem Abschnitt Erwähnung finden. Weiters werden vorhandene Ansätze elektrischer Nutzfahrzeuge präsentiert, ehe eine Abschätzung der Zukunftsperspektiven erfolgt.

5.1.1 Energiespeicher

Ohne Zweifel ist der Energiespeicher eines der zentralen Komponenten eines Elektroantriebs. Bisher war vor allem die nicht ausreichende Energiedichte der Grund, warum sich Elektrofahrzeuge nicht durchsetzen konnten. Die technischen Fortschritte der letzten Jahre und Jahrzehnte nähren jedoch die Hoffnung, in absehbarer Zeit für den Masseneinsatz taugliche Lösungen zur Verfügung zu haben. Mobile Anwendungen stellen spezielle technische Anforderungen, die alle zumindest in ausreichendem Maße erfüllt sein müssen, um größtmögliche Akzeptanz zu erreichen. Dabei handelt es sich um (Vgl. [Q 147], [Q 148]):

- **Energiedichte** (Energieinhalt je Masseneinheit und Volumeneinheit): Sie bestimmt die Reichweite im elektrischen Betrieb. Eine hohe Energiedichte spielt vor allem bei rein elektrischen Fahrzeugen eine wichtige Rolle. Hybridfahrzeuge legen – wenn überhaupt – kürzere Distanzen rein elektrisch zurück.
- **Leistungsdichte** (entnehmbare elektrische Leistung je Masseneinheit und Volumeneinheit): Sie bestimmt die Beschleunigung und die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs. Oft fungiert der elektrische Antrieb bei Hybridfahrzeugen als Leistungsunterstützung, weshalb für Hybridfahrzeuge eine hohe Leistungsdichte besonders wichtig ist.
- **Ladefähigkeit**: Eine schnelle Ladefähigkeit ist eine weitere zentrale Forderung, um die Stillstandszeiten beim Ladevorgang möglichst kurz zu halten. Kurzzeitige, extreme Schnellladefähigkeiten werden bei der in Hybridfahrzeugen üblichen Rekuperation (Rückspeicherung der Bremsenergie, siehe später)

verlangt. Dabei sind Leistungspulse von bis zu 30 kW je Tonne Fahrzeuggewicht aufzunehmen.

- **Lebensdauer:** Die Lebensdauer muss sich mit der Lebensdauer konventioneller Fahrzeuge messen und sollte im Idealfall auch deren Werte erreichen. Ein Austausch der Batterieeinheit ist sehr kostspielig.
- **Wartungsfreiheit:** Die Systeme sollten möglichst wenig wartungsintensiv sein.
- **Wirkungsgrad:** Die in chemischer Form gespeicherte elektrische Energie soll möglichst ohne Verluste wieder für die Entladung zur Verfügung stehen. Gerade bei Hybridfahrzeugen sollen somit große Treibstoffeinsparungen möglich gemacht werden.
- **Günstiger Preis**

Die USABC (United States Advanced Battery Consortium) nennt nach [Q 149] die in Tab. 5.1 ersichtlichen Ziele für den wirtschaftlichen Erfolg der Batterietechnologie in Fahrzeugen:

Preis	<150 €/kWh
Zyklenzahl	1000 bei 80% Entladungstiefe
	1600 bei 50% Entladungstiefe
	2760 bei 30% Entladungstiefe
Spezifische Energie	150 Wh/kg
Spezifische Leistung	300 W/kg
Lebensdauer	10 Jahre
	160.000 km
Normalladung (20% auf 100%)	6 h
Schnellladung (20% auf 70%)	0,5 h
Gesamteffizienz	80%

Tab. 5.1: Batterie-Kennwerte, die nach USABC für einen wirtschaftlichen Erfolg der Batterietechnologie notwendig sind; eigene Darstellung, Quelle: [Q 149]

5.1.1.1 Prinzip einer elektrochemischen Zelle

Es gibt eine Reihe an Batteriesystemen, jede mit speziellen Vorzügen und Nachteilen. Die meisten davon arbeiten nach demselben Prinzip, auf welches nun eingegangen wird. Im Anschluss werden die für Elektro- und Hybridfahrzeuge relevanten Batteriesysteme kurz vorgestellt.

Wie man der Abb. 5.3 entnehmen kann, wird in einer elektrochemischen Zelle mittels eines Energiewandlers elektrische Energie chemisch gespeichert. Bevor sie wieder als elektrische Energie zur Verfügung gestellt werden kann, muss sie im Zuge der Entladung wieder gewandelt werden. Die Verluste sind dabei möglichst gering zu halten.

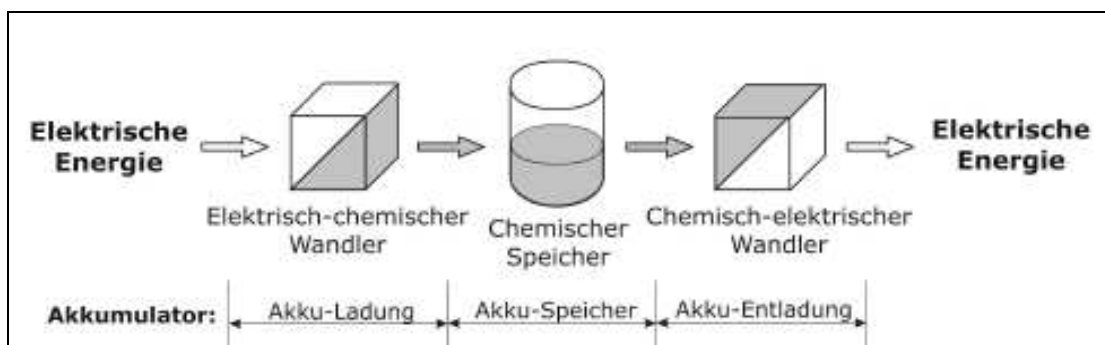


Abb. 5.3: Schema der elektrochemischen Energiespeicherung; Quelle: [Q 148]

Vereinfacht lässt sich das Grundprinzip mit Bezug auf Abb. 5.4 wie folgt beschreiben:

Zwei Elektroden aus verschiedenen Materialien tauchen in einen Elektrolyten ein, der sowohl eine Flüssigkeit als auch ein fester Stoff sein kann. Meist handelt es sich jedoch um verdünnte Säuren, Basen oder Salzlösungen. Der Elektrolyt enthält bewegliche, elektrisch geladene Teilchen, und stellt somit eine leitende Verbindung zwischen den Elektroden her. Beim Entladen oxidiert das Aktivmaterial der negativen Elektrode unter Abgabe von Elektronen. Durch den äußeren Stromkreis fließen diese zur positiven Elektrode und werden dort durch Reduktion des dortigen Aktivmaterials wieder aufgenommen. Im Inneren der Zelle wird der Stromkreis durch die Bewegung von Ionen durch den Elektrolyten von einer Elektrode zur anderen geschlossen. Der Stromfluss bleibt solange aufrecht, bis die im Elektrolyten gespeicherte chemische Energie aufgebraucht ist.

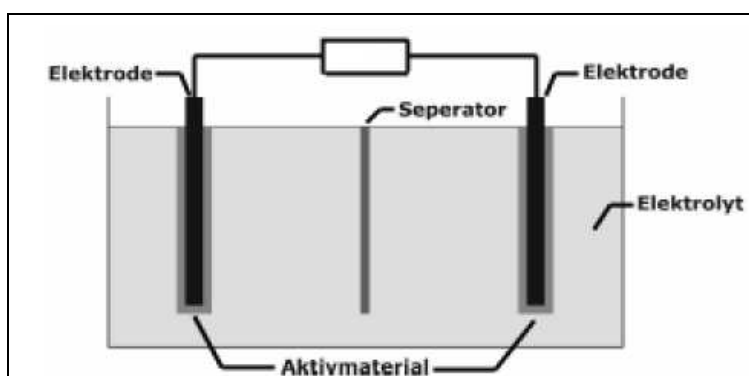


Abb. 5.4: Schema einer elektrochemischen Zelle; Quelle: [Q 150]

Die Spannung einer elektrochemischen Einzelzelle liegt je nach System zwischen einem und vier Volt. Für höhere Spannungen, wie sie in elektrischen Fahrzeugen nötig sind, müssen mehrere Zellen in Serie geschaltet werden.

Im Gegensatz zu Batterien ist dieser Vorgang bei Akkumulatoren umkehrbar (Ladevorgang). In dieser Arbeit wird aber – wie in der Fachliteratur üblich – der Begriff „Batterie“ auch für Akkumulatoren verwendet. (Vgl. [Q 151], [Q 152])

Nun folgend werden die in Fahrzeugen gängigsten Batteriesysteme vorgestellt.

5.1.1.2 Bleibatterien (Pb)

Bleiakkumulatoren sind die am weitesten verbreiteten Batterien in Fahrzeugen, und auch in den meisten Verbrennungsmotorfahrzeugen als Starterbatterie anzutreffen.

Die Bleibatterie ist schon jahrzehntelang praktisch im Einsatz und auch günstig herzustellen. Die Kathode (negative Elektrode) besteht im geladenen Zustand aus reinem Blei, die Anode aus Bleioxid (PbO_2). Als Elektrolyt dient verdünnte Schwefelsäure (H_2SO_4), siehe Abb. 5.5.

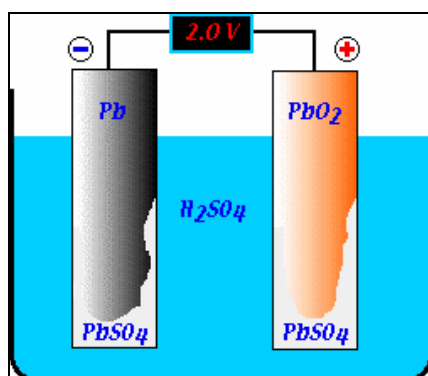


Abb. 5.5: Schema einer Bleibatterie-Zelle, Quelle: [Q 153]

Beim Entladevorgang diffundieren die Blei-Ionen in den Elektrolyt und reagieren dort zu Bleisulfat (PbSO_4). Dabei werden Elektronen frei, die über den äußeren Stromkreis zur Anode fließen. Während des Aufladevorgangs erfolgt die Reaktion umgekehrt. Aus Bleisulfat und Wasser bilden sich wieder Blei, Bleioxid und Schwefelsäure.

Die elektrochemische Zellreaktion lautet somit:



Als Leerlaufspannung ergeben sich in etwa 2,1 V. Für Fahrzeuganwendungen im Spannungsbereich von 200 V sind also ca. 100 Zellen in Serie zu schalten.

Wie man der Tab. 5.2 entnehmen kann, sind bei der Bleibatterie vor allem die Kosten

vorteilhaft. Gegen sie spricht, dass sie schwer sind, nicht viel Energie speichern und die relativ geringe Lebensdauer bzw. Zyklenzahl. Dies sind die Gründe, warum Bleibatterien mehr und mehr von anderen Systemen ersetzt werden. Hauptsächlich werden sie heute noch für Fahrzeuge verwendet, bei denen es nicht auf große Reichweite oder hohe Lebensdauer ankommt. (Vgl. [Q 154], [Q 155])

Spezifische Energie (Wh/kg)	25-40
Spezifische Leistung (W/kg)	150-430
Energiedichte (Wh/l)	70-100
Leistungsdichte (W/l)	350-1000
Zyklenzahl (80% Entladetiefe)	350-700
Lebensdauer (Jahre)	3-5
Kosten (€/kWh)	100-150

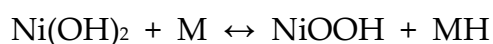
Tab. 5.2: Kennwerte der Bleibatterie; eigene Darstellung, Quellen: [Q 154], [Q 155]

5.1.1.3 Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH)

Als Nachfolgesystem der Nickel-Cadmium-Batterie gilt die Nickel-Metallhydrid-Batterie. Sie verzichtet aber auf das giftige Schwermetall Cadmium und verwendet stattdessen eine Wasserstoff-speichernde Legierung (Metallhydrid) als Aktivmaterial der negativen Elektrode. Die Anode besteht aus Nickelhydroxid. Die beiden Elektroden werden durch ein Separatorvlies aus Polymerfasern voneinander getrennt, welches mit dem Elektrolyten getränkt ist. Als Elektrolyt fungiert verdünnte Kalilauge (KOH).

Beim Entladen gibt die Kathode den gespeicherten Wasserstoff ab und nimmt dabei je Molekül ein Elektron auf. Der Wasserstoff verbindet sich mit OH⁻-Ionen zu negativ geladenem Wasser, welches zur positiven Elektrode wandert und sich dort mit dem Nickelhydroxid (NiOOH) unter Abgabe eines Elektrons verbindet. Das Elektron fließt über den äußeren Stromkreis.

Die Gesamtreaktionsgleichung des NiMH-Systems ist somit:



Beim Laden verlaufen diese Reaktionen in umgekehrter Richtung.

Die Leerlaufspannung einer Nickel-Metallhydridzelle beträgt je nach Ladezustand zwischen 1,25 und 1,35 V.

Neben Rundzellen in zylindrischer Form setzen sich in Fahrzeugen vor allem die kleinprismatischen Zellen in Modulbauweise durch. Das in Abb. 5.6 ersichtliche Modul beispielsweise enthält sechs NiMH-Zellen und verfügt damit über eine

Leerlaufspannung von etwa 7,5 V. Mehrere Module in Serie geschaltet ergeben den gewünschten Spannungsbereich.



Abb. 5.6: NiMH-Batterie, 6 Zellen in Serie; Quelle: [Q 156]

Für die Nickel-Metallhydrid-Batterie spricht die hohe Zyklenfestigkeit. Dies gilt besonders bei niedriger Entladetiefe. Dieses Merkmal zusammen mit einer ansprechenden Leistungsdichte machen sie für Hybridfahrzeuge interessant und dort werden sie auch häufig eingesetzt. Negativ sind die hohen Kosten und die im Vergleich zu anderen Systemen niedrige Energiedichte anzumerken (siehe Tab. 5.3). (Vgl. [Q 154],[Q 155],[Q 157])

Spezifische Energie (Wh/kg)	40-80
Spezifische Leistung (W/kg)	140-1200
Energiedichte (Wh/l)	100-200
Leistungsdichte (W/l)	400-3000
Zyklenzahl (80% Entladetiefe)	2000->4000
Lebensdauer (Jahre)	>5
Kosten (€/kWh)	>300

Tab. 5.3: Kennwerte der NiMH-Batterie; eigene Darstellung, Quellen: [Q 154], [Q 155]

5.1.1.4 Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ion)

Die Lithium-Ionen-Technologie hat sich besonders im Bereich der Geräte (Mobilfunk, Laptops,...) bereits etabliert und macht den herkömmlichen Batteriesystemen in Elektro- und Hybridfahrzeugen immer mehr Konkurrenz.

Als Aktivmaterial an den beiden Elektroden können je nach Anforderung viele Materialien verwendet werden, da es nur Lithium-Ionen aufnehmen muss und nicht aktiv an der Reaktion teilnimmt. Als Elektrolyt dient zumeist Lithiumsalz.

Bei dieser Form der Batterie „schwingen“ Lithium-Ionen zwischen den Elektroden hin und her. Dieses Funktionsprinzip wird Interkalation genannt (Abb. 5.7) und wird im Folgende nach [Q 158] erläutert:

„Beim Laden einer Lithium-Zelle werden die positiv geladenen Lithium-Ionen von der positiven Elektrode durch den Elektrolyten, der ebenfalls Lithium-Ionen enthält, zur negativen Elektrode transportiert. Dort reagieren die Ionen mit Elektronen, die durch den äußeren Strompfad geliefert werden. Die dann neutralen Lithiumatome werden im negativen Gitter eingelagert. (..) Beim Entladen findet der umgekehrte Prozess statt.“

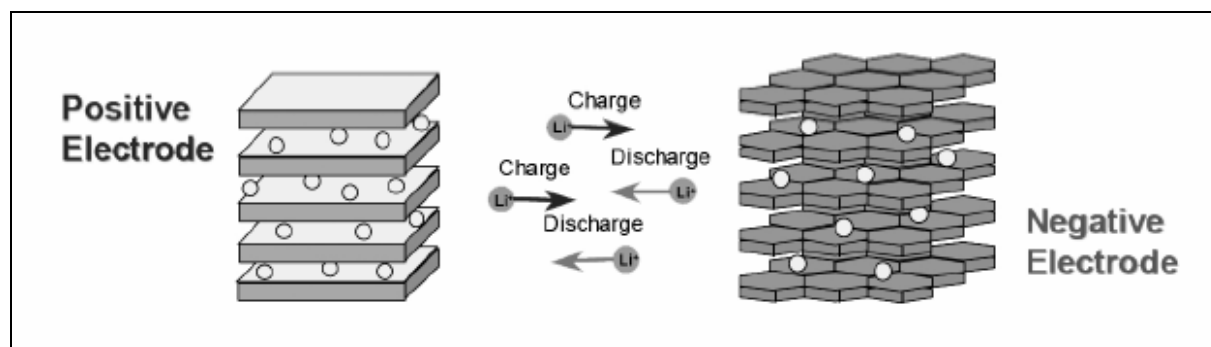


Abb. 5.7: Prinzip der Interkalation bei Li-Ion-Zellen; Quelle: [Q 158]

Als großen Vorteil kann man die hohe Leerlaufspannung von 3,6 – 4 V anführen. Es sind daher verhältnismäßig wenige in Serie geschaltete Zellen notwendig, um in die für Elektro- und Hybridfahrzeuge übliche Spannungsbereiche zu kommen. Die Energie- und Leistungsdichten sind auf relativ hohem Niveau (siehe Tab. 5.4). Nachteilig ist vor allem der hohe Preis aufgrund des Fertigungsaufwands. Auch die Lebensdauer liegt unter Fahrzeugbedingungen noch nicht in einem zufrieden stellenden Bereich. Außerdem gibt es noch technische Probleme, wie die starke Temperaturabhängigkeit der Kapazität usw. Es ist aber davon auszugehen, dass diese Probleme in absehbarer Zeit gelöst werden können und längstens dann stellt die Lithium-Ionen-Batterie vor allem für Hybrid-Fahrzeuge eine wirtschaftliche und technisch sinnvolle Variante dar. (Vgl. [Q 154], [Q 155], [Q 158])

Spezifische Energie (Wh/kg)	70-120
Spezifische Leistung (W/kg)	200-2000
Energiedichte (Wh/l)	150-250
Leistungsdichte (W/l)	300-4200
Zyklenzahl (80% Entladetiefe)	1000-1500
Lebensdauer (Jahre)	3-(10)
Kosten (€/kWh)	>300

Tab. 5.4: Kennwerte der Li-Ionen-Batterie: eigene Darstellung, Quellen: [Q 154], [Q 155]

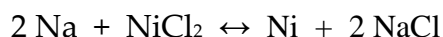
5.1.1.5 Natrium-Nickelchlorid-Batterien (Na/NiCl₂, ZEBRA)

Die Natrium-Nickelchlorid-Batterie ist eine Hochtemperaturbatterie und vor allem unter ihrem Markennamen ZEBRA (Abk. für Zero Emission Battery Research Activity) bekannt (siehe Abb. 5.8).



Abb. 5.8: ZEBRA-Batterie, Quelle: [Q 159]

Der Aufbau einer Zelle ist in Abb. 5.9 ersichtlich. Natrium (Na) bildet die negative und Nickelchlorid (NiCl₂) die positive Elektrode. Die Natriumelektrode ist im eingesetzten Temperaturbereich von 250 - 330° C notwendigerweise flüssig. Die Nickelchlorid-Elektrode wird in eine zähflüssige, mit Nickelchloridpartikeln versetzte Salzschnmelze eingetaucht. Diese fungiert zusammen mit einer Isolierkeramik aus Aluminiumoxid als Elektrolyt. Der feste Keramik-Elektrolyt wird bei Betriebstemperatur für Natrium-Ionen durchlässig. Die Reaktionen erfolgen nach folgender Gleichung:



Beim Entladen entstehen also in der Salzschnmelze Kochsalz (NaCl) und Nickel. Während des Ladevorgangs bilden sich die ursprünglichen Stoffe wieder aus.

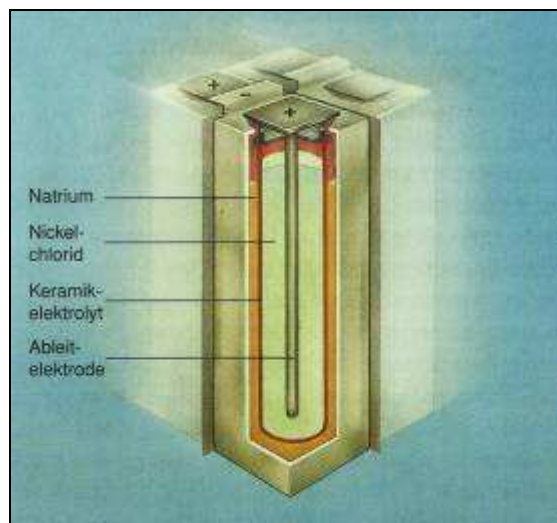


Abb. 5.9: Aufbau einer Natrium-Nickelchlorid-Batterie; Quelle: [Q 160]

Die Leerlaufspannung beträgt etwa 2,6 V. In einigen Bereichen bewährt sich die Zebra-Batterie schon über ein Jahrzehnt im Einsatz. Moderne Ausführungen überzeugen mit einer hohen Energiedichte bis 120 Wh/kg (siehe Tab. 5.5).

Heizelemente müssen für die entsprechende Betriebstemperatur sorgen, welche auch bei Ruhezeiten des Fahrzeugs aufrechterhalten werden muss. Um die Wärmeverluste klein zu halten, ist bei der Fertigung auf eine gute Wärmeisolation zu achten. Selbst bei modernen Wärmeisolationen sind thermische Verluste von etwa 5 W pro kWh nicht zu vermeiden. Somit entlädt sich nach langen Stillstandszeiten ohne externe Energiezufuhr die Zebra-Batterie vollständig.

Positiv ist noch die Lebensdauer hervorzuheben. In absehbarer Zeit dürften für einen Batteriesatz mehr als 150.000 km Fahrleistung erreichbar sein.

Diese Eigenschaften machen sie vor allem wegen der hohen Energiedichte für Elektrofahrzeuge interessant. Für Hybridfahrzeuge sind hohe Leistungsdichten ausschlaggebend, welche die Natrium-Nickelchlorid-Batterie nicht bietet. Weiters sei angemerkt, dass der Nachteil der aufrecht zu erhaltenden Betriebstemperatur speziell bei elektrischen Fahrzeugflotten mit einer hohen täglichen Fahrleistung nicht entscheidend ist. (Vgl. [Q 154], [Q 155], [Q 161])

Spezifische Energie (Wh/kg)	85-120
Spezifische Leistung (W/kg)	150-180
Energiedichte (Wh/l)	150-190
Leistungsdichte (W/l)	250-270
Zyklenzahl (80% Entladetiefe)	>1500
Lebensdauer (Jahre)	5-(10)
Kosten (€/kWh)	225-300

Tab. 5.5: Kennwerte einer Natrium-Nickelchlorid-Batterie; eigene Darstellung,
Quellen: [Q 154],[Q 155]

5.1.1.6 Doppelschichtkondensatoren (Ultra- oder Supercaps)

Während bei allen bisherigen Energiespeichern die elektrische Energie unter Verlusten als chemische Energie gespeichert und beim Entladen wieder unter Verlusten in elektrische umgewandelt werden musste, so entfällt dieser Zwischenschritt bei den Ultracaps. Kondensatoren sind das einzige Bauelement, das Energie direkt in elektrostatischer Form speichern kann. Damit kann die elektrische Energie viel schneller wieder abgegeben werden, was erstaunliche Leistungsdichten ermöglicht.

Doppelschichtkondensatoren beruhen auf dem Prinzip der elektrochemischen Doppelschicht, bestehend aus zwei Phasen (Abb. 5.10 und Abb. 5.11). Elektrisch leitfähiger Kohlenstoff – in Form eines speziell präparierten Kohlenstofftuches – auf der einen Seite und Ionen, die in einem Lösungsmittel getränkt sind, auf der anderen Seite. Ein sehr dünner, Ionen-durchlässiger Separator verhindert den elektrischen Kontakt der beiden Elektroden.

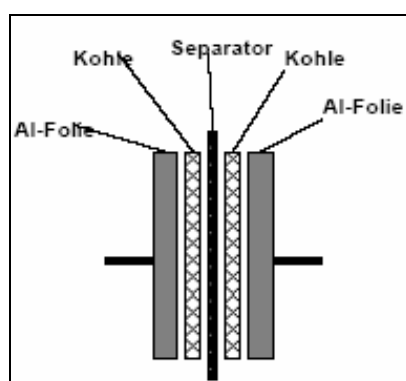


Abb. 5.10: Prinzip der elektrochemischen Doppelschicht; Quelle: [Q 162]



Abb. 5.11: Aufgewickelte Doppelschicht,
Beschreibung: siehe Text; Quelle: [Q 162]

Beim Laden und Entladen werden die Ionen von den polarisierten Kohlenstoffelektroden angezogen oder abgestoßen. Bekanntermaßen hängt die Kapazität abgesehen von der Spannung und der Dielektrizitätszahl vom Abstand und Oberfläche der Elektroden ab. Aufgrund der geringen Abstände der Ladungsträger von nur wenigen Atomlagen und der großen spezifischen Oberfläche der Kohlenstoffmaterials (ca. $2000 \text{ m}^2/\text{g}$) lassen sich sehr hohe Kapazitäten erreichen. Die Oberfläche wird durch die Wickeltechnik noch vergrößert. Damit ergibt sich die zylindrische Bauform einzelner Ultracaps (Abb. 5.12), die zu einer Kondensatorbatterie verschaltet werden können.

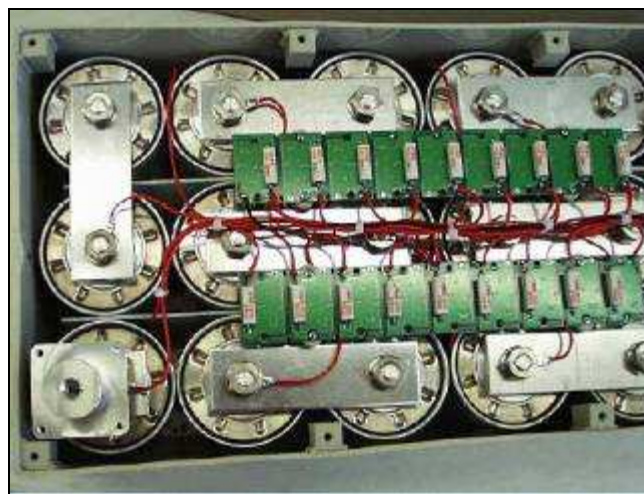


Abb. 5.12: Zusammengeschaltete Ultracaps; Quelle: [Q 162]

Ultracaps zeichnen sich durch eine sehr hohe Leistungsdichte, aber auch durch eine geringe Energiedichte aus. D.h. sie können hohe Leistungen für kurze Zeit abgeben und aufnehmen. Sie sind dadurch für Hybridanwendungen im Boost-Betrieb (siehe später) geeignet. Weiters sind sie in der Lage, die hohen Leistungsspitzen der Nutzbremmung (Rekuperation) aufzunehmen. Vorteilhaft ist außerdem die große Zykluszahl und kalendarische Lebensdauer, die die meisten Batterien in den Schatten stellt. Dennoch sind sie für rein elektrische Fahrzeuge wegen der geringen Energiedichte ungeeignet. (Vgl. [Q 162], [Q 163])

Spezifische Energie (Wh/kg)	2-4,5
Spezifische Leistung (W/kg)	2,5-5
Energiedichte (Wh/l)	1500
Leistungsdichte (W/l)	2000
Zykluszahl (100% Entladetiefe)	>500.000
Wirkungsgrad	0,85-0,98
Lebensdauer (Jahre)	10

Tab. 5.6: Kennwerte von Ultracaps; eigene Darstellung, Quelle: [Q 153]

5.1.2 Elektromotoren

Nach dem Basisfahrzeug und dem Energiespeichersystem ist der Elektromotor das dritte preisintensive Element eines Elektrofahrzeuges. Dabei werden an die Elektrischen Antriebe hohe Anforderungen gestellt, die diejenigen für stationäre Anwendungen noch überschreiten. Um Elektrofahrzeuge erfolgreich am Markt positionieren zu können, müssen die Elektromotoren für den mobilen Betrieb folgende Eigenschaften aufweisen:

- Kompakte und robuste Bauweise
- Hohe Leistungsdichte und geringes Gewicht
- Hoher Wirkungsgrad
- Unempfindlichkeit gegenüber Beschleunigungskräften (Stößen)
- Lange Lebensdauer
- Hohe Überlastfähigkeit
- Schnelle Umschaltung vom Motor- in den Generatorbetrieb (wichtig für die Rekuperation)
- Niedriger Preis

Ein hoher Wirkungsgrad ist von entscheidender Bedeutung. Die relativ geringe Energiedichte von Energiespeichersystemen bedingt, dass bei der Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Leistung möglichst wenig durch Verluste verloren geht. Dazu muss der Elektromotor in einem weiten Drehzahlbereich ein hohes Drehmoment erbringen. Im Unterschied zum Verbrennungsmotor erzeugt er das maximale Drehmoment schon bei geringen Drehzahlen. Abb. 5.13 links zeigt eine Drehmoment-Drehzahlkennlinie für eine umrichter gespeiste Asynchronmaschine, welche als typischer Vertreter eines Elektromotors angesehen werden kann.

Die kurzzeitige Überlastfähigkeit (angedeutet in Abb. 5.13 links und rechts), wie sie Elektromotoren prinzipiell zu Eigen ist, ist beim Beschleunigen, bei Steigungen und speziell bei manchen Betriebsweisen hybrid-elektrischer Fahrzeuge unverzichtbar. Für kurze Zeit kann ein Elektromotor etwa das Doppelte der Nennleistung liefern. (Vgl. [Q 164], [Q 165], [Q 166])

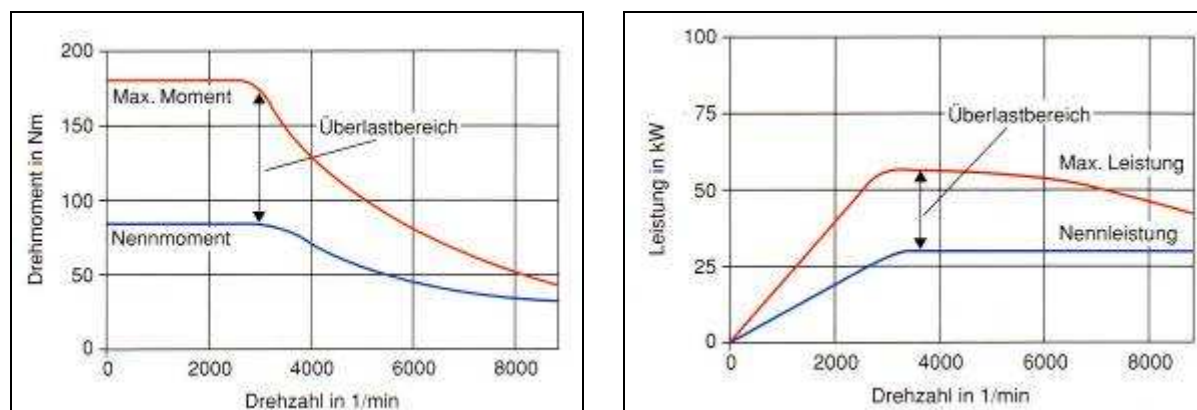


Abb. 5.13: links: Drehmoment-Drehzahlkennlinie einer Asynchronmaschine; rechts: Leistung-Drehzahl-Kennlinie einer Asynchronmaschine; Quelle: [Q 167]

Es gibt verschiedene Konzepte elektrischer Antriebe; für mobile Anwendungen haben sich gemäß den obigen Anforderungen einige als besonders geeignet herauskristallisiert. Lange war der Gleichstrommotor dominant, da er preisgünstig herzustellen ist und ohne aufwändige Umrichtung direkt von der Fahrzeugbatterie gespeist werden kann. Mit dem Fortschritt der Steuer- und Umrichtertechnik fielen die Nachteile wie der mäßige Wirkungsgrad, Störanfälligkeiten und der Wartungsbedarf stärker ins Gewicht, sodass sie mehr und mehr durch Drehstrommotoren ersetzt werden. Die in Fahrzeugen meisteingesetzten elektrischen Antriebe sind heute die Asynchronmaschine (ASM), die permanenterregte Synchronmaschine (PSM) und die geschaltete Reluktanzmaschine (SRM). Prinzipiell sind alle diese Typen für den Einsatz in Fahrzeugen geeignet; jede Maschine hat ihre charakteristischen Stärken und Schwächen. Diese werden nun in gebotener Kürze

vorgestellt. Bei tiefer gehendem Interesse zu Aufbau und Funktionsweise sei auf facheinschlägige Literatur elektrischer Antriebe verwiesen.

5.1.2.1 Asynchronmaschine (ASM)

Sowohl die Asynchronmaschine als auch die Synchronmaschine zählt man zu den Drehstrommaschinen. In deren Stator (auch „Ständer“ genannt) sind drei (oder ein Vielfaches von drei) Spulen derart angeordnet, dass sie ein magnetisches Drehfeld erzeugen. Für die Erzeugung dieses Drehfeldes ist ein Stromrichter (Umrichter) von Nöten, der die Gleichspannung der Traktionsbatterien entsprechend umwandelt und den Spulen zukommen lässt. Der Rotor (auch „Läufer“ genannt) besteht bei der Asynchronmaschine (siehe Abb. 5.14) aus Leitern parallel zur Drehachse, die an ihren Enden kurzgeschlossen sind (Kurzschlussläufer). Wird die ASM als Motor betrieben, induziert das sich drehende Magnetfeld eine Spannung in den kurzgeschlossenen Leiterschleifen. Der daraus resultierende Stromfluss bewirkt eine Ablenkkraft, die den Rotor in dieselbe Richtung wie das Drehfeld drehen lässt. Der Rotor erreicht dabei aber nicht die Drehzahl des Drehfeldes, sondern weicht je nach Belastung von ihr ab. Man nennt diesen Effekt „Schlupf“. (Vgl. [Q 168], [Q 169], [Q 170])

In Abb. 5.15 wird eine in Hybrid-Linienbussen verwendete Asynchronmaschine der Firma Voith präsentiert.

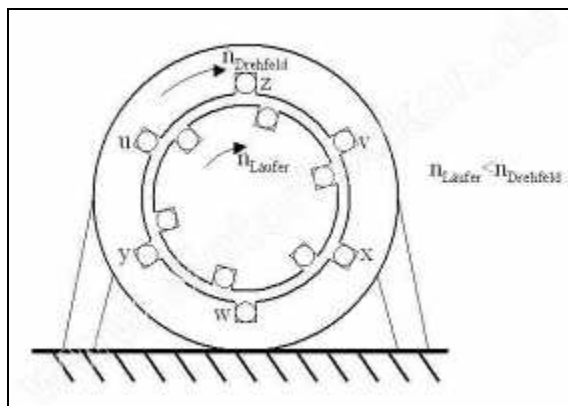


Abb. 5.14 (links): Schema einer Asynchronmaschine; Quelle: [Q 172]

Abb. 5.15 (rechts): Asynchronmaschine (Fa. Voith), verwendet in Hybrid-Bussen; Quelle: [Q 171]

5.1.2.2 Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM)

Die Permanentmagneterregte Synchronmaschine ist – wie oben erwähnt – ähnlich aufgebaut wie die ASM. Im Rotor unterscheiden sich die beiden Typen. Die PSM hat im Rotor Permanentmagnete eingebettet, die ein Magnetfeld erzeugen, ohne dass dafür Strom zugeführt werden muss (siehe Abb.5.16). Dies ist bei der elektrisch erregten Synchronmaschine der Fall. Anders als bei der ASM gibt es bei Synchronmaschinen keinen Schlupf. Das heißt, der Rotor dreht sich synchron mit

dem Drehfeld. Je nach Belastung hinkt er aber dem Drehfeld um den Polradwinkel hinterher.

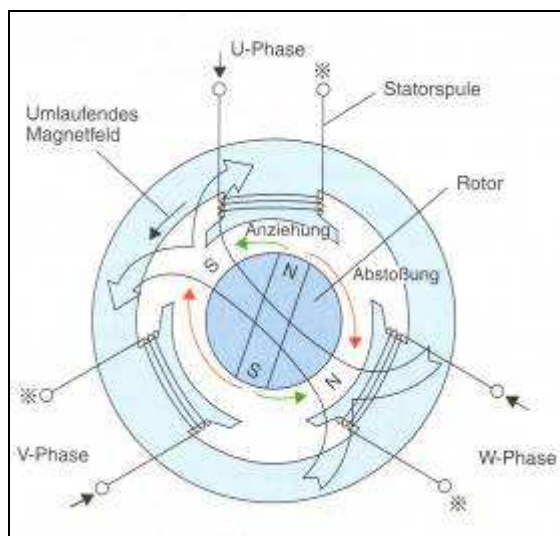


Abb. 5.16: Prinzip einer Permanent-erregten Synchronmaschine; Quelle: [Q 169]

Die hochwertigen magnetischen Werkstoffe machen die PSM teurer als die ASM. Andererseits kann sie mit höheren Wirkungsgraden und höheren Leistungsdichten aufwarten, weil im Rotor keine Verluste anfallen. Zusätzlich macht die Tatsache, dass sie klein und robust hergestellt werden kann, sie zu einer bevorzugten Type für Einsätze in hybrid-elektrischen Fahrzeugen. (Vgl. [Q 168], [Q 169], [Q 173], [Q 174])

5.1.2.3 Switched Reluctance Machine (SRM)

Der geschaltete Reluktanzmotor ist eine Sonderform der Drehstrommaschine. Sie nutzt das Prinzip des geringsten magnetischen Widerstands (Reluktanz). Der Stator enthält einzeln ansteuerbare Magnetspulen, während der Rotor aus weichmagnetischen Materialien besteht. Die Anzahl der Rotorzähne ist geringer als die der Statorpole (siehe Abb. 5.17). Eine gerade bestromte Spule zieht den nächstgelegenen Rotorzahn an, weil das weichmagnetische Material dem magnetischen Feld am wenigsten Widerstand entgegensetzt. Kurz bevor der Zahn die Position der Spule erreicht, wird diese abgeschaltet und es wird die nächste Phase eines anderen Statorzahnes geschaltet. Somit kommt es zu einer kontinuierlichen Rotation. Ein Rotorlagegeber gibt die Information, wann weiterzuschalten ist, an eine Regelung weiter.

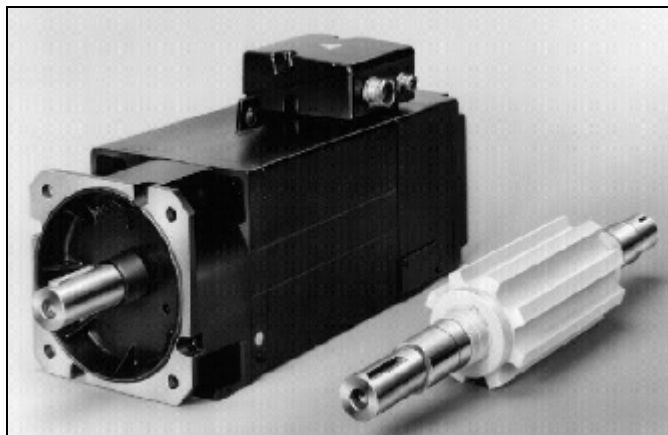
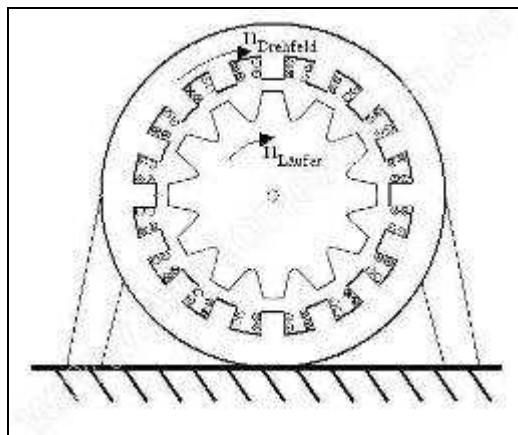


Abb. 5.17 (links): Prinzip der geschalteten Reluktanzmaschine; Quelle: [Q 175]

Abb. 5.18 (rechts): Typische SRM, rechts davon ein ausgebauter Rotor; Quelle: [Q 176]

In Abb. 5.18 wird ein typischer Aufbau einer SRM gezeigt. Rechts im Bild erkennt man einen ausgebauten Rotor.

Vorteile der SRM sind die kompakte, günstige Bauweise. Sie ist vergleichsweise leicht und besitzt somit ein hohes Beschleunigungsvermögen. Ungünstig ist, dass das erzeugte Drehmoment nicht gleichmäßig ist. Außerdem ist mit einer verstärkten Geräusentwicklung zu rechnen. (Vgl. [Q 168], [Q 169], [Q 175])

5.1.2.4 Vergleich

Alle elektrischen Maschinen besitzen eine ähnliche Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie (Abb. 5.19). Sie verläuft im Bereich niedriger Drehzahlen flach. Bis zur Nenndrehzahl befindet sich die Maschine im Bereich konstanten Drehmoments. Ab der Nenndrehzahl sinkt das Drehmoment bei steigender Drehzahl. Das ist der Bereich konstanter Leistung.

Die maximal erreichbaren Wirkungsgrade bei elektrischen Maschinen liegen alle jenseits der 90 %. Doch die unterschiedlichen Maschinentypen erreichen ihre jeweiligen Maximalwerte in verschiedenen Bereichen. Während die ASM und die SRM (im Bild: GRM für „Geschaltete Reluktanzmaschine“) bei hohen Drehzahlen optimal arbeiten, gilt dies für die PSM bereits bei niedrigen Drehzahlen. Diese Tatsache qualifiziert sie speziell für den städtischen Verkehr. Denn bei Stop-and-go-Betrieb arbeiten die Maschinen hauptsächlich im Bereich niedriger Drehzahlen. (Vgl. [Q 177], [Q 178])

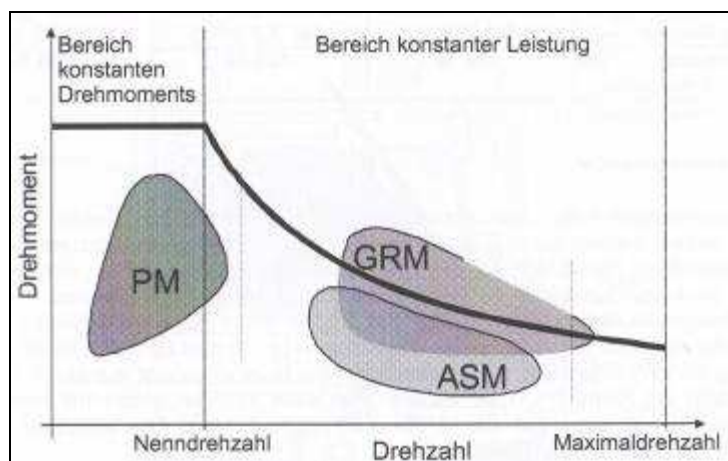


Abb. 5.19: Bereiche optimaler Wirkungsgrade der einzelnen Elektromotortypen in der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie; Quelle: [Q 177]

5.1.3 Einsatzbeispiele

Elektrische Nutzfahrzeuge sind bis heute auf den Straßen eine extreme Seltenheit. Der im wahrsten Sinne des Wortes „schwerste“ Hinderungsgrund ist der Energiespeicher. Daher sind sie in der Reichweite und Tragfähigkeit stark limitiert. Daraus resultiert, dass hauptsächlich kleine Transporter angeboten werden. Beispielhaft dafür werden hier ein relativ preisgünstiger Kleintransporter der Firma Ecocraft Automotive vorgestellt.

Ein interessante Nische für Elektro-LKWs sind Betriebsgelände, die auf emissionsfreie Umgebung Wert legen und in denen die Kosten zweitrangig sind. Dies ist beim Port of Los Angeles der Fall. Hier kommen Schwerlast-Elektro-LKWs zur Container-Verladung zum Einsatz, welche im Anschluss präsentiert werden.

5.1.3.1 EcoCarrier EL

Der EcoCarrier EL ist ein Elektro-Kleintransporter mit zulässigem Gesamtgewicht von 2250 kg. Das Leergewicht beträgt samt Blei-Gel-Batterie 1550 kg, es stehen also 700 kg Nutzlast zur Verfügung. Angetrieben wird der EcoCarrier von einem Drehstromasynchronmotor mit 15 kW Nennleistung und 30 kW Spitzenleistung. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 75 km/h bei einer maximalen Reichweite von 80 km. Zur vollständigen Aufladung der Bleibatterie werden bei einem 3kW-Anschluss etwa acht Stunden benötigt. Der Preis für dieses Fahrzeug liegt etwa bei 30.000 Euro [Q 179]. Lässt man anstelle der Bleibatterien Lithium-Ionen-Batterien einbauen, so ist mit erheblichen Mehrkosten, aber auch mit einer Erhöhung der Nutzlast um 300 kg zu rechnen. Von diesem Modell sollen seit im Jahr 2009 600 Kleinmodelle von VW in Sarajevo gefertigt werden. (Vgl. [Q 179], [Q 180])



Abb. 5.20: EcoCarrier EL der Firma EcoCraft Automotive; Quelle: [Q 180]

5.1.3.2 Nautilus E-30

Dass rein elektrisch angetriebene LKWs auch schwere Lasten bewegen können, unterstreicht ein Projekt des Hafens von Los Angeles (Port of L.A.). Im Rahmen des „Clean Truck Program“ wurden im Februar 2009 unter anderem 25 elektrische Schwerlast-LKWs der Type Nautilus E-30 angekauft, produziert von der Balcon Corporation in den USA. Mit elektrischen und gasbetriebenen Schwerlastern soll das Hafengelände möglichst schadstoffarm gehalten werden. Nach einer Testphase im vergangenen Jahr bewähren sich die LKWs und übernehmen einen Teil der geschätzten 1,2 Millionen LKW-Fahrten vom Hafen zum nahe gelegenen Verschiebebahnhof. Dabei schleppt ein 224 kW starker Drehstrommotor bis zu 30 Tonnen schwere Container. Die verwendeten Bleibatterien liefern eine Spannung von 336 Volt und speichern eine Energiemenge von 280 kWh. Ein voll beladener Nautilus E-30 erreicht mit den Bleibatterien Ziele innerhalb von 50 km. Unbeladen kommt man etwa auf die doppelte Reichweite bei einer Maximalgeschwindigkeit von 72 km/h. Mit dem Standard-Bleibatterien-Package muss man mit Gesamtkosten von 208.000 US-Dollar oder ca. 160.000 Euro je Truck rechnen. Alternativ können auch Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt werden. Sie erhöhen die Reichweite, aber auch die Kosten signifikant.

Eine spezielle Ladestation, welche vier LKWs auf einmal aufladen kann und im Falle des Port of L.A. 75.000 US-Dollar oder ca. 58.000 Euro gekostet hat, sorgt mit einer maximalen Ausgangleistung von 80 kW für rasche Ladevorgänge. Eine komplett aufgebrauchte Batterie wird innerhalb von etwa 4 Stunden auf 100% aufgeladen. Eine Schnell-Ladung auf 60 Prozent nimmt etwa eine Stunde in Anspruch. (Vgl. [Q 181], [Q 182])



Abb. 5.21 Short-Haul Heavy-Duty Electric Truck Nautilus E-30 am Port of LA; Quelle: [Q 182]

5.1.4 Perspektiven

Obwohl in den letzten Jahrzehnten große Anstrengungen und Geldmittel in die Entwicklung elektrischer Fahrzeuge gesteckt wurden, haben nur wenige rein elektrische Fahrzeuge den Weg in die Angebotslisten gefunden. Tendenziell sind leichte Elektroautos und Leichtfahrzeuge zu finden, wenn man nach rein batterieelektrischen Fahrzeugen sucht. Die Gründe dafür liegen im technischen Bereich. Zwar haben die zur Verfügung stehenden Elektromotoren das Leistungsvermögen, auch schwere Lasten zu befördern, doch die Energiedichte der heute erhältlichen Akkumulatoren ist zu gering, um auch nur annähernd die Reichweiten von vergleichbaren Verbrennungsmotorfahrzeugen zu erreichen. Gerade für den Gütertransportbereich, in dem es auf hohe Traktionsleistung und Reichweiten ankommt, ist die Batterietechnik noch nicht ausgereift genug. Es sind zwar schon erhebliche Fortschritte zu verzeichnen, aber man ist noch zu weit vom Komfort, den niedrigen Kosten und den Energiedichten, welche flüssige Kraftstoffe bieten, entfernt, um eine attraktive Alternative darzustellen.

Ein simples Gedankenexperiment verdeutlicht diesen Umstand. Ein für einen kleinen Transporter mit 3,5 Tonnen höchst zulässigem Gesamtgewicht üblicher Tank fasst etwa 120 Liter Diesel. Diese Menge entspricht einem Energieinhalt von circa 1180 kWh. Um dieselbe Energiemenge mittels einer Zebra-Batterie zu speichern, die bekannt ist für hohe Energiedichten, müsste man eine ca. zehn Tonnen schwere Batterie mitschleppen. Die Anschaffungskosten für die Batterie allein würden theoretisch an die 300.000 Euro betragen. Mit kostengünstigeren Bleibatterien würde man sogar mindestens das Dreifache an Gewicht benötigen.

Lange Strecken und schwere Lasten sind somit für Elektro-LKWs und –Transporter auch in Zukunft kein Betätigungsfeld. Ausnahmen sind Arbeitsumfelder, in denen es

weniger auf die Kosten, als vielmehr auf eine unbelastete Umgebungsluft ankommt. Im Stadtverkehr aber, den kurze Strecken und Stop-and-go-Betrieb charakterisieren, kann der elektrische Antrieb seine Stärken, wie gutes Anfahrmoment, Geräusch- und lokale Emissionsfreiheit, ausspielen. Hier liegen auch die Marktpotenziale für rein elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge. Diese Vorteile muss man sich aber mit selbst für den Stadt- und Verteilerverkehr noch schweren und teuren Batteriesätzen erkaufen. Hybrid-elektrische Nutzfahrzeuge haben wohl größere Chancen sich kurz- und mittelfristig erfolgreich am Markt zu positionieren. Die Gründe dafür werden im nächsten Kapitel dargelegt.

5.2 Hybrid-elektrische Nutzfahrzeuge

Batterie-elektrische Nutzfahrzeuge haben – wie unter Kapitel 5.1 dargelegt – prinzipbedingt das Problem der großen, schweren und teuren Traktionsbatterien und der damit fehlenden Reichweite. Sie können schlichtweg die Anforderungen der Nutzer noch nicht ausreichend erfüllen.

Hybrid-elektrische Fahrzeuge schließen einen Kompromiss. Im Gegensatz zu Batteriefahrzeugen kommen in einem Hybridfahrzeug definitionsgemäß zwei unterschiedliche Antriebssysteme zum Einsatz: Im hybrid-elektrischen Fall ein Verbrennungsmotor und mindestens ein Elektromotor. Im Vergleich zu Batteriefahrzeugen muss der Energiespeicher nicht so groß dimensioniert sein, da er hauptsächlich als Pufferspeicher dient (siehe später). Beide Motortypen haben spezifische Vorteile:

Der Elektromotor (EM) ist vorteilhaft für die Beschleunigung aus dem Stand und im Teillastbereich. Er kann schnell auf den Generatormodus umschalten, womit man die Bremsenergie, die sonst als Wärme verloren ginge, in die Batterien rückspeisen kann (Rekuperation). Die Überlastfähigkeit macht es möglich, ihn kurzzeitig für einen Leistungsschub (z.B. bei Steigungen, Überholmanövern, etc.) zu verwenden. Außerdem ist er emissionsfrei und geräuscharm.

Der Verbrennungsmotor (VM) hat vor allem einen entscheidenden Vorteil, den man sich beim Hybridantrieb zunutze macht: Der Treibstoff ist hochkonzentrierte Energie, welche große Reichweiten mit geringem Gewicht ermöglicht. Das Fahrzeug kann schnell und problemlos betankt werden. Weiters erzeugt der VM Abwärme, die beispielsweise für Fahrerkabinen-Heizzwecke verwendet werden kann. Elektromotoren müssen die Wärme auf anderem Weg erzeugen.

Der Verbrennungsmotor stellt nach wie vor die gesamte Vortriebsleistung zur Verfügung. Der Grundgedanke eines Hybridantriebs ist nun im Wesentlichen folgender: Mit einer intelligenten Betriebsstrategie sollen die beiden Antriebssysteme unter Ausnutzung der spezifischen Stärken und Einbeziehung der Batterie so betrieben werden, dass eine merkliche Kraftstoffersparnis erzielt werden kann. Anders ausgedrückt: Es sollen die Vorteile des EM mit denen des VM kombiniert werden und die jeweiligen Schwachstellen vermieden werden. Dazu ist es notwendig, die einzelnen Komponenten geeignet zu kombinieren und zu dimensionieren.

Fahrzeuge mit einem Hybridkonzept benötigen also zusätzliche Komponenten, welche aber den Anschaffungspreis in die Höhe treiben. Die Batterie ist nach wie vor der stärkste Preistreiber. Um am Markt erfolgreich zu sein, müssen die Mehrkosten hybrid-elektrischer Nutzfahrzeuge durch die Vorteile des Hybridantriebs aufgewogen werden. Neben Kraftstoffeinsparungen sind das Geräuschreduzierungen, zusätzliche Funktionalitäten aufgrund der höheren Dynamik des Antriebs und Aufwandsreduzierungen bei der Abgasnachbehandlung [Q 183].

Für hybrid-elektrische Fahrzeuge gibt es eine Reihe an Strukturvarianten mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften. Nachdem auf diese eingegangen wurde, werden mögliche Betriebsstrategien gezeigt, ehe wieder Einsatzbeispiele präsentiert werden.

5.2.1 Strukturvarianten

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Hybridantriebe einzuteilen. Im Rahmen dieser Arbeit wird zwischen den Grundprinzipien serieller und paralleler Hybridantrieb unterschieden. Der leistungsverzweigte Hybridantrieb stellt eine Mischform der beiden Grundprinzipien dar. Einen vereinfachten Überblick über die Realisierungsformen dieser Strukturvarianten bietet die Abb. 5.22 .

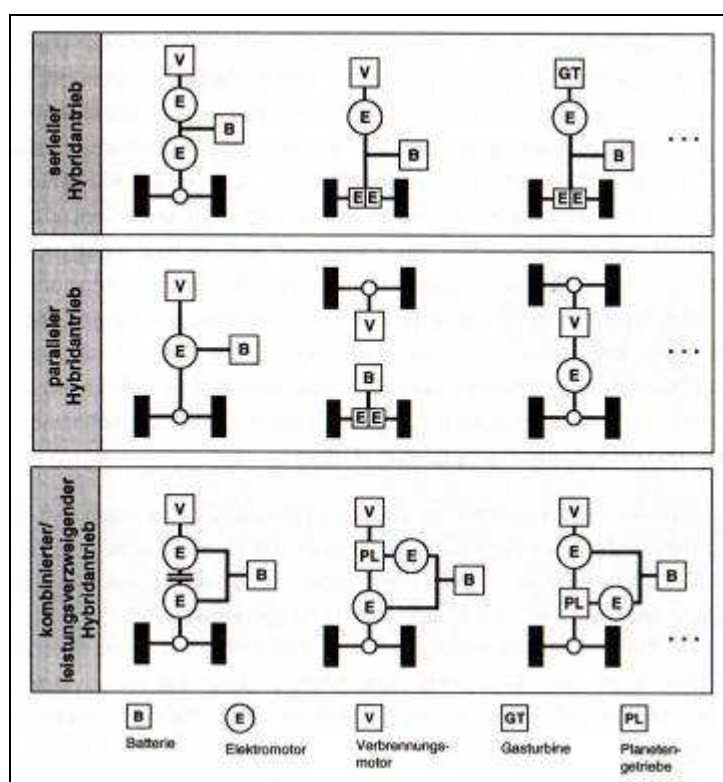


Abb. 5.22: Mögliche Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen; Quelle: [Q 184]

5.2.1.1 Paralleler Hybridantrieb

Bei einem parallelen Hybridantrieb sind der VM und der EM mit den Antriebsrädern gekoppelt. Die Motoren können also entweder einzeln die Räder antreiben oder gemeinsam, wobei sich in diesem Fall die Leistungen der beiden Motoren addieren. Neben den Motoren sind die wesentlichen Komponenten ein Getriebe, der Kraftstofftank, eine Hochleistungsbatterie, eine automatische Trennkupplung und die Leistungselektronik, welche die Gleichspannung für den EM umrichtet. Die

Trennkupplung ermöglicht es, den VM abzukuppeln, um in den Betriebsmodi „rein elektrisches Fahren“ und „Rekuperation“ das Schleppmoment des VM nicht mittragen zu müssen.

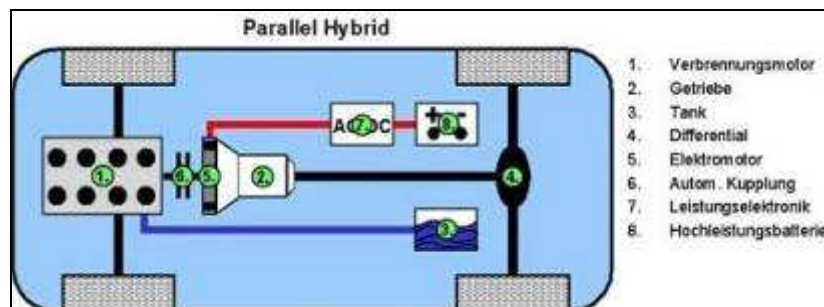


Abb. 5.23: Schema eines parallelen Hybridfahrzeugs; Quelle: [Q 185]

Abb. 5.23 zeigt einen typischen Parallel-Hybridantrieb; die gezeigte Form nennt sich auch *Einwellenhybrid*, da beide Antriebssysteme auf eine Getriebeeingangswelle wirken. Beim *Zweiwellenhybrid* (Abb. 5.22, Mitte) wirken EM und VM auf unterschiedliche Getriebewellen.

Beim Parallel-Hybrid sind folgende Betriebsmodi möglich:

- **Konventionelles Fahren**
Der VM treibt die Räder an. Im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug kommt es kaum zu Wirkungsgrad-Verlusten. Der EM und die zugehörigen Komponenten sind dabei nicht in Betrieb.
- **Elektrisches, emissionsfreies Fahren**
Die EM treibt mit der aus der Batterie bereitgestellten und mit der Leistungselektronik umgerichteten Spannung die Räder an. Der VM ist ausgeschaltet. Diese Betriebsform ist nur mit eingeschränkter Leistung und je nach Batterie-Auslegung mit eingeschränkter Reichweite möglich.
- **Boosten**
Beide Antriebssysteme sind in Betrieb, wobei der VM das Fahrzeug mit voller Leistung antreibt. Der EM stellt zusätzlich Drehmoment zur Verfügung und entnimmt die dazu benötigte Energie aus der Batterie. Eingesetzt wird der Betriebsmodus vor allem bei steilen Anstiegen und starken Beschleunigungsvorgängen. Die Leistungsaddition erlaubt es, den VM kleiner und Kraftstoff sparer zu gestalten. Man spricht in diesem Fall von „Downsizing“.
- **Rekuperation**
Bei einem Bremsmanöver schaltet der EM in den Generatorbetrieb und bremst das Fahrzeug. Es wird ein großer Teil der Bewegungsenergie in elektrische

Energie gewandelt, die in den Batterien gespeichert wird und später wieder zur Verfügung steht. Um Bremsmomente des VM zu vermeiden, wird er in diesem Modus abgekuppelt. Die Rekuperation leistet einen signifikanten Beitrag zur Kraftstoffeinsparung.

- **Lastpunktanhebung**

Der VM arbeitet im hohen Drehzahlbereich mit optimalem Wirkungsgrad. Daher wird er auch nach Möglichkeit unabhängig von der Bedarfsleistung in einem Betriebspunkt hohen Wirkungsgrades betrieben. Die „überschüssige“ Energie, die nicht zum gerade gewünschten Vortrieb benötigt wird, wird dem EM im Generatormodus zugeführt und wird als elektrische Energie in den Batterien gespeichert.

(Vgl. [Q 186], [Q 187], [Q 188])

5.2.1.2 Serieller Hybridantrieb

Ein serielles Hybridfahrzeug (Abb. 5.24) zeichnet sich dadurch aus, dass der VM nicht mechanisch an die Antriebsräder angebunden ist. Stattdessen treibt er einen Generator (EM1) an, der seinerseits den elektrischen Fahrmotor und den Energiespeicher im elektrischen Zwischenkreis mit Energie versorgt. Anders als beim parallelen Hybridantrieb muss der elektrische Fahrmotor die gesamte Antriebsleistung zur Verfügung stellen und muss dementsprechend dimensioniert werden. Außerdem entfällt das komplexe Getriebe des parallelen Hybrids.

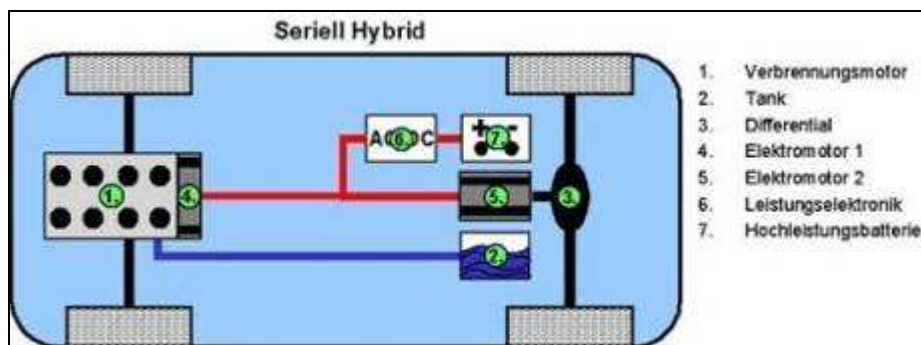


Abb. 5.24: Schema eines seriellen Hybridfahrzeugs; Quelle: [Q 189]

Der serielle Hybridantrieb stellt quasi eine Reihenschaltung der Energiewandler mit entsprechend langer Wirkungsgradkette dar. Dadurch, dass der VM nicht direkt die Räder antreibt, kann er im aktiven Zustand **betriebspunktentkoppelt** betrieben werden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer **Phlegmatisierung** des VM. Das heißt, er wird in einem quasistationären Betriebspunkt gehalten, der unabhängig von der gerade gewünschten Antriebsleistung ist und auf die Kennlinie des jeweiligen VM abgestimmt wird. Diesen Betriebspunkt kennzeichnen meist

minimale Emissionen oder ein optimaler Wirkungsgrad. Das Prinzip der Phlegmatisierung wird in Abb. 5.25 veranschaulicht: Leistet der VM mehr als zum Vortrieb nötig ist, wird die „überschüssige“ Energie in den Batterien zwischengespeichert; leistet er weniger, zieht der Fahrmotor (EM2) die zusätzliche Energie aus dem Batteriezwischenkreis.

Daraus ergibt sich ein weiterer Vorteil: Der VM muss nicht auf maximale Leistung dimensioniert sein (**Downsizing**). Er muss die Leistungsspitzen nicht abdecken können, sondern nur die „Durchschnittsleistung“ liefern. Dabei gibt er – wenn in Betrieb – unabhängig von der benötigten Antriebsleistung ein ungewohnt gleichförmiges Geräusch ab.

Die Batterie kann deutlich kleiner sein als die eines Elektrofahrzeuges.

Ein Nachteil des seriellen Hybridantriebs ist die Tatsache, dass die dreifache Antriebsleistung in das Fahrzeug verbaut werden muss.

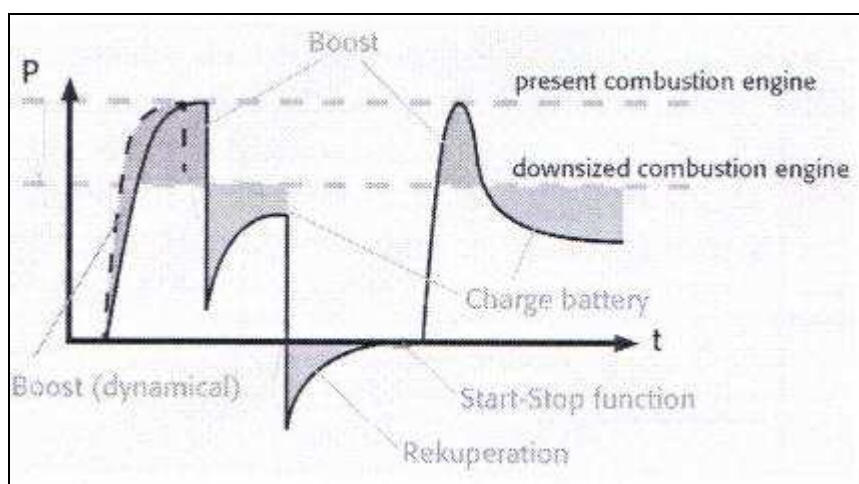


Abb. 5.25: Prinzip der Phlegmatisierung, ermöglicht Downsizing; Quelle: [Q 190]

Im Wesentlichen sind folgende Betriebsmodi möglich:

- **Konventionelles Fahren**
Der serielle Hybrid wandelt beim konventionellen Fahren die Antriebsleistung mehrfach. Der VM betreibt den EM1 als Generator. Dieser versorgt den Fahrmotor (EM2) mit elektrischer Leistung. Anzumerken sind hier die nicht unwesentlichen Verluste aufgrund der langen Wirkungsgradkette.
- **Elektrisches, emissionsfreies Fahren**
Die nötige Antriebsleistung wird aus den Batterien bereitgestellt. Der EM2 treibt das Fahrzeug an, VM und EM1 sind inaktiv.
- **Boosten**
Der VM wird mit maximaler Leistung betrieben. Reicht diese vom EM1

gewandelte Leistung nicht aus (Steigungen, starkes Beschleunigen), nutzt der EM2 zusätzlich die in der Batterie gespeicherte Energie.

- **Rekuperation**

Der EM2 bremst das Fahrzeug im generatorischen Betrieb. Die dabei generierte Energie wird in die Batterien zwischengespeichert und steht später zur Verfügung. Der VM und EM1 sind außer Betrieb.

- **Lastpunktanhebung**

Der VM arbeitet in einem günstigen Betriebspunkt und generiert dadurch über den EM1 mehr Leistung als der EM2 gerade zum Vortrieb benötigt. Die überschüssige Energie wird im Batteriekreis zwischengespeichert.

(Vgl. [Q 187], [Q 191], [Q 192], [Q 193])

5.2.1.3 Mischformen

Zu den Mischformen der Grundprinzipien zählen der *kombinierte Hybrid* und der *leistungsverzweigende Hybrid*.

Der **kombinierte Hybridantrieb** (Abb. 5.22 unten) bietet die Möglichkeit, mittels einer Kupplung die mechanische Leistung des VM direkt an die Räder zu übertragen. In gewissen Betriebszuständen (z.B. Überlandfahrten) kann so die lange Wirkungsgradkette eines seriellen Hybrids und die damit einhergehenden Verluste vermieden werden. Weiterhin können zwei EM für einen Leistungsschub eingesetzt werden. Der Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades stehen ein höherer Komponentenaufwand (komplexe Kupplung) und eine kompliziertere Betriebsstrategie gegenüber.

Eine noch komplexere Mischform ist der **leistungsverzweigende Hybridantrieb**. Hier wird ein Teil der Leistung des VM direkt mechanisch an die Räder übertragen und der Rest gelangt über ein Planetengetriebe und zwei EM an die Räder. Das Antriebssystem verhält sich daher wie ein stufenlos verstellbares Getriebe, was dem VM erlaubt, in einem optimalen Betriebszustand zu arbeiten. Die Batterien können zusätzlich überschüssige Energie zwischenspeichern. Ähnlich wie beim kombinierten Hybridantrieb steht einer leichten Wirkungsgradverbesserung aber ein noch höherer Aufwand gegenüber.

(Vgl. [Q 187], [Q 194], [Q 195])

5.2.2 Komponenten

Die aufwändigsten und teuersten Komponenten eines Hybridfahrzeugs und auch eines Hybridnutzfahrzeugs sind – wie beim Elektrofahrzeug – die Energiespeicher

und der Elektromotor. Dazu kommen noch der Verbrennungsmotor und je nach Hybridform ein mehr oder weniger komplexes Getriebe.

Bezüglich der **Energiespeicher** sei auf das Kapitel 5.1.1 verwiesen. Angemerkt sei noch, dass für Hybridfahrzeuge das Hauptaugenmerk auf eine hohe Leistungsdichte gelegt wird. Die wichtigsten Batteriesysteme sind daher: Die Lithium-Ionen-Batterie (Abschnitt 5.1.1.4) und die Nickel-Metallhydrid-Batterie (Abschnitt 5.1.1.3). Aufgrund ihrer niedrigen Kosten spielt die Bleibatterie (Abschnitt 5.1.1.2) immer noch eine Rolle. Außerdem finden auch Ultracaps (Abschnitt 5.1.1.6) wegen ihrer überragenden Leistungsdichte und Lebensdauer in Hybridfahrzeugen Verwendung. Die Batterien fallen in Hybridfahrzeugen generell kleiner aus als in batterieelektrischen Fahrzeugen. Das macht sie günstiger und leichter.

Elektromotoren waren Thema des Kapitels 5.1.2.

Verbrennungsmotoren und speziell Dieselmotoren wurden im Kapitel 3.1 behandelt.

Auf Getriebe und deren verschiedene Varianten (Planetengetriebe etc.) wird in dieser Arbeit nicht eingegangen. Für Interessierte sei auf die Literatur verwiesen: [Q 196], [Q 197]

5.2.3 Betriebsstrategien

Die einzelnen Antriebssysteme haben unterschiedliche Energie- und Leistungsdichten und Wirkungsgrade. Im Optimalfall ergänzen sie einander so, dass die Schwächen der einen Antriebskomponente durch die Stärken der anderen aufgehoben werden. Die Aufgabe einer intelligenten Betriebsstrategie (BS) eines Hybridfahrzeuges ist es nun, die Betriebsmodi so zu kombinieren, dass der gesamte Antriebsstrang möglichst verbrauchs- und emissionsarm betrieben werden kann. Eine falsch gewählte BS kann dazu führen, dass das erzielbare Einsparpotenzial bei weitem nicht ausgeschöpft wird und verursacht unnötige Verluste und Mehrkosten. Wichtige Inputs für eine BS sind unter anderem der momentane und der mittlere Leistungsbedarf, die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit, der Ladezustand des Energiespeichers und Zeitkonstanten, wie etwa die Anlaufzeit des VM. In der Praxis sind oft mehrere Inputs gleichzeitig von Bedeutung; daraus resultieren zumeist mehrdimensionale, komplex aufgebaute BS-Felder. Dabei können Randbedingungen wie lokale erwünschte Emissions- und Geräuschfreiheit, starke Beschleunigung, begrenzte elektrische Leistung und Energie zu Zielkonflikten führen. (Vgl. [Q 198])

Ein vereinfachtes Beispiel eines parallelen Hybridantriebs in Abb. 5.26 soll das Prinzip einer BS demonstrieren.

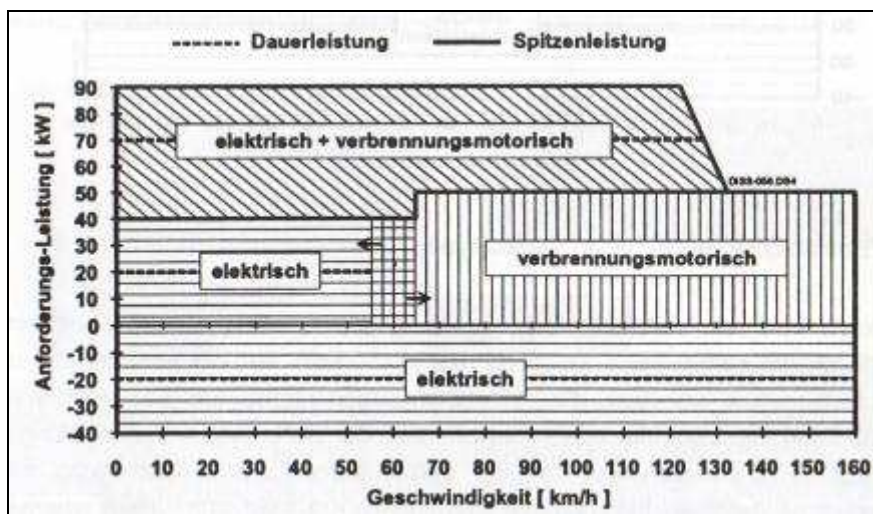


Abb. 5.26: Einfache Betriebsstrategie eines Parallel-Hybrids; Quelle: [Q 198]

Es stellt sich als energetisch günstig heraus, nach Möglichkeit unter stationären Bedingungen nur eine Antriebskomponente zu betreiben. Fährt das Fahrzeug gleichmäßig, ist im ersten und zweiten Gang der Betrieb des EM aufgrund des besseren Teillastwirkungsgrades von Vorteil. Bei höheren Gängen ist der VM dem EM vorzuziehen. Beschleunigt man das Fahrzeug, so ist das weitere Betriebsverhalten von der angeforderten Leistung und der aktuellen Geschwindigkeit abhängig. Bis zu einer Geschwindigkeit von 65 km/h beschleunigt das Fahrzeug rein elektrisch, sofern die angeforderte Leistung 40 kW nicht überschreitet. Ist dies aber der Fall wird der VM dazu geschaltet. Bei Geschwindigkeiten von über 65 km/h und einer Anforderungsleistung von unter 50 kW verhält sich das Fahrzeug wie ein konventionelles. Über 50 kW unterstützt der EM bei der Leistungsbereitstellung. Um ein schnelles Entladen der Energiespeicher zu vermeiden, wird in diesem Fall die elektrische Antriebsleistung ab 120 km/h linear auf Null bei 130 km/h gedrosselt.

Negative Anforderungsleistungen treten bei Bremsmanövern auf. Diese werden mittels Rekuperation vom EM im Generatormodus in elektrische Energie gewandelt. (Vgl. [Q 198])

5.2.4 Einsatzbeispiele

5.2.4.1 MAN Ultracap-Bus

Der Ultracap-Bus ist ein vom bayrischen Wirtschaftsministerium gefördertes Forschungsprojekt der MAN Nutzfahrzeuge AG in Zusammenarbeit mit den Firmen Siemens Verkehrstechnik und EPCOS. Im Rahmen eines Linienbetriebs wurde er als Stadtbus in Nürnberg über sechs Monate versuchsweise eingesetzt. Dabei wurden interessante Ergebnisse erzielt, die es Wert sind, in dieser Arbeit vorgestellt zu werden.



Abb. 5.27: MAN Ultracap-Bus im Linienbetrieb; Quelle: [Q 199]

Der Ultracap-Bus besitzt einen seriellen Hybrid-Antriebsstrang. Als VM dient ein 162 kW Dieselmotor, der eine 170 kW PSM als EM im Generatormodus betreibt. Der Generator versorgt zwei 75 kW ASM, die die Räder über ein Summiergetriebe antreiben (Abb. 5.28). Als Energiespeicher sind acht Ultracap-Module am Dach des Busses elektrisch angeschlossen. Die Ultracap-Module enthalten insgesamt 288 in Reihe geschaltene Doppelschichtkondensator-Zellen und wiegen mitsamt Trägerkonstruktion 520 kg. Der maximale Energieinhalt beträgt 0,4 kWh bei einer Gesamtspannung von 640V. (Vgl. [Q 200])



Abb. 5.28: Prinzip des Ultracap-Bus; Quelle: [Q 201]

Der Energiespeicher ermöglicht es, den VM unabhängig vom Betriebspunkt zu betreiben und die Lastspitzen abzudecken. Somit kann der VM leistungsschwächer dimensioniert und phlegmatisiert betrieben werden. In der Praxis macht es Sinn, aufgrund der Wirkungsgradkette und der damit einhergehenden Verluste möglichst wenig Energie zwischenspeichern. Daher ist der Kondensatorspeicher so dimensioniert, dass er durch Rekuperation die rückspeicherbare Energie eines einzelnen Bremsvorganges zwischenspeichern kann.

In Abb. 5.29 lässt sich das Prinzip der Ultracaps-Arbeitsweise gut nachvollziehen. Bei jeder Beschleunigung des Busses liefern die Ultracaps Leistung und der Ladezustand sinkt. Bremsst der Bus, laden sich die Module mittels Rekuperation wieder auf. Im Schnitt kann so ca. 40 % der Antriebsenergie in das System wieder zurückgespeist werden. Diese Tatsache trägt zu einer erheblichen Kraftstoffeinsparung bei. Die Prototypausführung erreichte dabei Speicherwirkungsgrade von etwa 85%.

Eine weitere Innovation, die hilft, den Treibstoffverbrauch zu mindern, stellt die Start-Stopp-Automatik dar. Durchschnittlich 36% der Zeit befindet sich dieser spezielle Nürnberger Stadtbus im Stillstand. Mit der Start-Stopp-Automatik wird der VM in Fahrpausen abgestellt. So wird erreicht, dass der VM in 19% der Zeit nicht in Betrieb ist. Allfällig notwendige Nebenaggregate, die ohnehin vom VM entkoppelt betrieben werden, werden von den Ultracaps mit Energie versorgt. (Vgl. [Q 200], [Q 202])

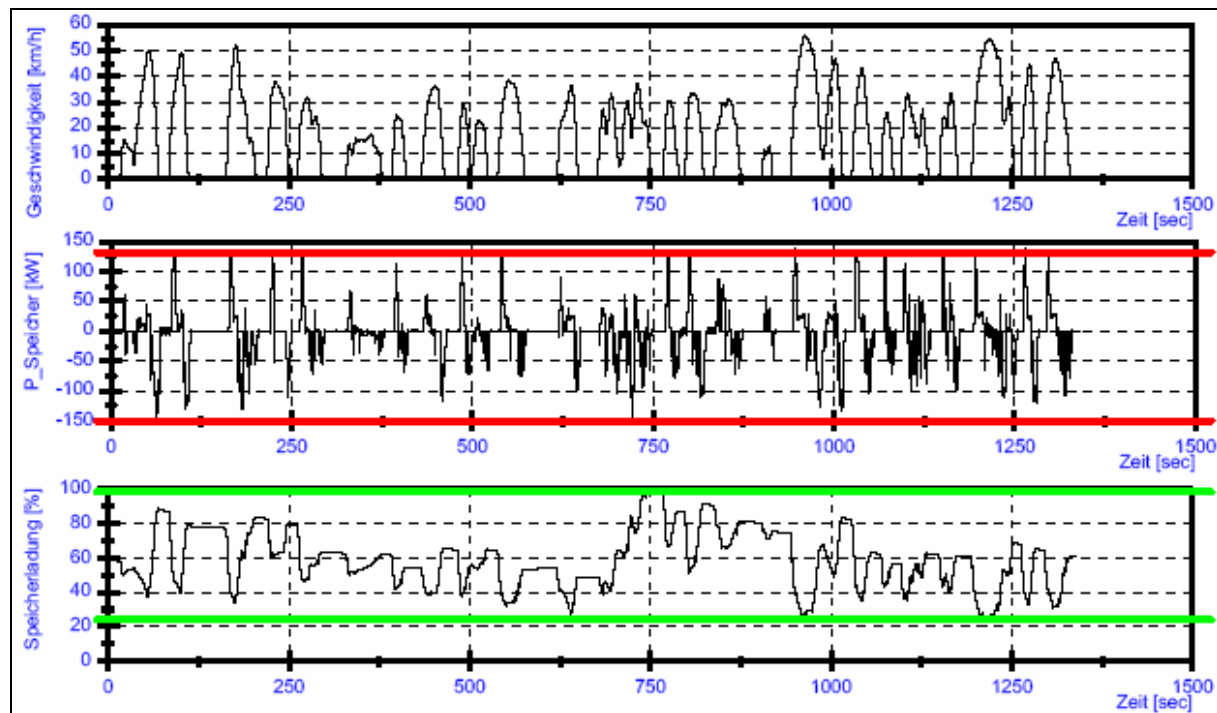


Abb. 5.29: Geschwindigkeit (oben), Speicherleistung (Mitte) und Speicherladung (unten) des Ultracap-Busses bzw. der Ultracap-Energiespeicher im Linienbetrieb; Quelle: [Q 203]

Interessant ist nun das Ergebnis dieses Einsatztests. In Summe konnten gewichtsbereinigt je nach Passagieranzahl etwa 24 – 27 % an Kraftstoff gegenüber einem normalen VM-Bus eingespart werden. Weitere Systemvorteile ergaben sich durch beinahe emissions- und geräuschfreien Aufenthalt und Abfahren aus den Haltestellen. Dabei traten während der sechs Monate keine Schäden an den Ultracap-Systemen auf. Die Ausfallraten dieser Ultracap-Busse lag nicht über dem Wert konventioneller Busse und die Kennwerte der Energiespeicheranlage verschlechterten sich über den Versuchszeitraum nicht. (Vgl. [Q 200])

Man kann also von einem erfolgreichen Probetrieb sprechen. Einzig die hohen Systemkosten sprechen gegen einen breiten Einsatz. Die Ultracaps-Anlage und drei Elektromotoren mitsamt Umrichtertechnik machen den Ultracap-Bus verhältnismäßig teuer. Laut Raimund Grammer, Sprecher der Daimler Chrysler Nutzfahrzeugsparte, ist generell bei Hybrid-Nutzfahrzeugen mit einem Mehrpreis von einem Drittel zu rechnen [Q 204]. Dies stellt ein klares Hindernis für Privatunternehmen dar. Für Stadtkommunen, die in Zukunft strengere Emissions- und Lärmvorschriften erfüllen müssen, sind Hybrid-Fahrzeuge eher eine Alternative.

Nicht zuletzt deshalb sieht die MAN Nutzfahrzeug AG großes Potenzial im Stadtbus-Bereich und plant weitere Investitionen in die Entwicklung dieses

Konzepts. Bis zum Jahr 2015 rechnet MAN mit einem potenziellen Marktanteil von 15 bis 20 Prozent für Hybrid-Stadtbusse [Q 205].

5.2.4.2 Nissan Atlas Hybrid



Abb. 5.30: Nissan Atlas Hybrid; Quelle: [Q 206]

Als Vertreter der Klasse bis zu 3,5 Tonnen hzGG wird der Nissan Atlas H43 Hybrid (Abb. 5.30) vorgestellt. Je nach Modell beträgt die maximale Nutzlast zwei Tonnen und bei verlängertem Radstand drei Tonnen. Das Modell wird von Isuzu Motors Ltd. in Japan hergestellt.

Es handelt sich hierbei um ein paralleles Hybrid-Antriebskonzept mit einem 96 kW Dieselmotor, der direkt die Räder antreibt. Zusätzlich ist ein 25,5 kW PSM mit einer Maximalleistung von 29 kW installiert, der über eine Antriebswelle als Leistungsunterstützung fungiert. In der so genannten *Hybrid Box* – seitlich angebracht gemäß Abb. 5.31 – sind ein Umrichter und zwei Lithium-Ionen-Batterie-Einheiten mit einer Ausgangsspannung von 346 V angebracht. Da in diesem Modell rein elektrischer Betrieb nicht vorgesehen ist, können die Batterien leicht und Raum sparend dimensioniert werden. Sie speichern insgesamt maximal 1,9 kWh bei einem Gewicht von annähernd 40 kg. (Vgl. [Q 207])

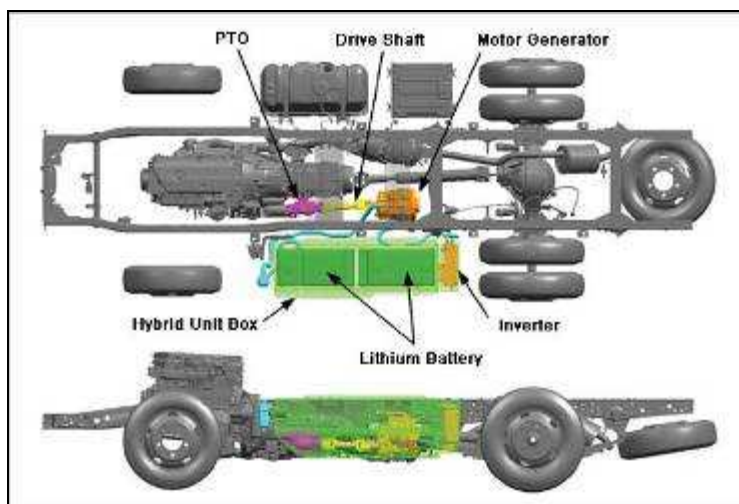


Abb. 5.31: Anbringung der Hybridkomponenten im Fahrwerk des Atlas Hybrid; Quelle: [Q 208]

Die Konfiguration erlaubt folgende Betriebsmodi (Abb. 5.32). Beim Beschleunigen (1) unterstützt der EM den VM. Die Leistungsunterstützung wird so geregelt, dass der VM möglichst effizient und emissionsarm betrieben werden kann. Während einer konstanten Fahrt (2) wird das Nutzfahrzeug allein vom VM angetrieben. Bei einem Bremsmanöver (3) werden die Batterien durch Rekuperation geladen. Der VM muss dazu abgekuppelt sein. Während eines Stillstands (4) stellt sich der VM automatisch ab. Eventuell nötige Nebenaggregate werden vom EM betrieben.

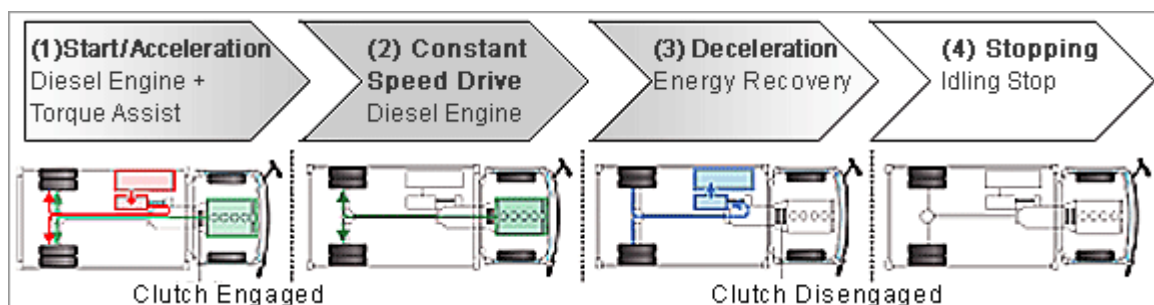


Abb. 5.32: Betriebsmodi des Atlas Hybrid; Quelle: [Q 209]

Im Rahmen des japanischen Testzyklus M15 wurden Vergleiche zwischen der konventionellen Dieselsonne und dem Atlas Hybrid durchgeführt. Der Testzyklus bildet ein typisches Fahrprofil für den Stadtverkehr nach, den niedrige Geschwindigkeiten, viele Beschleunigungs- und Bremsvorgänge charakterisieren. Das Ergebnis dieses Versuchs war eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um etwa 25 % (siehe Abb. 5.33). Die meisten Einsparungen gelangen erwartungsgemäß beim Beschleunigen und während des Fahrzeugstillstands. (Vgl. [Q 207])

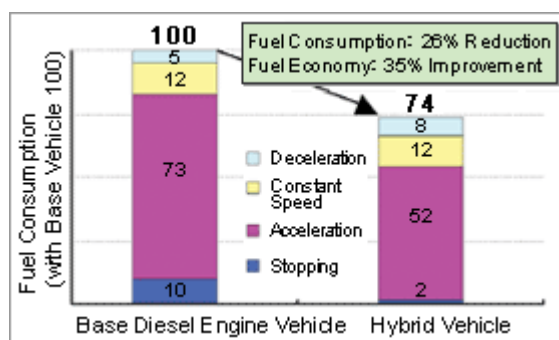


Abb. 5.33: Kraftstoffverbrauch des Atlas Hybrid im Vergleich zur Diesel-Version; Quelle: [Q 210]

Diese Einsparungen können im täglichen Betrieb normalerweise nicht erreicht werden. Nissan spricht in einer Pressemitteilung von einer Kraftstoffeinsparung von 10 bis 20 Prozent und von einer CO₂-Emissions-Senkung von bis zu 25 Prozent im Stadtverkehr. Preislich bewegt sich der Atlas Hybrid je nach Ausführung bei umgerechnet bis zu 40.000 Euro inkl. Steuern (Preis in Japan, inkl. Steuern, Stand: Mai 2006) [Q 211].

Der Preis dürfte auch hier das größte Hindernis für einen raschen Markterfolg sein. Zum Vergleich: Der vergleichbare konventionelle Nissan Atlas mit Dieselantrieb kostet je nach Ausführung inkl. Steuern umgerechnet bis zu 30.000 Euro (Preis in Japan, inkl. Steuern, Stand: Jänner 2007) [Q 212]. Der Atlas Hybrid ist also ungefähr ein Drittel teurer.

Führt man dieselbe Amortisationsrechnung wie bei den Econics durch (siehe Tab. 5.7), so kommt man auf ein ähnliches Ergebnis. In diesem Fall wird wieder vom Stadtverkehr und den dafür üblichen Werten ausgegangen. Der Treibstoffverbrauch wurde beim Atlas Hybrid um 20% niedriger angesetzt. Ergebnis: Die Mehrkosten durch die Anschaffung rentieren sich nach einigen Jahren oder etwa 140.000 km Laufleistung.

	Atlas		Atlas Hybrid	
Kraftstoff	Diesel		Diesel	
Jahresfahrleistung	25.000		25.000	
Verbrauch je 100 km	35 l		28 l	
Kraftstoffkosten je Einheit	1,02 €		1,02 €	
Kraftstoffkosten je 100 km	35,7 €		28,56 €	
Kraftstoffkosten pro Jahr	8925 €		7140 €	
Anschaffungskosten	30.000 €		40.000 €	
Amortisation nach	140.056 km			
Amortisation nach	5,60 Jahren			

Tab. 5.7: Berechnung der Amortisationsdauer eines Atlas Hybrid im Vergleich zur Diesel-Version; eigene Berechnung, Datenquelle: [Q 207]

5.2.5 Fazit

Die Zukunftsaussichten hybrid-elektrischer Nutzfahrzeuge sind, verglichen mit denen rein elektrischer Fahrzeuge, vielversprechender, speziell wegen des klaren Kosten- und Reichweitenvorteils. Die Batterie ist wesentlich kleiner und kostengünstiger. Außerdem kann sie in der Regel mittels Rekuperation und dem VM aufgeladen werden, ohne dass ein Fahrzeugstillstand dazu nötig wäre.

Grundgedanke eines hybrid-elektrischen Fahrzeugs ist, die Nachteile eines konventionellen Fahrzeugs durch Hinzufügen mindestens eines Elektromotors zu vermeiden. Die gewohnten Vorteile hingegen, an erster Stelle ist die Reichweite anzuführen, sollen mit dem VM beibehalten werden.

Zusammengefasst handelt es sich bei den Stärken des Hybridantriebs um Kraftstoffeinsparungen, Emissions- und Geräuschminderungen und den kurzzeitig möglichen rein elektrischen Betrieb. Dem gegenüber stehen neben den höheren Kosten das Mehrgewicht, welches zu Nutzlastverlust führt, und die Komplexität des Antriebs.

Um sich am Markt positionieren zu können, müssen sich Hybrid-Konzepte aber vor allem mit den preisgünstigeren, konventionell betriebenen Fahrzeugen messen. Der vorhandene Preisunterschied von bis zu einem Drittel mehr muss mit dem zusätzlichen Nutzen aufgewogen werden. Wie so oft hängt es vom Einsatzgebiet ab, ob die Kosten-Nutzen-Rechnung zu einem positiven Ergebnis kommen kann. Für Fern- und Überlandverkehr ist der Hybridantrieb auf jeden Fall keine dauerhafte Zukunftslösung. Im fließenden Verkehr sind keine markanten Verbrauchsvorteile zu erwarten. Denn Elektromotoren können aufgrund ihres guten Anfahrmoments ihre Stärken vor allem im Stop-and-go-Betrieb ausspielen. Dieses Profil macht hybrid-elektrische Nutzfahrzeuge für den Stadtverkehr interessant. Gerade hier ergeben sich durch die Forderung nach Geräusch- und Emissionsarmut perfekte Synergien. Beste Chancen auf eine rasche Umsetzung gibt es somit für Stadtbusse und für den städtischen Verteilerverkehr. Bereits umgesetzt wurden Hybridkonzepte in einigen europäischen Städten bei Kommunalfahrzeugen wie Stadtbussen, Müllsammeldienst etc. Dabei wurden durchschnittliche Kraftstoffeinsparungen von bis zu einem Viertel realisiert.

6. THG-Emissions-Szenarien

Das Thema Emissionsreduktion steht in den letzten Jahren im Zentrum zahlreicher Untersuchungen von Ökobilanzen. Da der Straßenverkehr und im Speziellen auch der Straßengüterverkehr einer der Sektoren ist, deren Treibhausgasemissionen weiter steigen, steht er hier im Mittelpunkt der betrachteten Szenarien. Nachdem alternative Kraftstoffe und Antriebe abgehandelt und mittels Literaturanalyse Daten gesammelt wurden, wird in dem nun folgenden Abschnitt versucht, einige Szenarien betreffend den Ausstoß von Treibhausgasen durch Nutzfahrzeuge abzuschätzen, diese zu vergleichen, um daraus wertvolle Rückschlüsse zu ziehen. Dabei soll unter Tötigung einiger vereinfachender Annahmen und unter Einbeziehung der gesammelten Daten abgeschätzt werden, wie sich die Nutzfahrzeug-Emissionen ausgehend vom Jahr 2008 bis ins Jahr 2020 entwickeln können.

6.1 Methodisches Vorgehen

Bevor die Szenarien präsentiert werden, sei noch Raum für wichtige Bemerkungen betreffend die Methodik gegeben. Bei den Berechnungen handelt es sich keineswegs um Prognosen, sondern um Szenarien, die ein Ergebnis anhand der eingestellten Parameter liefern und dabei eine Vielzahl an Vereinfachungen mit einschließen. Sie sollen also vielmehr ein Gefühl für die Problematik vermitteln, denn genaue Resultate und Prognosen liefern. Für diese Zwecke ist das präsentierte Modell nicht geeignet.

Es werden drei Emissionsszenarien präsentiert. Die ersten beiden Emissionsszenarien sollen die Bandbreite der möglichen Treibhausgasentwicklung für Nutzfahrzeuge bis 2020 definieren. Das Szenario 1: „Business-as-Usual“ stellt den Worst-Case dar, in dem bewusst von negativen Erwartungshaltungen betreffend der THG-Emissionen im Straßengüterverkehr ausgegangen wird. Als Gegenpart wird im zweiten „ökologischen Szenario“ wissentlich ein positives Bild skizziert. Das dritte Szenario ist der Versuch einer realistischen Abschätzung, dessen Ergebnis sich definitionsgemäß in dem von den zwei ersten Szenarien aufgespannten Rahmen bewegen wird.

Die Szenarien im Überblick:

1. Business-as-Usual
2. Ökologisches Szenario
3. Versuch einer realistischen Abschätzung

6.1.1 Inhaltliche Abgrenzung

In folgenden Betrachtungen stehen die Analyse und Bewertung von Antriebstechnologien und Kraftstoffen im Hinblick auf ihre Potenziale zur Emissionsminderung im Mittelpunkt. Weitere Maßnahmen zur CO₂-Reduktion im Straßengüterverkehr wie konventionelle Effizienzverbesserungen sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen. Ökonomische Rahmenbedingungen (Ölpreis, Strompreis, Rohstoffpreise etc.) und deren Veränderung und damit einhergehende Veränderungen im Verkaufsverhalten fließen nicht explizit in die Berechnung ein. Jedoch können sie durch eine geeignete Wahl der Parameter von außen Berücksichtigung finden.

Des Weiteren konzentriert sich die Darstellung auf die Nutzungsphase der Fahrzeuge (direkte Emissionen). Das bedeutet, dass der Ressourcenverbrauch und die Emissionen bei Produktion und Nachnutzung (Recycling, Entsorgung) der Fahrzeuge im Rahmen der folgenden Betrachtung nicht behandelt werden. Schließlich liegt der Schwerpunkt der Analysen auf dem Bereich Straßengüterverkehrs, welcher auch der Hauptemittent von Treibhausgasen im Transportbereich ist.

6.1.2 Zeitlicher und regionaler Bezug

Der Fokus der Untersuchungen liegt auf Österreich mit den hier geltenden Rahmenbedingungen und Voraussetzungen. Betrachtet werden ausschließlich Antriebstechnologien und alternative Kraftstoffpfade, die für den österreichischen Markt von Relevanz sind und vom Autor bis 2020 als Erfolg versprechend für den Straßengüterverkehr erwägt werden. Dabei handelt es sich um Hybrid-elektrische Antriebe und um CNG und Biotreibstoffe (Biodiesel und Ethanol).

Zeitlich ist für die Emissionshochrechnung der Rahmen 2008 bis 2020 von Interesse.

6.1.3 Datengrundlage

Für eine Hochrechnung der Emissionen bis 2020 ist eine Reihe an Daten erforderlich.

Als Grundlage für die Berechnungen wurden die Daten der intensiven Literaturrecherche aus Kapitel 2 bis 5 herangezogen. Speziell stammen die Werte für die bisherigen Emissionen aus dem zweiten Abschnitt. Die THG-Emissionseinsparungspotenziale der einzelnen Antriebsvarianten sind den Kapiteln drei, vier und fünf entnommen, wobei im Sinne der getätigten Abschätzung Gewichtungen vorgenommen werden. Fehlende Daten wurden einer Publikation von GRÜNWALD R., 2006 [Q 215] entnommen und sind im Text als solche gekennzeichnet.

6.1.4 Vereinfachende Annahmen

In der Literatur finden sich eine Vielzahl an Studien und Daten über die THG-Emissionen im Personenverkehr. Die Datengrundlage für Nutzfahrzeuge ist um einiges spärlicher. Nicht zuletzt deshalb mussten unter Anderem folgende vereinfachende Annahmen getroffen werden:

- Der Tanktourismus wurde auf vereinfachte Weise analog zu Kapitel 2 ausgeklammert. Es gelten also nur die in Österreich verursachten Emissionen.
- Die möglichen zukünftigen alternativen LKW-Systeme sind Hybridantriebe, CNG- und Alternativkraftstoff- befeuerte Antriebe.
- Die Fahrleistung je LKW ändert sich über den betrachteten Zeitraum nicht.
- Trotz intensiver Recherchen waren die durchschnittlichen Emissionen leichter Nutzfahrzeuge im Vergleich zu schweren nicht zu eruieren. Dieser Umstand ist leicht verständlich, da die jährlichen Fahrleistungen der einzelnen Nutzfahrzeuge stark divergieren und nicht statistisch festgehalten werden. Um aber bei der Ergebnisbetrachtung einen Anhaltspunkt bezüglich der Emissionsaufteilung zwischen leichten und schweren Nutzfahrzeugen liefern zu können wurde ein Schwerlastemissionsfaktor definiert. Dieser deklariert, dass ein schwerer LKW (>3,5t hzGG) pro Jahr durchschnittlich um den Faktor Sieben mehr CO₂-Äquivalente emittiert wie ein leichter (<3,5t hzGG). Wie erwähnt, handelt es sich um eine Annahme, die dem Autor dieser Szenarien aufgrund der schwereren Lasten, höheren Distanzen, welche schwere Nutzfahrzeuge zurücklegen, und des höheren Verbrauchs je Kilometer realistisch erscheint.
- Die Marktdurchdringungsraten des Jahres 2008 für alternative Antriebssysteme werden auf Null gesetzt. Diese Näherung ist – wie man dem Kapitel 2.3.3 entnehmen kann – durchaus gültig.
- Aufgrund des Fehlens von aktuellen Daten wurden als Grundlage für die Emissionen im Jahr 2008 die Daten aus dem Jahr 2003 hochgerechnet. Dabei wurden die inzwischen gestiegene Fahrleistung und eine Effizienzverbesserung von 2% berücksichtigt. Für 2003 sind nach Kapitel 2.6 etwa 6,6 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente errechnet worden. Hochgerechnet ergeben sich für das Jahr 2008 somit Treibhausgasemissionen von ca. 7,2 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten.
- Es gelten nur die direkten THG-Emissionen im Verkehr (Tank-to-Wheel). Emissionen, die bei der Kraftstoffproduktion, -lieferung oder -speicherung und bei der Produktion irgendwelcher Antriebskomponenten anfallen, werden nicht berücksichtigt.

- Von den allgemeinen Einsparungen profitieren auch die alternativen Systeme. Die Gesamt-Emissionseinsparungen eines alternativen Antriebssystems setzen sich also additiv aus den allgemeinen und spezifischen Einsparungen zusammen.
- Für die Aufteilung in schwere und leichte Nutzfahrzeuge wurde vereinfachend angenommen, dass die leichten eher dem Stadtverkehr und die schweren eher dem Überlandverkehr zuzurechnen sind.
- Die Beimischung von Biokraftstoffen zu den konventionellen Kraftstoffen bleibt anteilmäßig unverändert zum Jahr 2008.
- Ökonomische Betrachtungen werden bei der Berechnung wohlwissend ausgeklammert. Diese können aber anhand der Eingaben durch den Benutzer vorgegeben werden. Der Benutzer impliziert beispielsweise einen ökonomischen Erfolg eines Nutzfahrzeug-Antriebssystems dadurch, dass er ihm eine hohe Marktdurchdringungsrate beimisst. Es handelt sich hierbei also um eine einfache Hochrechnung.

6.1.5 Eingabe-Parameter

Für die Hochrechnung der THG-Emissionen wurde ein Excel-Programm erstellt, das nach der Einstellung einiger Parameter errechnet, wie sich die Emissionen in Kohlendioxid-Äquivalenten im Straßengüterverkehr bis zum Jahr 2020 entwickeln könnten. Außerdem zeigt es das Ergebnis anhand von jeweils vier Diagrammen an, die die Resultate vertiefen und veranschaulichen sollen. Bei den einzugebenden Parametern handelt es sich um:

- **Durchschnittliche jährliche Zunahme der Nutzfahrzeuge bis 2020** (Anmerkung: über die Jahre 1998 bis 2008 stieg die Anzahl der LKWs um durchschnittlich 1,62%.)
- **Konventionelle Effizienzverbesserungen für Nutzfahrzeuge unter 3,5 Tonnen:** Damit sind Verbrauchseinsparungen aufgrund von aerodynamischen Verbesserungen und anderer Effizienz-steigernder Maßnahmen gemeint (siehe Kapitel 3.4) und betreffen somit alle LKWs, unabhängig welchen Antriebs oder welchen Kraftstoffs.
- **Konventionelle Effizienzverbesserungen für Nutzfahrzeuge über 3,5 Tonnen**
- **Zusätzliche Emissionseinsparungen bis 2020** für Hybrid-, CNG- und Alternativflüssigkraftstoff- betriebene LKWs, jeweils für leichte und schwere Nutzfahrzeuge.
- **Marktdurchdringungsraten im Jahr 2020** für Hybrid-, CNG- und Alternativflüssigkraftstoff- betriebener LKWs, jeweils für leichte und schwere Nutzfahrzeuge.

6.1.6 Emissionshochrechnung des Excel-Programms:

Auf den folgenden Seiten wird präsentiert, wie das Excel-Programm bei der Errechnung der Ergebnisse der Szenarien methodisch vorgeht.

Voreingestellte Parameter:

Für die Berechnung der Emissionen im Jahr 2020 sind neben den Benutzerdaten auch die Ist-Daten des Jahres 2008 nötig, welche dem Kapitel 2 entnommen sind. Weiters sind manche Parameter voreingestellt. Dabei handelt es sich um:

$E_{08} = 7.201.900t$	Nutzfahrzeugemissionen im Jahr 2008 in Tonnen CO ₂ -Äquivalente
$\alpha = 7$	Schwerlastemissionsfaktor: Schwere Nfzge. (>3,5t) emittieren je Zeiteinheit durchschnittlich α -mal so viele THG wie leichte (<3,5t)
$F_{08} = 362.990$	Gesamter Nfzg.-Bestand im Jahr 2008
$F_{08,l} = 307.287$	Nfzg.-Bestand leicht (<3,5t) im Jahr 2008
$F_{08,s} = F_{08} - F_{08,l} = 55.703$	Nfzg.-Bestand schwer (>3,5t) im Jahr 2008.

Einzustellende Parameter:

Die folgenden Parameter werden vom Benutzer eingegeben und sind für das Ergebnis der Hochrechnung maßgeblich.

s	jährliche Steigerungsrate der Anzahl von Nfzgen.
e_l	Emissionseinsparungen zwischen 2008 und 2020 aufgrund konventioneller Effizienzsteigerungen bei leichten Nfzgen.
e_s	Emissionseinsparungen zwischen 2008 und 2020 aufgrund konventioneller Effizienzsteigerungen bei schweren Nfzgen.

Der Anteil der jeweiligen Antriebskategorie am Bestand der jeweiligen Nfzg.-Klassen im Jahr 2020 kennzeichnet den Markterfolg:

$m_{20,l,hyb}$	leichtes Hybrid-Nfzg.
$m_{20,s,hyb}$	schweres Hybrid-Nfzg.
$m_{20,l,cng}$	leichtes CNG-Nfzg.
$m_{20,s,cng}$	schweres CNG-Nfzg.
$m_{20,l,afk}$	leichtes Nfzg. mit alternativem, flüssigem Kraftstoff
$m_{20,s,afk}$	schweres Nfzg. mit alternativem, flüssigem Kraftstoff
$m_{20,l,kon} = 1 - m_{20,l,hyb} - m_{20,l,cng} - m_{20,l,afk}$	leichtes, konventionelles Nfzg.
$m_{20,s,kon} = 1 - m_{20,s,hyb} - m_{20,s,cng} - m_{20,s,afk}$	schweres, konventionelles Nfzg.

Zusätzliche Emissionseinsparungen zwischen 2008 und 2020 im Vergleich zu konventionellen Nutzfahrzeugen werden anhand folgender Parameter berücksichtigt:

$c_{l,hyb}$	für leichte Hybrid-Nfzge.
$c_{s,hyb}$	für schwere Hybrid-Nfzge.
$c_{l,cng}$	für leichte CNG-Nfzge.
$c_{s,cng}$	für schwere CNG-Nfzge.
$c_{l,afk}$	für leichte Nfzge. mit alternativem, flüssigem Kraftstoff
$c_{s,afk}$	für schwere Nfzge. mit alternativem, flüssigem Kraftstoff

In der Übersicht der Tab. 6.1, die jeweils bei den einzelnen Szenarien und Vergleichen gezeigt wird, sind die Parameter (hier mit Nullen ausgefüllt) erkennbar. Mit diesen Werten wird die Hochrechnung durchgeführt.

Szenario X						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$c_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		s	0,0000
$c_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0000
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0000
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		

Tab. 6.1: Übersicht über die Einstellparameter zur Berechnung der einzelnen Emissionsszenarien, hier unausgefüllt; Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung

Berechnung:

Der Zweck dieser Emissionsrechnung ist es, den Anstieg der Nutzfahrzeug-THG-Emissionen vom definierten Startpunkt im Jahr 2008 bis ins Jahr 2020 hochzurechnen. Dazu muss folgende Gleichung ausgewertet werden:

$$(Gl. 6.1.) \quad E_{20}(m_{20,i,j}, c_{i,j}, e_i, s) = E_{08} * f(m_{20,i,j}, c_{i,j}, e_i, s)$$

Die Fahrzeugbestände entwickeln sich mit der jährlichen Steigerungsrate s von 2008 bis 2020 gemäß folgenden Gleichungen:

$$(Gl. 6.2.) \quad F_{20,l}(s) = F_{08,l} * (1 + s)^{12}$$

$$(Gl. 6.3.) \quad F_{20,s}(s) = F_{08,s} * (1 + s)^{12}$$

$$(Gl. 6.4.) \quad F_{20}(s) = F_{20,l}(s) + F_{20,s}(s) = F_{08} * (1 + s)^{12}$$

Im Jahr 2008 wurde vereinfacht angenommen, dass keine alternativen Antriebe und Kraftstoffe eingesetzt werden. Im Jahr 2020 stellen sich die Nutzfahrzeugbestände der einzelnen Fahrzeugklassen unter Einbeziehung der jeweiligen, vom Benutzer deklarierten Marktdurchdringungsraten wie in Glgen. 6.5 und 6.6 dar. Der Index „j“ steht für die Nutzfahrzeugklassen, im Einzelnen für

- j=kon für konventionelle Nfzge.,
 j=cng für CNG-Nfzge.,
 j=hyb für hybrid-elektrische Nfzge. und
 j=afk für Alternativ-Flüssigkraftstoff – betriebene Nfzge.

$$(Gl. 6.5.) \quad F_{20,l,j}(m_{20,l,j}, s) = F_{20,l}(s) * m_{20,l,j}$$

$$(Gl. 6.6.) \quad F_{20,s,j}(m_{20,s,j}, s) = F_{20,s}(s) * m_{20,s,j}$$

Um die THG-Emissionen in von leichten Nutzfahrzeugen und in von schweren Nutzfahrzeugen Verursachte einteilen zu können, ist es notwendig, die zwei Faktoren α_l und α_s zu definieren, die im Folgenden bei der Gewichtung der Emissionen benötigt werden. Hierzu wurde im Vorfeld der Schwerlast-emissionsfaktor α deklariert. Die zwei benötigten Faktoren errechnen sich zu:

$$(Gl. 6.7.) \quad \alpha_l = \frac{1}{\frac{F_{08,l}}{F_{08}} + \frac{F_{08,s}}{F_{08}} * \alpha}$$

bzw.

$$(Gl. 6.8.) \quad \alpha_s = \frac{1}{\frac{F_{08,l}}{\alpha * F_{08}} + \frac{F_{08,s}}{F_{08}}}$$

Mit $\alpha = 7$ wird

$$\alpha_l = 0,5206$$

und

$$\alpha_s = 3,6444.$$

Die durchschnittlichen Emissionen je Fahrzeug im Jahr 2008 ε kann man damit für leichte und schwere Nutzfahrzeuge errechnen:

$$(Gl. 6.9.) \quad \varepsilon_{08,l} = \frac{E_{08}}{F_{08}} * \alpha_l$$

und

$$(Gl. 6.10.) \quad \varepsilon_{08,s} = \frac{E_{08}}{F_{08}} * \alpha_s.$$

Somit ergibt sich für die Emissionen der einzelnen Fahrzeugklassen im Jahr 2020:

$$(Gl. 6.11.) \quad E_{20,l,j}(m_{20,l,j}, c_{l,j}, e_l, s) = \varepsilon_{08,l} * (1 - e_l - c_{l,j}) * F_{20,l,j}(m_{20,l,j}, s),$$

$$(Gl. 6.12.) \quad E_{20,s,j}(m_{20,s,j}, c_{s,j}, e_s, s) = \varepsilon_{08,s} * (1 - e_s - c_{s,j}) * F_{20,s,j}(m_{20,s,j}, s),$$

wobei definitionsgemäß $c_{i,kon} = 0$.

Damit ergibt sich für die gesamten Emissionen im Jahr 2020 der gesuchte Zusammenhang in (Gl. 6.1.):

$$(Gl. 6.1.) \quad E_{20}(m_{20,i,j}, c_{i,j}, e_i, s) = E_{08} * f(m_{20,i,j}, c_{i,j}, e_i, s)$$

Die Funktion $f(m_{20,i,j}, c_{i,j}, e_i, s)$ hängt nur von den einzelnen Marktdurchdringungsraten, THG-Einsparraten der einzelnen Antriebsarten, Effizienzsteigerungsraten und der jährlichen LKW-Steigerungsrate ab, also von all den Eingabeparametern in Tab. 6.1. Sie errechnet sich zu:

$$(Gl. 6.13.) \quad E_{20}(m_{20,i,j}, c_{i,j}, e_i, s) = E_{08} * \frac{(1+s)^{12}}{F_{08}} * \sum_i \left\{ \alpha_i * F_{08,i} * \sum_j [m_{20,i,j} * (1 - e_i - c_{i,j})] \right\}.$$

Die Differenz ergibt den gewünschten Vergleichswert in Tonnen CO₂-Äquivalenten, deren Ergebnis in absoluten und relativen Werten wie folgt berechnet werden kann:

$$(Gl. 6.14.) \quad \Delta E_{abs} = E_{08} - E_{20},$$

$$(Gl. 6.15.) \quad \Delta E_{rel} = \left(\frac{E_{20}}{E_{08}} - 1 \right).$$

6.2 Nr. 1: Business as Usual

6.2.1 Annahmen

Dieses Szenario stellt ein Referenz-Szenario dar: Bis zum Jahr 2020 setzen sich keine alternativen Antriebe und Kraftstoffe entscheidend durch. Alternative Kraftstoffe werden zu dieser Zeit nicht mehr eingesetzt als bis ins Jahr 2008 im Rahmen der Beimengung. Die Zahl der LKWs steigt wie in den letzten zehn Jahren um jährlich durchschnittlich 1,62%. Die konventionellen Effizienzsteigerungsmaßnahmen fallen unwesentlich aus und resultieren in allgemeinen Emissionseinsparungen bei leichten und schweren Nutzfahrzeugen von 5%. Die folgende Tabelle ist dem Excelprogramm entnommen und zeigt die vom Benutzer einzustellenden Parameter rötlich unterlegt.

Annahmen:			
Durchschnittliche jährliche Zunahme an LKWs in %	1,62%		
Konventionelle THG-Emissionseinsparungen für LKWs <3,5t	5,00%		
Konventionelle THG-Emissionseinsparungen für LKWs >3,5t	5,00%		
	Hybrid	CNG	altern. flüssige Kraftstoffe
Zusätzliche THG-Emissionseinsparungen für LKWs <3,5t	0,00%	0,00%	0,00%
Zusätzliche THG-Emissionseinsparungen für LKWs >3,5t	0,00%	0,00%	0,00%
Marktdurchdringung 2020 für LKWs <3,5t	0,00%	0,00%	0,00%
Marktdurchdringung 2020 für LKWs >3,5t	0,00%	0,00%	0,00%
THG-Emissionen 2008	7.201.900	t CO2 Äqu.	
THG-Emissionen 2020	8.296.998	t CO2 Äqu.	
Einsparung absolut	-1.095.098	t CO2 Äqu.	
Einsparung relativ	-15,21	%	

Tab. 6.2: Auszug aus dem Excelprogramm mit den einzustellenden Parametern, Szenario 1; Quelle: eigene Berechnung

In folgender Tabelle erkennt man die Parameter noch einmal im Detail:

Szenario 1: Business as Usual						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		s	0,0162
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		

Tab. 6.3: Einstellparameter für die Berechnung des Business-as-Usual-Szenarios;
Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung

6.2.2 Ergebnis

Die Tab. 6.2 zeigt: Es können trotz allgemeiner Effizienzverbesserungen die gesamten THG-Emissionen nicht reduziert werden. Absolut ist mit einem Anstieg von über einer Million Tonnen CO₂-Äquivalenten zu rechnen, relativ also um mehr als 15%. Abb. 6.1 veranschaulicht das Ergebnis anhand von vier Diagrammen. Sollten sich also keine alternativen Antriebssysteme durchsetzen und der LKW-Verkehr weiter wie bisher ansteigen, werden auch die LKW-Treibhausgas-Emissionen bis ins Jahr 2020 beträchtlich steigen und zwar im Bereich leichter und schwerer Nutzfahrzeuge im gleichen Maße.

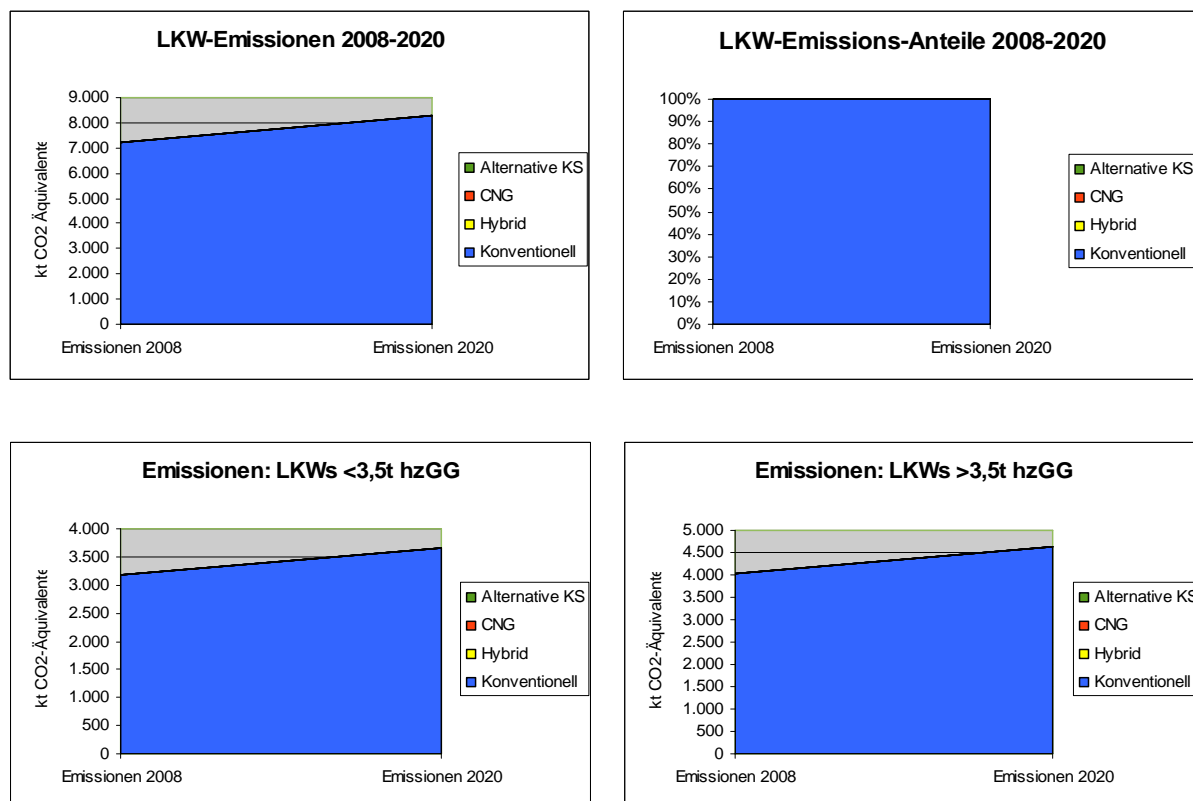


Abb. 6.1: Ergebnisse der Berechnung für Szenario 1:

oben links: absolute LKW-Emissionen von 2008 bis 2020 aufgeschlüsselt nach Antriebsart,

oben rechts: relative LKW-Emissionen von 2008 bis 2020 aufgeschlüsselt nach Antriebsart,

unten links: absolute Emissionen für LKWs unter 3,5t hzGG von 2008 bis 2020,

unten rechts: absolute Emissionen für LKWs über 3,5t hzGG von 2008 bis 2020;

Quelle: eigene Berechnung

6.2.3 Interpretation

Das Business-as-Usual (BaU) -Szenario könnte am ehesten dann Realität werden, wenn der Rohölpreis langfristig aufgrund hoher Explorationsraten auf niedrigem Niveau bleibt und kein Engpass konventioneller Treibstoffe erwartet wird. Die ökologischen Bedenken treten in den Hintergrund und die Debatte über Umweltbelastung und Klimawandel findet kaum in der Öffentlichkeit statt. Die Forschung und Entwicklung in Richtung alternativer Antriebe und Kraftstoffe wird aufgrund dieser fehlenden Anreize und dem fehlenden öffentlichen und politischen Druck nicht weiter intensiviert und subventioniert. Da eine steigende Transportleistung mit wachsender Wirtschaftsleistung korrespondiert, befindet sich die Wirtschaft in diesem Szenario bis 2020 in permanent gutem Zustand.

6.3 Nr.2: Ökologisches Szenario

6.3.1 Annahmen

Folgende Annahmen sollen ein Szenario bewusst hoch gewählter Akzeptanz alternativer Antriebe und Kraftstoffe bei gleich bleibender Anzahl an Nutzfahrzeugen bis 2020 darstellen. Gemeinsam mit dem BaU-Szenario, das den entgegengesetzten Extremwert repräsentiert, legt es die Bandbreite bei der Entwicklung der Nutzfahrzeug-THG-Emissionen fest:

- Die Zahl der LKWs steigt bis ins Jahr 2020 nicht.
- Nach GRÜNWALD R. (2006) in [Q 215] sind bis 2020 noch viele konventionelle Effizienzsteigerungsmaßnahmen für Nutzfahrzeuge möglich: Er spricht dabei von „nichtmotorischen Verbesserungen des Antriebsstrangs“. So sind mittels stufenlosen Getriebes (CVT), mit welchem das Übersetzungsverhältnis beliebig und stufenlos verstellt werden kann, noch 8% bei leichten und 5% bei schweren Nutzfahrzeugen an THG-Emissionseinsparungen möglich. Weiters sollen Optimierungen des Einsatzes von Nebenverbrauchern (z.B. Klimaanlage) und Startergenerator zusätzlich Fortschritte bringen. Zusammen mit Reduktionen des Fahrbahn- und Luftwiderstandes und Fortschritten in der Leichtbauweise ergeben sich große THG-Einsparpotenziale im konventionellen Bereich. Laut VOLVO in [Q 216] sind 1% Kraftstoffersparnis pro Jahr in diesem Bereich ein erstrebenswertes Ziel. Für dieses Szenario werden daher in Summe relativ hohe Einsparungen angenommen, bei leichten und schweren Nutzfahrzeugen jeweils 12% zwischen 2008 und 2020.
- Im Segment leichter Nutzfahrzeuge und Transporter sind im Jahr 2020 25% des Bestands hybrid-elektrisch betrieben, 20% benutzen als Kraftstoff CNG und 5% rein alternative, flüssige Kraftstoffe. Die Prozentsätze der jeweiligen THG-Emissionseinsparungen nach Antriebsart sind gemäß Kapitel 4 und 5 als hoch, aber erreichbar einzuschätzen.
- Schwere Nutzfahrzeuge repräsentieren hauptsächlich Fernverkehrsnutzfahrzeuge. In diesem Marktsegment greifen generell hauptsächlich konventionelle Maßnahmen und es wird von einer wesentlich geringeren Anzahl von Alternativfahrzeugen ausgegangen: 5% für Hybrid, 5% für CNG und 2,5% benutzen rein alternative flüssige Kraftstoffe.

Die Tab. 6.4 zeigt die Einstellungen im Überblick:

Annahmen:			
Durchschnittliche jährliche Zunahme an LKWs in %	0,00%		
Konventionelle THG-Emissionseinsparungen für LKWs <3,5t	12,00%		
Konventionelle THG-Emissionseinsparungen für LKWs >3,5t	12,00%		
	Hybrid	CNG	altern. flüssige Kraftstoffe
Zusätzliche THG-Emissionseinsparungen für LKWs <3,5t	20,00%	25,00%	5,00%
Zusätzliche THG-Emissionseinsparungen für LKWs >3,5t	5,00%	25,00%	5,00%
Marktdurchdringung 2020 für LKWs <3,5t	25,00%	20,00%	5,00%
Marktdurchdringung 2020 für LKWs >3,5t	5,00%	5,00%	2,50%
THG-Emissionen 2008	7.201.900	t CO2 Äqu.	
THG-Emissionen 2020	5.946.870	t CO2 Äqu.	
Einsparung absolut	1.255.030	t CO2 Äqu.	
Einsparung relativ	17,43	%	

Tab. 6.4: Auszug aus dem Excelprogramm mit den einzustellenden Parametern, Szenario 2; Quelle: eigene Berechnung

Szenario 2: Ökologisch						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,200	0,250	0,050		s	0,0000
$C_{s,j}$	0,050	0,250	0,050		e _l	0,1200
$m_{20,l,j}$	0,250	0,200	0,050	0,500	e _s	0,1200
$m_{20,s,j}$	0,050	0,050	0,025	0,875		

Tab. 6.5: Einstellparameter für die Berechnung des „ökologischen Szenarios“; Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung

6.3.2 Ergebnis

Das Szenario 2 kommt zu dem Ergebnis, dass mit den getätigten Annahmen etwa 1,25 Millionen Tonnen oder 17,4% CO₂-Äquivalente eingespart werden könnten. Bei kleineren Lkws, die hierbei eher den Stadtverkehr repräsentieren, ist der alternative Anteil viel größer als bei den größeren (siehe Abb. 6.2 unten). Mit den getroffenen Annahmen gibt es 2020 im Segment leichter Nutzfahrzeuge annähernd gleich viele alternativ betriebene wie konventionelle. Doch emittieren die ersteren in Summe etwa ein Viertel weniger als die letzteren.

Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass die Annahmen als Idealfall anzusehen sind und mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht erreicht werden können. Es ist über die Jahre mit einem weiteren Anstieg der LKW-Zahl zu rechnen und es ist nicht davon auszugehen, dass sich die alternativen Antriebe so rasch durchsetzen werden können.

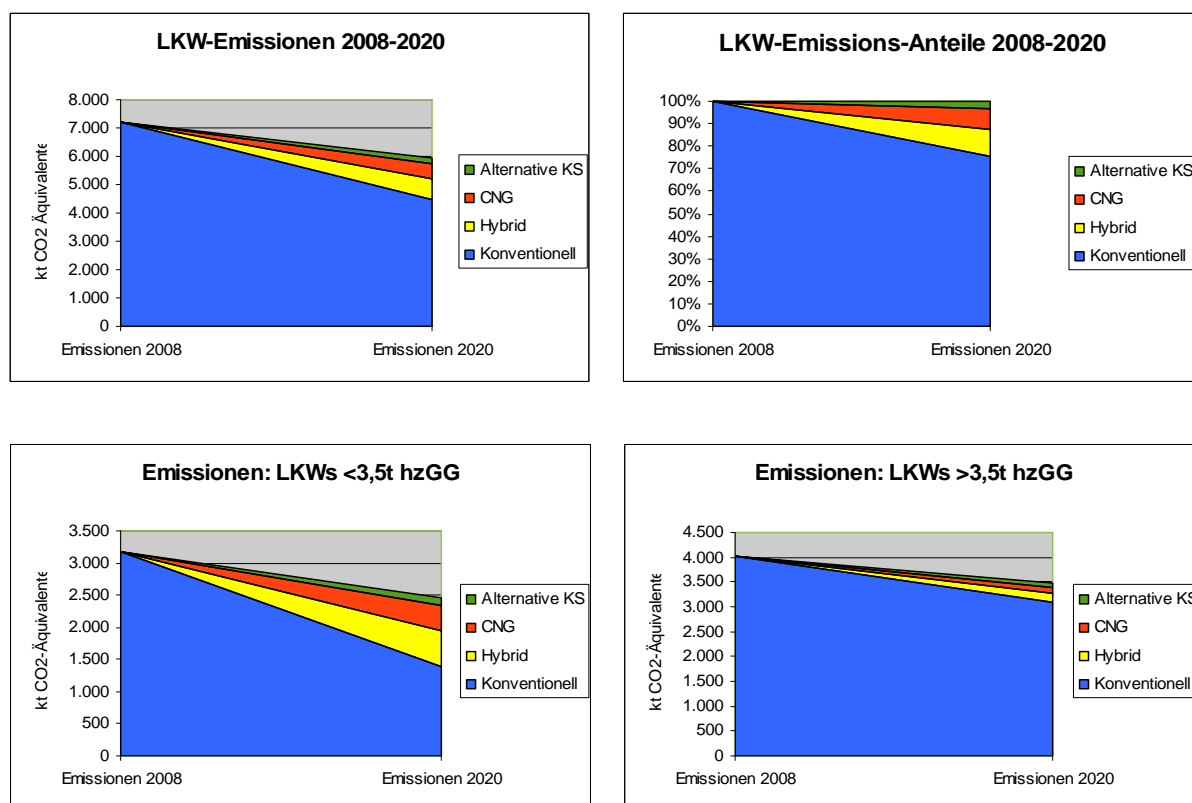


Abb. 6.2: Ergebnisse der Berechnung für Szenario 2:

- oben links: absolute LKW-Emissionen von 2008 bis 2020 aufgeschlüsselt nach Antriebsart,
 - oben rechts: relative LKW-Emissionen von 2008 bis 2020 aufgeschlüsselt nach Antriebsart,
 - unten links: absolute Emissionen für LKWs unter 3,5t hzGG von 2008 bis 2020,
 - unten rechts: absolute Emissionen für LKWs über 3,5t hzGG von 2008 bis 2020;
- Quelle: eigene Berechnung

6.3.3 Interpretation

Ein derartiges Szenario könnte eintreten, wenn der Rohölpreis stark steigt und bis 2020 hoch bleibt. Die Forschung und Entwicklung in alternative Antriebe und Kraftstoffe wird wegen der hohen Energiekosten vorangetrieben und Erfolge stellen sich primär im Bereich leichter Nutzfahrzeuge in Form von großen Treibstoffeinsparungen ein. Für die konstante Anzahl an Lkws gibt es mehrere Erklärungsmodelle:

Eine pessimistische Variante ist: Ein hoher Rohölpreis und somit ein hoher Energiepreis wirken dämpfend auf die wirtschaftliche Entwicklung. Demgemäß steigen das Maß der Transportleistung und die Zahl der Nutzfahrzeuge nicht.

Eine weitere Erklärung für diese Konstanz könnte aus optimistischer Sicht eine Verlagerung des Gütertransports auf die Schiene und/oder intelligenteres Verkehrs- und Logistikmanagement sein.

6.4 Nr. 3: Versuch einer realistischen Abschätzung

6.4.1 Annahmen

In den Szenarien 1 und 2 wurde anhand bewusst extremer Annahmen eine Bandbreite definiert, innerhalb der sich die THG-Emissionen bis ins Jahr 2020 entwickeln könnten. Grob umrissen liegt der Spielraum also innerhalb eines Anstiegs um 1,1 Mio. Tonnen und einer Reduktion von 1,25 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten.

Das nun folgende Szenario geht von weniger hohen Substitutionsraten aus. Die Zahl der LKWs steigt, wenn auch mit 1,3% pro Jahr nicht ganz so stark wie in jüngster Vergangenheit und im BaU-Szenario. Es wird der konventionelle, technologische Fortschritt bei leichten und schweren Nutzfahrzeugen so angesetzt, dass er zwischen den beiden extremen Szenarien 1 und 2 zu liegen kommt. Auch die zusätzlichen Einsparungen bei den einzelnen alternativen Antriebssystemen wurden auf realistischere Durchschnittswerte nivelliert. Weiters wird von einem weitaus weniger großen Markterfolg für Alternativantriebe bis zum Jahr 2020 ausgegangen als im Szenario 2, der aber mit rund einem Viertel bei leichten Nutzfahrzeugen und Transportern immer noch beträchtlich ausfällt. Bei schweren und Langstrecken-Nutzfahrzeugen wird mit wenig Verdrängung der konventionellen Antriebe gerechnet.

Annahmen:			
Durchschnittliche jährliche Zunahme an LKWs in %	1,30%		
Konventionelle THG-Emissionseinsparungen für LKWs <3,5t	9,50%		
Konventionelle THG-Emissionseinsparungen für LKWs >3,5t	9,50%		
	Hybrid	CNG	altern. flüssige Kraftstoffe
Zusätzliche THG-Emissionseinsparungen für LKWs <3,5t	15,00%	20,00%	2,00%
Zusätzliche THG-Emissionseinsparungen für LKWs >3,5t	3,00%	20,00%	3,00%
Marktdurchdringung 2020 für LKWs <3,5t	12,50%	10,00%	3,00%
Marktdurchdringung 2020 für LKWs >3,5t	2,00%	2,00%	2,00%
THG-Emissionen 2008	7.201.900	t CO ₂ Äqu.	
THG-Emissionen 2020	7.440.127	t CO ₂ Äqu.	
Einsparung absolut	-238.228	t CO ₂ Äqu.	
Einsparung relativ	-3,31	%	

Tab. 6.6: Auszug aus dem Excelprogramm mit den einzustellenden Parametern, Szenario 3; Quelle: eigene Berechnung

Szenario 3: Realistische Abschätzung						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,150	0,200	0,020		s	0,0130
$C_{s,j}$	0,030	0,200	0,030		e_l	0,0950
$m_{20,l,j}$	0,125	0,100	0,030	0,745	e_s	0,0950
$m_{20,s,j}$	0,020	0,020	0,020	0,940		

Tab. 6.7: Einstellparameter für die Berechnung des „realistischen Szenarios“;
Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung

6.4.2 Ergebnis

Mit diesen realistischeren Einschätzungen kommt man zu dem Ergebnis, dass absolute Emissionseinsparungen bis 2020 ein Wunschtraum bleiben werden. Es muss eher danach getrachtet werden, den zu erwartenden Anstieg möglichst klein zu halten. In diesem Szenario steigen trotz der Einsparungsmaßnahmen die Treibhausgasemissionen um etwa 238.000 Tonnen CO₂-Äquivalente oder um über 3%. Alternative Antriebskonzepte werden vor allem bei kleineren Lkws im Kurzstreckenverkehr eingesetzt.

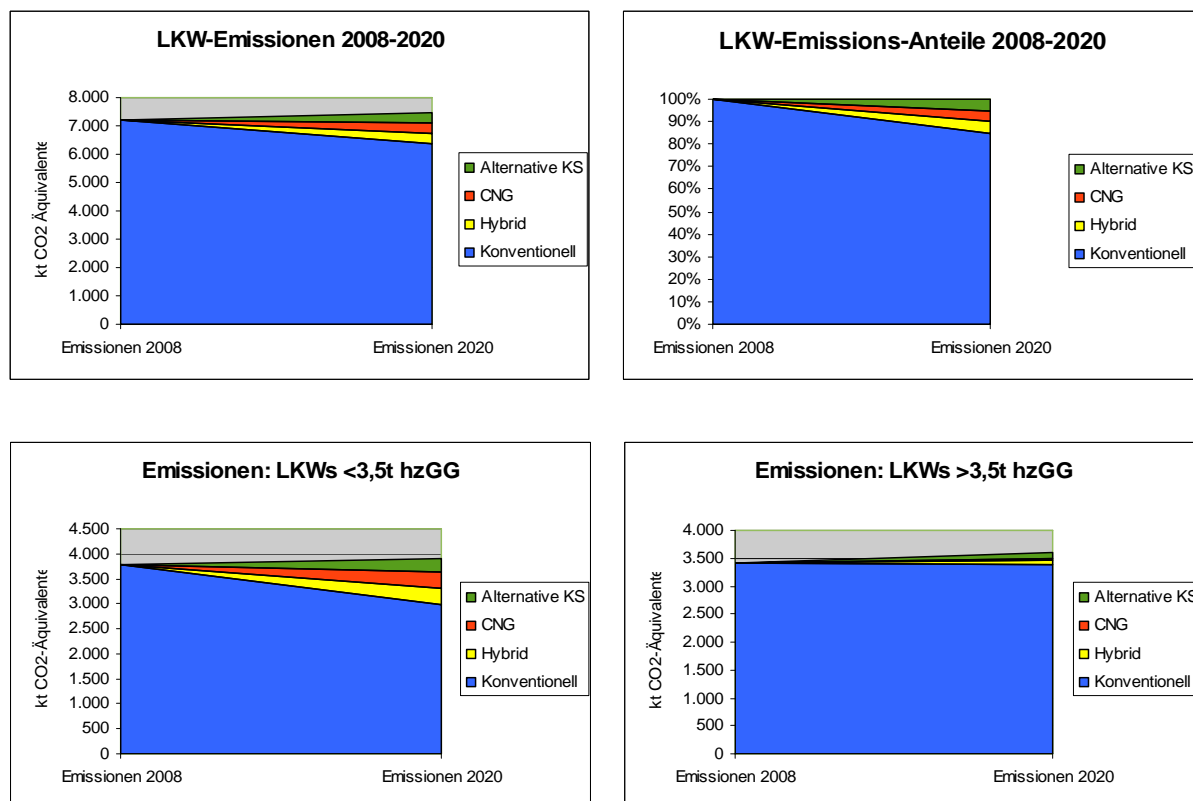


Abb. 6.3: Ergebnisse der Berechnung für Szenario 3:

oben links: absolute LKW-Emissionen von 2008 bis 2020 aufgeschlüsselt nach Antriebsart,

oben rechts: relative LKW-Emissionen von 2008 bis 2020 aufgeschlüsselt nach Antriebsart,

unten links: absolute Emissionen für LKWs unter 3,5t hzGG von 2008 bis 2020,

unten rechts: absolute Emissionen für LKWs über 3,5t hzGG von 2008 bis 2020;

Quelle: eigene Berechnung

6.4.3 Interpretation

Das „realistische Szenario“ stellt aus heutiger Sicht eine durchaus mögliche Entwicklung bis 2020 dar. Es wird durch den geringeren Anstieg der Nutzfahrzeug-Zahl ein Anstieg des Rohölpreises impliziert, der aber nicht so stark ausfällt wie im vorherigen Fall. Dadurch wird wirtschaftlich bis 2020 ein durchwachsendes Bild projiziert, welches sich durch die aktuellen Ereignisse im Jahr 2009 (Stichwort „Wirtschaftskrise“) zu bewahrheiten scheint. Von einer permanenten Krise kann aber in diesem Szenario nicht die Rede sein.

Die Forschung und Entwicklung ist mit den konventionellen Emissionseinsparungsraten auf einem guten Weg, die Anstrengungen und Investitionen könnten aber durchaus weiter intensiviert werden.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit des weniger starken Anstiegs der Lkw-Zahl könnte wiederum damit assoziiert werden, dass erste Erfolge bei der Verlagerung des Gütertransports auf die Schiene erreicht werden.

6.5 Vergleich der drei Szenarien

Den bisher diskutierten Szenarien liegen stark differierende Annahmen zugrunde und sie lieferten demgemäß stark unterschiedliche Ergebnisse. Die ursprünglichen Einstellparameter werden in der folgenden Übersicht noch einmal präsentiert:

Szenario 1: Business as Usual						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		
Szenario 2: Ökologisch						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,200	0,250	0,050		S	0,0000
$C_{s,j}$	0,050	0,250	0,050		e_l	0,1200
$m_{20,l,j}$	0,250	0,200	0,050	0,500	e_s	0,1200
$m_{20,s,j}$	0,050	0,050	0,025	0,875		
Szenario 3: Realistische Abschätzung						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,150	0,200	0,020		S	0,0130
$C_{s,j}$	0,030	0,200	0,030		e_l	0,0950
$m_{20,l,j}$	0,125	0,100	0,030	0,745	e_s	0,0950
$m_{20,s,j}$	0,020	0,020	0,020	0,940		

Tab. 6.8: Übersicht über alle Einstellparameter der einzelnen Szenarien;
Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung

In den Abb. 6.4 und Abb. 6.5 sind die Resultate der Hochrechnung in Diagrammform übersichtlich gegenübergestellt.

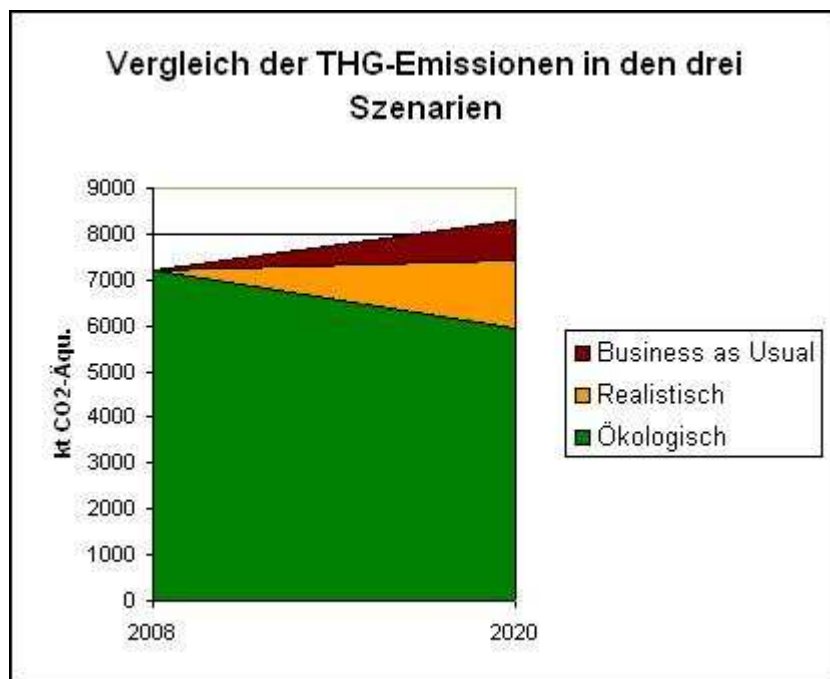


Abb. 6.4: Vergleich der drei Szenarien-Hochrechnungsergebnisse;
Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

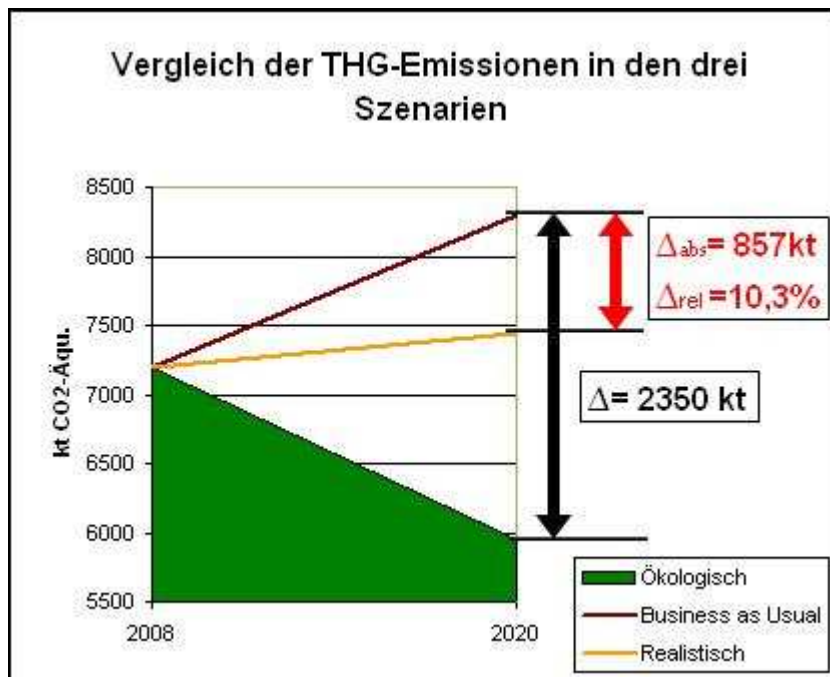


Abb. 6.5: Vergleich der Szenarienhochrechnungen inkl. Differenzen;
Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Das Business-As-Usual-Szenario (dunkelrot in Abb. 6.4 und Abb. 6.5) spannte zusammen mit dem Szenario einer hohen Substitutionsrate (grün in Abb. 6.4 und Abb. 6.5) eine 2.350 kt CO₂-Äquivalente „breite“ THG-Emissionsbandbreite auf. Sie sollten unter Tötigung geeigneter Annahmen die Extremwerte für die Emissionen im Jahr 2020 definieren. Das BaU-Szenario geht von einer Steigerung der THG-Emissionen um 1.100 kt auf knapp 8.350 kt CO₂-Äquivalente aus und das Szenario hoher Substitution von einer Verringerung um 1.250 kt auf knapp 6.000 kt CO₂-Äquivalente.

Geht man davon aus, dass es unrealistisch ist, die Einsparungen des „ökologischen Szenarios“ bis 2020 zu erreichen, so ist zu erwarten, dass eine realistische Abschätzung innerhalb dieser Bandbreite zu liegen kommt. Für die Zukunft ist es von Bedeutung, einen möglichst großen Teil dieser 2.350 kt-Bandbreite auszuschöpfen. Die Abschätzungen aus Szenario 3 mit reduziertem Anstieg der Nutzfahrzeugzahl führen zu einer Einsparung von etwa 857 kt oder 10,3% relativ. Es kann also ca. 36% der Bandbreite ausgeschöpft werden.

Das heißt: Durch den Einsatz von alternativen Antrieben in einem realistischen, dem Szenario 3 entsprechenden Umfang, zusammen mit einer Reduktion der LKW-Zahl und gesteigerten konventionellen Effizienzverbesserungen können bis 2020 nach der oben beschriebenen Berechnungsmethode 857 kt CO₂-Äquivalente oder 10,3% relativ eingespart werden.

6.6 Weiterführende Vergleiche

Ein berechtigter Einwand gegen den in Kapitel 6.5 geführten Vergleich ist, dass in all den behandelten Szenarien von unterschiedlichen Voraussetzungen ausgegangen wird. Das Business-as-Usual-Szenario geht von einem höheren jährlichen Anstieg der Nutzfahrzeugszahl aus als die anderen zwei Szenarien. Außerdem liegen den Szenarien unterschiedliche konventionelle Effizienzsteigerungswerte zu Grunde. Um die Auswirkungen der anderen Effekte rauszurechnen und somit die reinen Einsparungen eines spezifischen Effektes zu erhalten, werden weitere Vergleiche anhand des Excelprogramms durchgeführt.

6.6.1 Effekt alternativer Antriebe und Kraftstoffe

In diesem Punkt soll dargestellt werden, in welchem Umfang die Einsparungen im Rahmen des realistischen Szenarios (857 kt) rein auf die alternativen Antriebe und Kraftstoffe zurückzuführen ist. Dazu werden in Folgendem die Parameter der konventionellen Effizienzsteigerung und der Lkw-Steigerungsraten für die restlichen Szenarien den Werten des BaU-Szenarios gleichgesetzt. Die Einstellparameter sind also gemäß Tab. 6.9:

Szenario 1: Business as Usual						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		
Szenario 2: Ökologisch						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,200	0,250	0,050		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,050	0,250	0,050		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,250	0,200	0,050	0,500	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,050	0,050	0,025	0,875		
Szenario 3: Realistische Abschätzung						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,150	0,200	0,020		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,030	0,200	0,030		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,125	0,100	0,030	0,745	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,020	0,020	0,020	0,940		

Tab. 6.9: Einstellparameter der einzelnen Szenarien zum Zwecke der Berechnung der Effekte alternativer Antriebe und Kraftstoffe; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Aus diesen Einstellungen resultiert folgendes Ergebnis in Abb. 6.6:

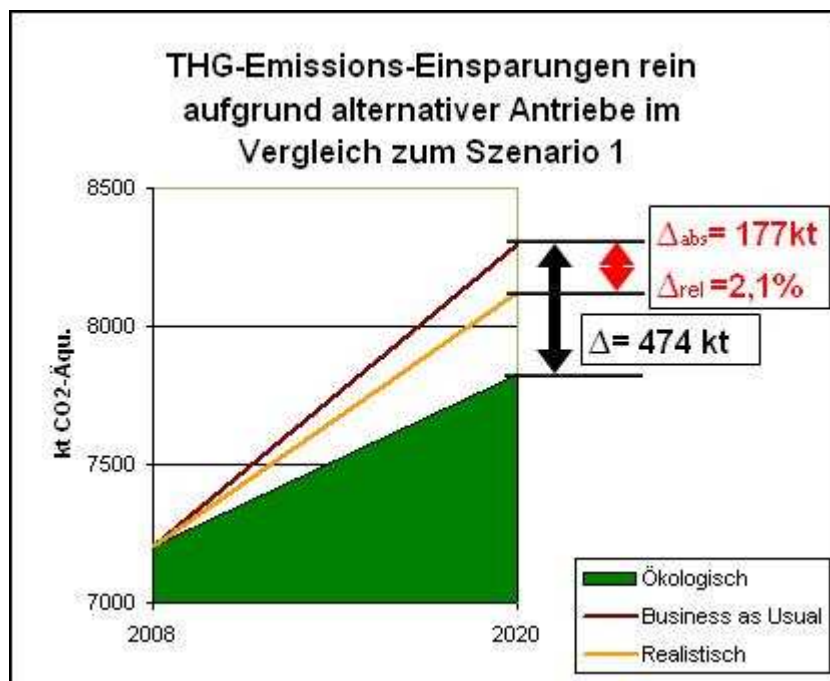


Abb. 6.6: Effekte alternativer Antriebe und Kraftstoffe;
Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Es zeigt sich: Im realistischen Szenario sind nur 177 der 857 kt CO₂-Äquivalente (oder 20,7%) der Einsparungen auf alternative Konzepte zurückzuführen. Im Vergleich zu BaU-Szenario können rein aufgrund der alternativen Antriebe und Kraftstoffe etwa 2,1% der THG-Emissionen eingespart werden.

Besser sieht die Situation im „ökologischen Szenario“ mit den hohen Substitutionsraten aus. Hier können auf diese Weise etwa 474 kt bzw. 5,7% eingespart werden.

6.6.2 Effekt steigender Nutzfahrzeugzahlen

Um zu zeigen, wie stark sich ein Anstieg der LKW-Anzahl auf die THG-Emissionen auswirkt, werden nun nach dem selben Prinzip die Effekte konventioneller THG-Emissionseinsparungen und der alternativen Antriebe und Kraftstoffe rausgerechnet. Die Einstellparameter für die jährliche Zunahme an Nutzfahrzeugen in den einzelnen Szenarien sind wie folgt:

Szenario 1: Business as Usual						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		
Szenario 2: Ökologisch						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0000
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		
Szenario 3: Realistische Abschätzung						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0130
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		

Abb. 6.7: Einstellparameter der einzelnen Szenarien zum Zwecke der Berechnung der Effekte des Anstiegs der Nfzg.-Zahl; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Abb. 6.8 zeigt die Ergebnisse:

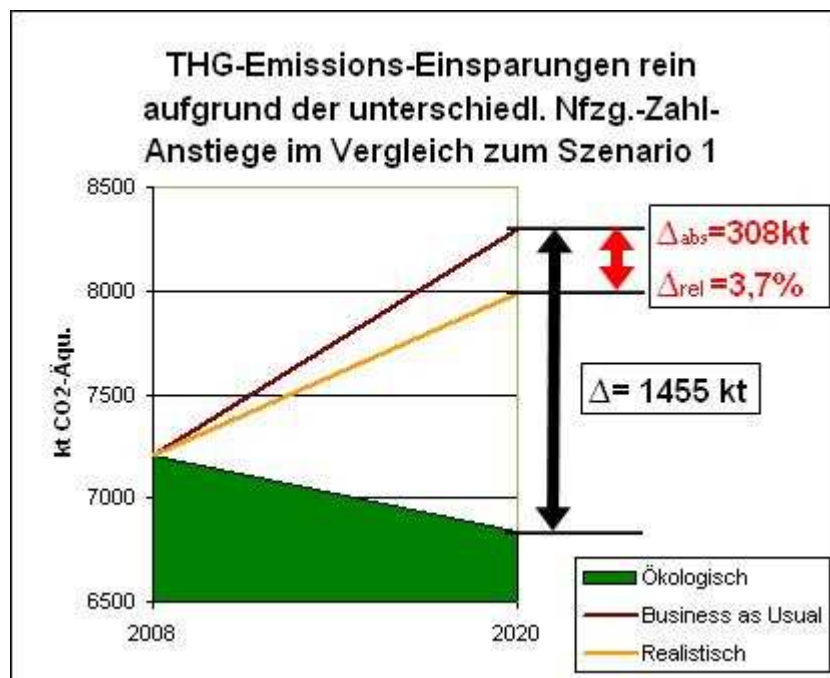


Abb. 6.8: Effekte unterschiedlich steigender Nfzg.-Zahlen;
Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Mit der Annahme der leicht reduzierten LKW-Steigerungsrate von 1,3% pro Jahr können im realistischen Szenario also 308 kt absolut und 3,7% THG-Emissionen relativ eingespart werden, also bedeutend mehr als mit alternativen Antriebskonzepten.

Noch vorteilhafter ist definitionsgemäß das Szenario der hohen Substitutionsraten. Hier können mit einem nicht stattfindenden Anstieg der Nutzfahrzeugzahl im Vergleich zum BaU-Szenario 1455 kt CO₂-Äquivalente oder 17,5% eingespart werden.

6.6.3 Effekt konventioneller Effizienzsteigerungsmaßnahmen

In diesem Unterpunkt wird untersucht, wie sich allein die konventionellen Effizienzsteigerungsmaßnahmen auf die THG-Emissionen der einzelnen Szenarien auswirken. Die restlichen Einstellparameter werden wieder dem BaU-Szenario gleichgesetzt. Die Werte für die konventionellen Effizienzsteigerungsmaßnahmen von Nutzfahrzeugen bis 2020 in den einzelnen Szenarien sind wie folgt:

Szenario 1: Business as Usual						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,0500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,0500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		
Szenario 2: Ökologisch						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,1200
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,1200
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		
Szenario 3: Realistische Abschätzung						
	j=hyb	j=cng	j=afk	j=kon		
$C_{l,j}$	0,000	0,000	0,000		S	0,0162
$C_{s,j}$	0,000	0,000	0,000		e_l	0,9500
$m_{20,l,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000	e_s	0,9500
$m_{20,s,j}$	0,000	0,000	0,000	1,000		

Tab. 6.10: Einstellparameter der einzelnen Szenarien zum Zwecke der Berechnung der Effekte konv. Effizienzsteigerungen; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Als Ergebnis liefert Abb. 6.9:

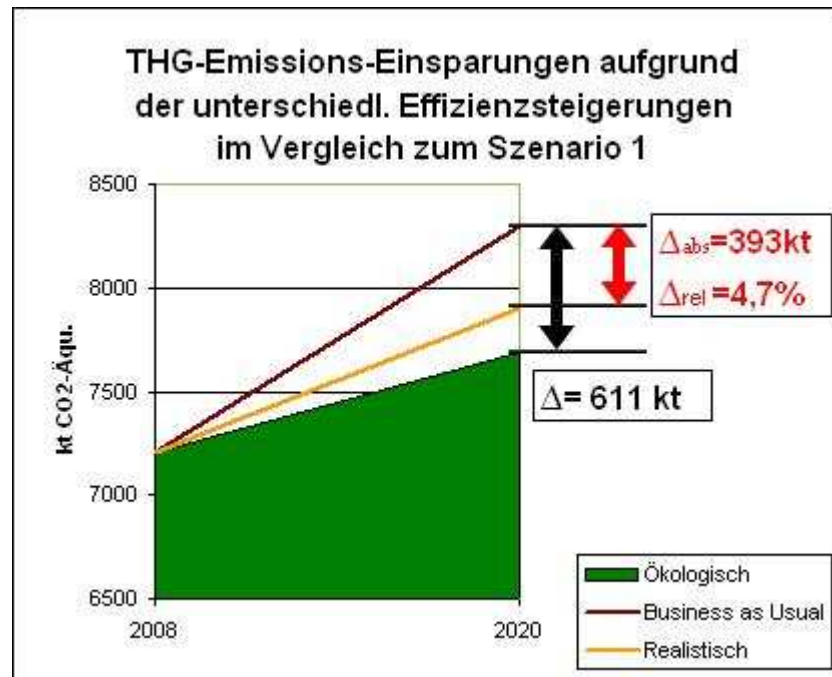


Abb. 6.9: Effekte unterschiedlicher Effizienzsteigerungen;
Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

Es sind im realistischen Szenario Einsparungen von 393 kt CO₂-Äquivalente oder 4,7% zu erreichen und somit erneut mehr als mit alternativen Antriebskonzepten. Im „ökologischen Szenario“ sind es aufgrund noch höherer Effizienzsteigerungen 611 kt.

6.7 Fazit

Die Erkenntnisse obiger Berechnungen lassen sich wie in Abb. 6.10 folgendermaßen zusammenfassen:

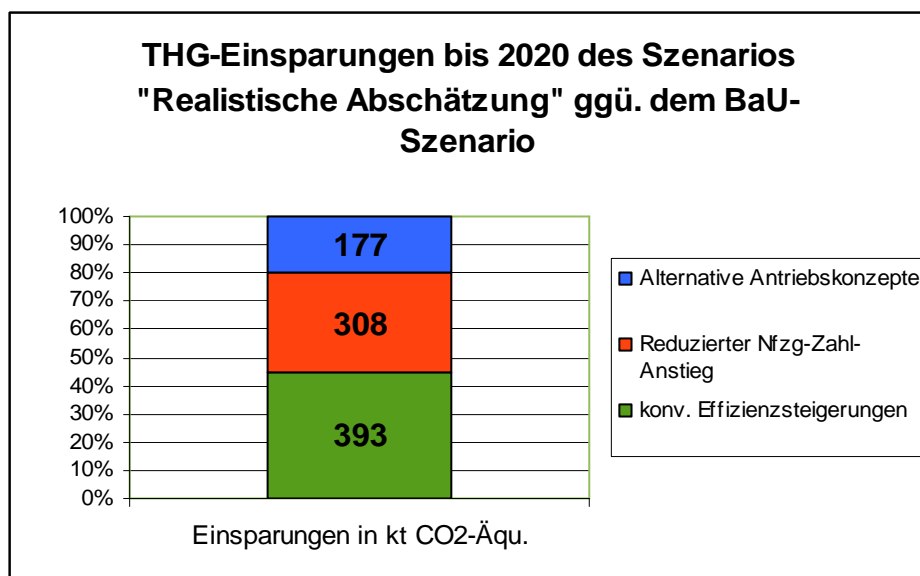


Abb. 6.10: THG-Einsparungen der „realistischen Szenarios“ ggü. dem BaU-Szenario bis 2020;
Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung

THG-Emissionseinsparungen können im Straßengüterverkehr auf vielerlei Weise erzielt werden. Betrachtet wurden in diesem Fall die alternativen Antriebskonzepte, eine Reduktion der Nutzfahrzeugzahl und konventionelle Effizienzsteigerungen.

Bei den betrachteten Szenarien scheint die Substitution des Verbrennungsmotors durch alternative Antriebe oder der konventionellen durch alternative Kraftstoffe im Vergleich noch die wenigsten Einsparungen zu erbringen. Mit 177 kt liegen diese Einsparungen mit Abstand hinter denen, die durch eine Reduzierung des Nutzfahrzeug-Anstiegs (308 kt) und durch konventionelle Effizienzverbesserungen (393 kt) erzielt werden können.¹

Die möglichen Einsparungen bis 2020 aufgrund alternativer Antriebe und Kraftstoffe sind also relativ gering. Das heißt nicht, dass Anstrengungen in diese Richtung nicht zielführend sind. Denn mit weiteren technologischen Fortschritten und Kostensenkungen ist vor allem langfristig das Substitutionspotenzial riesig.

¹ Bei genauer Betrachtung der Zahlen erkennt man, dass die Summe der einzelnen Einsparungsanteile nicht die in Punkt 6.5 errechnete THG-Gesamteinsparung von 857 kt CO₂-Äquivalenten ergibt. Dies liegt daran, dass die einzelnen Parameter voneinander abhängen. An den Größenordnungen und den daraus abgeleiteten Schlüssen ändert sich dadurch aber nichts.

Bis ins Jahr 2020 aber lassen sich Rückschlüsse in die Richtung ziehen, dass eine umfassende THG-Emissions-Reduktion im Straßengüterverkehr oder zumindest eine Einschränkung des Anstiegs vor allem Fortschritte im Bereich konventioneller Effizienzsteigerungen und Erfolge in der Vermeidung zusätzlicher geleisteter Straßentransporte erfordert. Ohne diese Maßnahmen werden im betrachteten Zeithorizont auch alternative Antriebe und Kraftstoffe den Emissionsanstieg kaum bremsen können.

Vor allem die Tatsache, dass eine geringere Nutzfahrzeuganzahl und damit korrespondierend weniger Transportleistung auf den Straßen, viel einfacher und schneller hohe THG-Einsparungen erzielen können, spricht dafür, rasch Maßnahmen zur Vermeidung und zur Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene zu ergreifen.

7. Schlussfolgerungen

Nach der Abhandlung aller vorangegangenen Kapitel wird als Abschluss dieser Arbeit der Erkenntnisgewinn noch einmal zusammenfassend angeführt.

7.1 Die Ausgangssituation

Die Situationsanalyse im österreichischen Straßengüterverkehr hat ergeben, dass alternative Antriebssysteme in der Praxis noch beinahe bedeutungslos sind. Eigentlich gäbe es ja keinen Anlass, um nach alternativen Antrieben zu forschen. Der Dieselantrieb hat eine über hundertjährige Entwicklungsoptimierung hinter sich – mit großartigen Effizienzsteigerungen. Außerdem ist Diesel ein bequemer, hochenergetischer, flüssiger Kraftstoff, der überall auf der Welt verfügbar ist.

Die Anzahl der Nutzfahrzeuge und die Transportleistung steigen aber kontinuierlich an. Man kann auch in Zukunft bei stabiler Wirtschaftslage von einem weiteren Anstieg ausgehen. Zugleich sind über die letzten Jahre stark zunehmende LKW-bedingte Treibhausgasemissionen zu verzeichnen. Da sich aber Österreich wie die westlichen Industrienationen zu Emissionsreduktionen bekennen und die Erdölressourcen der Welt auf lange Sicht zur Neige gehen, ist Handlungsbedarf gegeben.

Grundsätzlich kann man mehrere Wege mit jeweils beträchtlichem Potenzial zur Schonung der Erdölressourcen und THG-Emissionsreduktion beschreiten. Die wichtigsten drei davon sind:

- Steigerung der Transporteffizienz ohne grundsätzliche Veränderung des Antriebssystems
- Einschränkung des Zuwachses der Transportleistung
- Alternative Lösungswege hinsichtlich Kraftstoffe und Antriebssysteme

Um aber große Fortschritte zu erreichen, ist es unerlässlich, alle Punkte konsequent zu verwirklichen. Auf dem Weg in eine Zukunft ohne fossile Kraftstoffe, sind noch viele Probleme zu lösen. Bis dorthin gibt es aber nicht *eine* Lösung für den Straßengüterverkehr. Im Gegenteil, es wird eine **Diversifikation** stattfinden. Die Gebrauchsart wird die jeweilige Technik bestimmen, die zum Einsatz kommt.

7.2 Einzelne Antriebskonzepte

Eines steht fest: Die **konventionellen Antriebe** werden nicht von heute auf morgen verschwinden, sondern noch lange die Hauptantriebsquelle sein. Vor allem im Fernverkehr ist keine Alternative in Sicht. Auch in alternativen Antriebssystemen spielen Dieselmotoren weiterhin eine wichtige Rolle (Stichwort: Hybridantrieb). Das Einsparungspotenzial ist aber auch bei konventionellen Antrieben groß und es gilt, dieses so gut wie möglich auszuschöpfen. Beispiele für allgemeine Kraftstoff schonende Maßnahmen sind die Reduzierung der Reifenrollwiderstände, aerodynamische Konzepte, Gewichtseinsparungen, stufenlose Getriebe usw.

Nichts schont die Umwelt in diesem Zusammenhang aber mehr als jede nicht stattgefundene Fahrt. Insofern macht eine Verringerung der Anzahl von Leerfahrten durch intelligente Lösungen im Bereich der Logistik und Verkehrsführung Sinn.

Das U.S. Department for Energy rechnet mit derlei Maßnahmen langfristig mit erreichbaren zusätzlichen Energieintensitätssenkung von bis zu 40 Prozent.

Dennoch haben alternative Antriebssysteme auch in näherer Zukunft gute Chancen auf Verwirklichung, und zwar im Bereich des Nahverkehrs. Speziell im Verteilverkehr und Stadtverkehr, den zwei Hauptbetätigungsfeldern des Werkverkehrs. Diese Bereiche bergen ebenfalls ein großes Potenzial, denn die meisten Fahrten gehen über nur kurze Distanzen.

Es stellt sich heraus, dass in Nahverkehrssegment hybrid-elektrische und CNG-betriebene Nutzfahrzeuge am meisten Aussicht auf Erfolg haben.

Gegen **batteriebetriebene Nutzfahrzeuge** spricht vor allem die fehlende technologische Reife der Akkumulatoren. Die Energiedichten und infolgedessen die Reichweiten sind nicht hoch genug und der Preis der Fahrzeuge nicht konkurrenzfähig. Nichtsdestotrotz gibt es ermutigende Fortschritte bei der Batterietechnik. Lithium-Ionen- und Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren sind zumindest schon derart ausgereift, dass sie für hybrid-elektrische Nutzfahrzeuge, welche mit kleineren Batteriesystemen auskommen, tauglich sind.

Alternative, flüssige Kraftstoffe wie **Biodiesel und Ethanol** können für eine sinnvolle Entlastung der Erdölreserven sorgen und werden dies auch in eingeschränktem Maße als Nischentreibstoff oder als Beimengung zu konventionellem Treibstoff tun. Eine langfristige, alleinige Dauerlösung stellen sie aber nicht dar. Für die „Biotreibstoffe“ sprechen die hohe Energiedichte und die einfache Handhabung aufgrund der flüssigen Form. Es ist nicht notwendig, eine eigene kostenintensive Infrastruktur zu errichten. Allerdings sind der ökologische Nutzen und ein allfälliger Treibhausgas-Emissionsvorteil sehr umstritten. Auch der Kosteneinspareffekt hält sich in Grenzen, ohne Mineralölsteuerbefreiung wären die Treibstoffpreise gar nicht konkurrenzfähig.

Zwar ist die Treibstoff-Handhabe komplizierter und die Reichweite geringer, dennoch sind die kurz- und mittelfristigen Aussichten für **CNG-Nutzfahrzeuge** durchaus positiv. Im Stadt-, Verteil- und öffentlichen Personennahverkehr fallen diese Nachteile weniger stark ins Gewicht und werden von Schadstoff- und Geräuschvorteilen teilweise wettgemacht. CNG ist sofort und noch für lange Zeit verfügbar und muss nicht erst angebaut werden. In Ballungsgebieten und auf Autobahnen ist die Versorgungssicherheit schon jetzt gewährleistet. Außerdem amortisieren sich in der Regel die Mehrkosten bei der Anschaffung durch den preiswerten (ebenfalls von der Mineralölsteuer begünstigten) CNG-Kraftstoff nach einiger Zeit. Bei der direkten Verbrennung kann CNG mit großen Kohlendioxid-Einsparungen im Vergleich zu Diesel aufwarten. Doch auch hier wird der Nutzeffekt durch energieintensive Förderung, Transport und Speicherung zumindest teilweise im negativen Sinn kompensiert.

Ein weiterer, mittelfristig vielleicht der größte Hoffnungsträger im Stadt-, Verteil- und Werkverkehr (sprich: Nahverkehr) ist das **hybrid-elektrische Nutzfahrzeug**. Es bedient sich mindestens zweier verschiedener Antriebssysteme und betreibt diese mit einer intelligenten Betriebsstrategie derart, dass deren spezifischen Vorteile ausgenutzt und die Nachteile vermieden werden. Somit können mit hybrid-elektrischen Antrieben Effizienzsteigerungen erreicht werden, die aus heutiger Sicht mit einer beharrlichen Weiterentwicklung der konventionellen Technik nicht erreicht werden können. Bis zu 25% an Kraftstoffeinsparungen im Stadtbetrieb sind schon erreicht worden. Sollte in Hinkunft lokal emissionsfreier Betrieb nötig sein, so ist man mit hybrid-elektrischen Nutzfahrzeugen auch dafür gerüstet. Durch den höheren Komponentenaufwand (man denke an die Batterie) ist aber mit Mehrkosten von bis zu einem Drittel und mehr im Vergleich zu vergleichbaren Dieselmodellen zu rechnen.

Abb. 7.1 zeigt als Überblick eine grobe THG-Emissions- und Kostenanalyse samt Vor- und Nachteilen für die Antriebssysteme „CNG“, „Hybrid-elektrisch“ und „Batterie-elektrisch“. Der Vergleichbarkeit sind hier aber enge Grenzen gesetzt, da die Emissionen und Kosten je nach Einsatzgebiet und Gewichtsklasse stark divergieren. Daher wird in dieser Gegenüberstellung von der für alternative Antriebskonzepte zukunftsträchtigsten Nutzfahrzeugklasse mit einem hzGG von unter 3,5t im Stadt- und Verteilverkehr ausgegangen. In anderen Bereichen käme man zu gänzlich davon abweichenden Ergebnissen. Z.B. amortisieren sich hybrid-elektrische Fahrzeuge ohne den Stop-and-Go-Betrieb im Stadt- oder Verteilverkehr – wenn überhaupt – erst viel später als in Abb. 7.1 angedeutet.

	konventionell	CNG	Hybrid-elektrisch	Batterie-elektrisch
direkte THG-Emissionen in CO ₂ -Äquivalenten	100%	bis -20%	bis -25%	-100%
Anschaffungskosten	100%	bis +25%	bis +30% u. mehr	>>
Kraftstoffkosten bei 25.000 km/a	100%	-20% bis -40%	bis -25%	k.A.
Amortisation in Jahren	-	2 4 6 8 10+ >>	2 4 6 8 10+ >>	2 4 6 8 10+ >>
Vorteile		+ Emissionen + MÖSt-Befreiung + Geräuscharmheit	+ emissionsloses Fahren über kurze Distanzen + geräuscharmer Betrieb + Anfahrmoment	+ keine lok. Emissionen + geräuschloser Betrieb + Anfahrmoment
Nachteile		- Nutzlastverlust - Raumverlust - Infrastruktur - Reichweite	- Nutzlastverlust - Komplexität d. Antriebs	- Unwirtschaftlichkeit - großer Nutzlastverlust - kompliziertes und zeitaufwändiges Laden - Raumverlust - Reichweite - Infrastruktur
Perspektiven bis 2020	bleibt dominant	Marktpotenzial vorhanden	Marktpotenzial vorhanden	kaum Marktpotenzial (nur in Nischen)

Abb. 7.1: Ökonomische und ökologische Gegenüberstellung alternativer Antriebsysteme für Nutzfahrzeuge unter 3,5t hzGG und einer Jahreskilometerleistung von 25.000km im Stadtverkehr;
Quelle: eigene Recherche, eigene Darstellung

Eine Umfrage unter Experten auf der IAA Nutzfahrzeuge in Hannover bestätigt diese Ausführungen. Für den Nahverkehr rechnen fast drei Viertel aller Befragten mit einem Marktanteil von mindestens 15% für Hybridfahrzeuge im Jahr 2030. Bei CNG sind immerhin noch fast 60% dieser Ansicht. [Q 213]

7.3 Treibhausgas-Emissionen

Der Einsatz von alternativen Antrieben hat natürlich **Auswirkungen auf die LKW-Emissionen**. Im Rahmen eines einfachen Modells wurden die direkten Emissionen im Sinne einer Tank-to-Wheel-Analyse berechnet. Mit einem Business-as-Usual-Szenario und einem möglichst „ökologischen Szenario“ mit hohen Substitutionsraten wurde versucht, die Emissions-Bandbreite für Österreich zu definieren. Das Ergebnis legt nahe, dass kaum mit einer Emissionseinsparung bis ins Jahr 2020 zu rechnen ist. Eher muss danach getrachtet werden, den Anstieg bestmöglich einzudämmen.

Wegweisend ist auch die aus dem Kapitel 6.7 erzielte Erkenntnis, dass mit Einschränkungen des Anstiegs der Nutzfahrzeugzahl und mit konventionellen Effizienzsteigerungsmaßnahmen viel schneller und einfacher größere Summen an Treibhausgasemissionen eingespart werden können. Bis 2020 sind die Einspareffekte durch alternative Antriebe und Kraftstoffe bestenfalls im einstelligen unteren Prozentbereich anzusiedeln. Nur wenn die Nutzfahrzeug-Zahl und die durchschnittliche Transport-Effizienz in geringem Maße steigen, kann es zu einem absoluten Rückgang bei den direkten Emissionen kommen. Trotzdem ist es wichtig, dass weiter an diesen Konzepten gearbeitet wird, denn das wahre Einsparpotenzial liegt wohl erst weiter in der Zukunft.

Trotz alledem muss natürlich die Sinnhaftigkeit einer Tank-to-Wheel-Analyse hinterfragt werden. Eine derartige Analyse berücksichtigt nämlich nur die direkten Emissionen, die bei der Fahrt anfallen. Sie klammert also diejenigen aus, die bei Produktion, Transport und allfälliger Kompression oder Düngung des alternativen Kraftstoffs anfallen. Zusätzliche Komponenten bei Hybridantrieben z.B. erfordern energieintensive Produktionsketten, deren Schadstoffausstoß ebenfalls nicht eingerechnet ist. Diese Tatsache sollte man bei der Betrachtung solcher Analysen immer beachten.

Abschließend lässt sich behaupten, dass alternative Antriebe im Straßengüterverkehr zurzeit noch alles andere als problemlos sind und sie daher nicht mit dem Dieselmotor konkurrieren können. Man bedenke aber, dass Dieselmotoren einen Entwicklungsvorsprung von etwa hundert Jahren haben.

Für den Zeitraum nach 2020 kündigt sich eine potenziell umwelttechnisch einwandfreie Lösung in Form der Wasserstoff-Brennstoffzelle an. Schließlich lässt sich Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser herstellen, wofür im Optimalfall Strom aus regenerativen Energiequellen benutzt wird. Diese Lösung ist jedoch im betrachteten Zeithorizont speziell für den Güterverkehr noch unpraktikabel und technisch unausgereift und wurde daher außen vor gelassen.

Man erkennt: Auch wenn die THG-Einspareffekte noch nicht überzeugend und die Forschung alternativer Antriebssysteme noch intensiviert werden sollte, muss man der Entwicklung noch Zeit geben. Schlussendlich ist davon auszugehen, dass man langfristig nicht an ihnen umhin kommen wird.

Quellenverzeichnis

- Q 1 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Emissionstrends 1990-2003. Internet:
<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/DP120.pdf>, S.88f, Zugriff: 15.
August 2009, 12:00 MEZ
- Q 2 PACHTA-REYHOFEN, GEORG: Chancen alternativer Antriebssysteme für das Nutzfahrzeug. In:
Jubiläumskolloquium Kraftfahrzeugantriebe 25. Juni 2004. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004,
S.113-136
- Q 3 ABERLE, G.: Transportwirtschaft. 3. Auflage, Ouldenbourg Verlag, München, 2000, S.86
- Q 4 ABERLE, G.: Transportwirtschaft. 3. Auflage, Ouldenbourg Verlag, München, 2000, S.84ff.
- Q 5 VOIGT, F.: Verkehr und Industrialisierung. In: Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft.
109. Band, 1953, S.198ff.
- Q 6 ABERLE, G.: Transportwirtschaft. 3. Auflage, Ouldenbourg Verlag, München, 2000, S.88
- Q 7 BAUM, H.: Straßengüterverkehr. In: Bloech, J./Ihde, G.(Hg.): Vahlens Großes Logistik Lexikon.
München, 1997, S.1021
- Q 8 GÜTERBEFÖRDERUNGSGESETZ 1995. Bundesgesetzblatt Nr. 593, §1(1)
- Q 9 FALLER, P.: Seminarbericht WS 97: Situationsanalyse des Straßengüterverkehrs in Österreich.
Wien, 1998, S.8f
- Q 10 WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (Hg.): Verkehr in Zahlen 1994. Wien, 1994, S.46
- Q 11 GÜTERBEFÖRDERUNGSGESETZ 1995. Bundesgesetzblatt Nr. 593, §10(1)
- Q 12 ACIKGÖZ, S.: Die Entwicklung des Straßengüterverkehrs in Österreich nach 1945. Dipl.Arb.,
Wien, 2008, S.38f.
- Q 13 VOIGT, F.: Der Verkehr, Theorie der Verkehrswirtschaft. 1. Band, Berlin, 1973, S.35f.
- Q 14 GÜTERBEFÖRDERUNGSGESETZ 1995. Bundesgesetzblatt Nr. 593, §3(3)
- Q 15 GÜTERBEFÖRDERUNGSGESETZ 1995. Bundesgesetzblatt Nr. 593, §3(5)
- Q 16 HERRY, M.: Güterverkehr in Österreich 1991. Wien, 1992, S.8
- Q 17 BUNDESANSTALT STATISTIK ÖSTERREICH: Email-Korrespondenz mit Frau Gerda Fischer am 1.
April 2009, 12:20 MEZ
- Q 18 WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (Hg.): Die österreichische Verkehrswirtschaft – Jahresbericht
2007, 2008, S.32
- Q 19 ABERLE, G.: Transportwirtschaft, 3. Auflage, Ouldenbourg Verlag, München, 2000, S.25
- Q 20 BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie) (Hg.): Verkehr in
Zahlen – Ausgabe 2007. Wien, 2007, S.115
- Q 21 BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie) (Hg.): Verkehr in
Zahlen – Ausgabe 2007. Wien, 2007, S.138
- Q 22 WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (Hg.): Die österreichische Verkehrswirtschaft – Jahresbericht
2007. 2008, S.56-62
- Q 23 FALLER, P.: Seminarbericht WS 97: Situationsanalyse des Straßengüterverkehrs in Österreich.
Wien, 1998, S.12

- Q 24 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Emissionstrends 1990-2003. Wien, 2005
- Q 25 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Emissionstrends 1990-2003. Wien, 2005, S.18
- Q 26 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Emissionstrends 1990-2003. Wien, 2005, S.17
- Q 27 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Emissionstrends 1990-2003. Wien, 2005, S.19
- Q 28 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Emissionstrends 1990-2003. Wien, 2005, S.20
- Q 29 Aktuelle Treibstoffpreise in Europa. Stand 1. Mai 2009. Internet:
http://www.reisen-tcs.ch/etc/medialib/travel/reiseinfos/pdf/Par.0013.File.tmp/EUR_essence.pdf, Zugriff am 1. Mai 2009, 17:37 MEZ
- Q 30 LEBENS MINISTERIUM (Hg.): Abschätzung der Auswirkungen des Tanktourismus auf den Treibstoffverbrauch und die Entwicklung der CO₂-Emissionen in Österreich. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2005
- Q 31 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S.263
- Q 32 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S.264
- Q 33 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S.265f.
- Q 34 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S.266
- Q 35 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S.266f.
- Q 36 UNIVERSITÄT MÜNCHEN (Hg.): Vergleich Ottomotor – Dieselmotor. Internet:
http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph09/umwelt_technik/08vergleich_o_d/vergleich_o_d.htm, Zugriff am 15. Mai 2009, 15:43 MEZ
- Q 37 BRAUN, HERIBERT ET AL: LKW – Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. 9. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2006, S. 218
- Q 38 BRAUN, HERIBERT ET AL: LKW – Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. 9. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2006, S. 218-221
- Q 39 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004
- Q 40 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S. 358
- Q 41 BRAUN, HERIBERT ET AL: LKW – Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. 9. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2006, S. 227
- Q 42 BRAUN, HERIBERT ET AL: LKW – Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. 9. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2006, S. 225
- Q 43 BRAUN, HERIBERT ET AL: LKW – Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. 9. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2006, S. 452-456
- Q 44 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S. 375-378
- Q 45 LEBENS MINISTERIUM (Hg.): Schwefelgehalt von Benzin und Diesel. Internet:
<http://presse.lebensministerium.at/article/articleview/23561/1/6663/>, Zugriff am 17. Mai 2009, 12:48 MEZ
- Q 46 BRAUN, HERIBERT ET AL: LKW – Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. 9. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2006, S. 453
- Q 47 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S. 299-302
- Q 48 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S. 301
- Q 49 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S. 306-308

- Q 50 WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (Hg.): EU-Emissionsgrenzwerte für Dieselmotoren. Internet: <http://wko.at/bsv/EURO-Klassen-Tabelle.pdf>, Zugriff am 18. Mai 2009, 18:48 MEZ
- Q 51 INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (Hg.): Energy Technology Perspectives 2008. 2008, S.423-470
- Q 52 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 3. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2004, S.63f.
- Q 53 BUNDESAMT DES DEUTSCHEN GROS- UND AUßENHANDELS (Hg.): 60-Tonnen-Super-LKWs schonen Umwelt und Straße. Internet: <http://www.euro-combi.de/dwl/60-Tonnen-LKW.pdf>, Zugriff: 15. August 2009, 12:00 MEZ
- Q 54 VCÖ, VERKEHRSClub ÖSTERREICH (Hg.): Verkehr 2020 – Ziele und Entwicklungen. LVDM, Wien, 2008, S.41f
- Q 55 MEGAFORM LKW ZUBEHÖR: Internet: <http://www.megaform-eu.de/galerie-container-spoiler.php>, Zugriff am 7. April 2009, 22:11 MEZ
- Q 56 INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (Hg.): Energy Technology Perspectives 2008. 2008, S.454
- Q 57 FRIEDRICH EBERT STIFTUNG: Ökonomische und politische Konzepte für eine Verkehrsvermeidung. Internet: <http://library.fes.de/fulltext/fo-wirtschaft/00338002.htm>, Zugriff am 16. April 2009, 12:47 MEZ
- Q 58 PULS THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S. 8-9
- Q 59 KALTSCHMITT, MARTIN ET AL: Potenziale biogener Kraftstoffe in Deutschland. In: ZfE – Zeitschrift für Energiewirtschaft. 27.Jg., Nr. 3, S 235-243
- Q 60 STAN, CORNEL: Alternative Antriebe für Automobile. Springer Verlag, Berlin, 2005, S.208
- Q 61 DIESENREITER, FRIEDRICH: Diplomarbeit: Biotreibstoffanlagen: Investitionskosten, Kostenstrukturen und Entwicklungspotentiale im Vergleich. Wien, 2008, S.28ff.
- Q 62 Bildquelle: Internet: <http://www.rapspellets.de/files/rapsbluete.jpg>, Zugriff: 14. August 2009, 12:20 Uhr MEZ
- Q 63 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 4. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2006, S.382
- Q 64 STAN, CORNEL: Alternative Antriebe für Automobile. Springer Verlag, Berlin, 2005, S.208f.
- Q 65 LEBENS MINISTERIUM (Hg.): Biokraftstoffe aktuell – Zahlen und Fakten. Internet: <http://www.lebensministerium.at/article/articleview/66083/1/1467/>, Zugriff am 23. Mai 2009, 18:13 MEZ
- Q 66 BRAUN, HERIBERT ET AL: LKW – Ein Lehrbuch und Nachschlagewerk. 9. Auflage, Kirschbaum-Verlag, Bonn, 2006, S. 467
- Q 67 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.43-44
- Q 68 GÄRTNER, SVEN ET AL: Erweiterung der Ökobilanz von RME. Heidelberg, 2003, S10f.
- Q 69 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.50
- Q 70 QUIRIN, MARKUS ET AL: CO2-neutrale Wege zukünftiger Mobilität durch Biokraftstoffe. Heidelberg, 2004, A35
- Q 71 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 4. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2006, S.383
- Q 72 KHOSHIDEH, RAMIN: Diplomarbeit: Eine volks- und betriebswirtschaftliche Betrachtung verfügbarer alternativer Kraftstoffe für den Straßengüterverkehr in Österreich. Wien, 2008, S.69

- Q 73 ÖAMTC: Internet:
<http://www.oeamtc.at/sprit/>, Zugriff: 25. Mai 2009, 22:13 MEZ
- Q 74 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.46
- Q 75 HUEMER, ERICH: Biotreibstoff, die Alternative?. In: Blickpunkt LKW & Bus. Ausgabe 5/2007; S.28
- Q 76 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.52
- Q 77 OLHOFF, JÜRGEN: Biodiesel: deutsche und europäische Perspektiven. In: Biodiesel – Potentiale, Umweltwirkungen, Praxiserfahrungen. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 239, S.97-98
- Q 78 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.54
- Q 79 Bildquelle: Internet:
http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ch/16/bio/biodiv/bilder/zuckerruebe_6840a.jpg, Zugriff: 30. Mai 2009 19:38 MEZ
- Q 80 Bildquelle: Internet:
<http://picasaweb.google.com/lh/photo/HruUCG0uGTmh8USa8o0MBw>, Zugriff: 30. Mai 2009 19:35 MEZ
- Q 81 DIESENREITER, FRIEDRICH: Diplomarbeit: Biotreibstoffanlagen: Investitionskosten, Kostenstrukturen und Entwicklungspotentiale im Vergleich. Wien, 2008, S.38f.
- Q 82 ANTRANIKIAN, GARABED: Angewandte Mikrobiologie. Springer Verlag, Berlin, 2006
- Q 83 DIESENREITER, FRIEDRICH: Diplomarbeit: Biotreibstoffanlagen: Investitionskosten, Kostenstrukturen und Entwicklungspotentiale im Vergleich. Wien, 2008, S.37f.
- Q 84 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.54ff.
- Q 85 GEITMANN, SVEN: Alternative Kraftstoffe. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2008, S84f.
- Q 86 BRISTLE, JAN: Diplomarbeit: Die Verwendung von Ethanol als Kraftstoff. Nürtingen, 2008, S.13f.
- Q 87 HAMELICK, C. ET AL: Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. In: Biomass and Energy. Vol 28, 2005
- Q 88 HOEPKE, ERICH: Nutzfahrzeugtechnik. 4. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 2006, S.381f.
- Q 89 SCANIA DEUTSCHLAND: Internet:
www.scania.de
- Q 90 SCHMITZ, NORBERT: Innovationen bei der Bioethanolerzeugung und ihre Auswirkungen auf Energie und Treibhausgasbilanzen. In: Nachwachsende Rohstoffe. Band 26, Münster, 2005
- Q 91 MOBIL OHNE FOSSIL: Emissionen. Internet:
http://www.ethanol-statt-benzin.de/mid367_Emission.html, Zugriff 31. Mai 2009, 14:14 MEZ
- Q 92 ÖAMTC: Bioethanol als Kraftstoff. Internet:
http://www.oeamtc.at/index.php?type=article&id=1130411&menu_active=0380, Zugriff am 31. Mai 2009, 14:52 MEZ
- Q 93 KHOSHIDEH, RAMIN: Diplomarbeit: Eine volks- und betriebswirtschaftliche Betrachtung verfügbarer alternativer Kraftstoffe für den Straßengüterverkehr in Österreich. Wien, 2008, S.96f.

- Q 94 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.59ff.
- Q 95 BRISTLE, JAN: Diplomarbeit: Die Verwendung von Ethanol als Kraftstoff. Nürtingen, 2008, S.27
- Q 96 KHOSHIDEH, RAMIN: Diplomarbeit: Eine volks- und betriebswirtschaftliche Betrachtung verfügbarer alternativer Kraftstoffe für den Straßengüterverkehr in Österreich. Wien, 2008, S.95
- Q 97 BRISTLE, JAN: Diplomarbeit: Die Verwendung von Ethanol als Kraftstoff. Nürtingen, 2008, S.41
- Q 98 SCANIA DEUTSCHLAND: Internet:
www.scania.de, Press Info P08401DE. 2008, S.1, Zugriff: 15. August 2009, 12:00 MEZ
- Q 99 Bildquelle: Internet:
<http://www.flota.v10.pl/galeria/Scania,P270,Ethanol,02,artykul,12182,0,jpg.html>, Zugriff: 1. Juni 2009, 16:45 MEZ
- Q 100 SCANIA DEUTSCHLAND: Internet:
www.scania.de, Press Info P08401DE. 2008, S.1ff., Zugriff: 15. August 2009, 12:00 MEZ
- Q 101 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.60
- Q 102 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.30
- Q 103 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Glöckel, Thomas: Alternativ betriebene Fahrzeuge in Österreich, Eine Bestandsaufnahme. Wien, 1997, S.48f
- Q 104 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.32
- Q 105 Bildquelle: Internet:
http://de.encarta.msn.com/media_461544861_761568077_-1_1/Tetraedrisches_Kugel-Stab-Modell_von_Methan.html, Zugriff: 11. Juni 2008, 16:31 MEZ
- Q 106 GEITMANN, SVEN: Alternative Kraftstoffe. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2008, S.100
- Q 107 GEITMANN, SVEN: Alternative Kraftstoffe. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2008, S.122
- Q 108 GEITMANN, SVEN: Alternative Kraftstoffe. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2008, S.123
- Q 109 MCS INTERNATIONAL GMBH: CNG Behälter – High Tech für Speicherung, Transport und Antrieb. Internet:
http://www.mcs-international-gmbh.de/downloads/mcs_cng01_ger.pdf, Zugriff: 14. Juni 2009, 18:23 MEZ
- Q 110 FGW – FACHVERBAND GAS WÄRME: Internet:
<http://www.erdgasautos.at/technik/>, Zugriff: 14. Juni 2009, 20:12 MEZ
- Q 111 UMWELTBUNDESAMT (Hg.): Glöckel, Thomas: Alternativ betriebene Fahrzeuge in Österreich, Eine Bestandsaufnahme. Wien, 1997, S.50f.
- Q 112 STAN, CORNEL: Alternative Antriebe für Automobile. Springer Verlag, Berlin, 2005, S.172 f.
- Q 113 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge III, Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?. Expert-Verlag, Renningen, 2008, S.52
- Q 114 FGW – FACHVERBAND GAS WÄRME: Internet:
<http://www.erdgasautos.at/technik/589>, Zugriff: 15. Juni 2009, 12:12 MEZ
- Q 115 FGW – FACHVERBAND GAS WÄRME: Internet:
<http://www.erdgasautos.at/tanken/570>, Zugriff: 18. Juni 2009, 16:12 MEZ

- Q 116 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge III, Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?. Expert-Verlag, Renningen, 2008, S.52
- Q 117 FGW – FACHVERBAND GAS WÄRME: Internet:
<http://www.erdgasautos.at/tanken/cngt>, Zugriff: 18. Juni 2009, 16:22 MEZ
- Q 118 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.37f.
- Q 119 FGW – FACHVERBAND GAS WÄRME: Internet:
<http://www.erdgasautos.at/tanken>, Zugriff: 18. Juni 2009, 17:41 MEZ
- Q 120 Bildquelle: Internet:
<http://www.swbw.de/uploads/pics/Gastankstelle.JPG>, Zugriff: 18. Juni 2009, 17:33 MEZ
- Q 121 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge III, Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?. Expert-Verlag, Renningen, 2008, S.3f.
- Q 122 Bildquelle: Internet:
http://www.elektrojournat.at/bilder/d64/MercedesNGT_Betankung.jpg, Zugriff: 18. Juni 2009, 17:59 MEZ
- Q 123 Bildquelle: Internet:
<http://www.vitkoviccylinders.com/products/fleets.php>, Zugriff: 18. Juni 2009, 17:49 MEZ
- Q 124 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.32ff.
- Q 125 GEITMANN, SVEN: Alternative Kraftstoffe. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2008, S.117
- Q 126 KHOSHIDEH, RAMIN: Diplomarbeit: Eine volks- und betriebswirtschaftliche Betrachtung verfügbarer alternativer Kraftstoffe für den Straßengüterverkehr in Österreich. Wien, 2008, S.51
- Q 127 BUNDESSTADT BONN, BONNER RATS-INFORMATIONSSYSTEM: Anwendung von Erdgas bei Nutzfahrzeugen der Stadtverwaltung Bonn. Internet:
http://www2.bonn.de/bo_ris/daten/o/htm/02/0212740ST2.htm, Zugriff: 28. Juni 2009, 19:15 MEZ
- Q 128 ÖAMTC: Internet:
<http://www.oeamtc.at/sprit/>, Zugriff: 28. Juni 2009, 18:13 MEZ
- Q 129 Bildquelle: Internet:
<http://www.erdgas-fahren.de/Fahrzeugkatalog/Transporter/mercedes-sprinter-316-ngt.html>,
Zugriff: 28. Juni 2009, 21:45 MEZ
- Q 130 MERCEDES BENZ ÖSTERREICH: Internet:
http://www2.mercedes-benz.at/content/austria/mpc/mpc_austria_website/de/home_mpc/van/home/new_vans/models/sprinter_906/pickup/technical_data/engines.html,
Zugriff: 28. Juni 2009, 22:38 MEZ
- Q 131 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge III, Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?. Expert-Verlag, Renningen, 2008, S.53
- Q 132 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge III, Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?. Expert-Verlag, Renningen, 2008, S.48ff.
- Q 133 Bildquelle: Internet:
<http://www.lkw-infos.eu/images/themengalerien/sonstige/kommunalfahrzeuge/teil-1/MB-Econic-2628-Pressmuellwagen-3a-Hobo-280204-1.jpg>, Zugriff: 29. Juni 2009, 11:38 MEZ

- Q 134 Bildquelle: Internet:
http://www.motornews.eu/cms/upload/berichte_auto/mercedes/mb_econic_ngt_sattelzug_2.jpg, Zugriff: 29. Juni 2009, 11:38 MEZ
- Q 135 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge III, Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?. Expert-Verlag, Renningen, 2008, S.82-89
- Q 136 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge III, Die Schlüsseltechnologie auf dem Weg zum emissionsfreien Antrieb?. Expert-Verlag, Renningen, 2008, S.86
- Q 137 KHOSHIDEH, RAMIN: Diplomarbeit: Eine volks- und betriebswirtschaftliche Betrachtung verfügbarer alternativer Kraftstoffe für den Straßengüterverkehr in Österreich. Wien, 2008, S.53
- Q 138 MERCEDES BENZ ÖSTERREICH: Internet:
http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/truck/home/new_trucks/showroom_by_model/econic_nav/econic/brochures.html, Zugriff: 29. Juni 2009, 16:34 MEZ
- Q 139 PULS, THOMAS: Alternative Antriebe und Kraftstoffe. Deutscher Institutsverlag, Köln, 2006, S.39
- Q 140 ÖAMTC:
<http://www.oeamtc.at/netautor/pages/resshp/anwendg/1098021.html>, Zugriff: 2. Juli 2009, 18:31 MEZ
- Q 141 BBS-REDAKTION: LKWs mit Autogas. Internet:
http://www.bbs-redaktion.de/html/lkw_mit_autogas_vor_serienstar.html, Zugriff: 2. Juli 2009 18:26 MEZ
- Q 142 GEITMANN, SVEN: Alternative Kraftstoffe. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2008, S.91-117
- Q 143 DINGEL, OLIVER ET AL: Gasfahrzeuge II, Auf dem Weg aus der Nische. Expert-Verlag, Renningen, 2006, S.128ff.
- Q 144 Bildquelle: Internet:
http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Jamais_contente.jpg&filetimestamp=20061018082520, Zugriff: 22. Juli 2009, 13:45 MEZ
- Q 145 NAUNIN, DIETRICH ET AL: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2007, S. 1ff.
- Q 146 Bildquelle: Internet:
http://www.shop-in-mainz.net/images/gallery_images/381.jpg, Zugriff: 22. Juli 2009, 13:45 MEZ
- Q 147 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.51f.
- Q 148 NAUNIN, DIETRICH ET AL: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2007, S. 34ff.
- Q 149 NAUNIN, DIETRICH ET AL: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2007, S. 9
- Q 150 JOSSEN, A. UND WEYDANZ, W.: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. Ubooks Verlag, Neusäß, 2006, S.7
- Q 151 SCHUSTER, A.: Diplomarbeit: Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen. Wien, 2008, S.5f.

- Q 152 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.52f.
- Q 153 Bildquelle: Internet:
<http://www.restena.lu/ddnuc/Haus/zimmer/garage/bleiakku.htm>, Zugriff: 24. Juli 2009, 23:00 MEZ
- Q 154 NAUNIN, DIETRICH ET AL: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2007, S. 34-48
- Q 155 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.51-58
- Q 156 Bildquelle: Internet:
<http://www.hybridinterfaces.ca/assemblies.html>, Zugriff: 25. Juli 2009, 11:30 MEZ
- Q 157 SCHUSTER, A.: Diplomarbeit: Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen. Wien, 2008, S.11-15
- Q 158 SCHUSTER, A.: Diplomarbeit: Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen. Wien, 2008, S.23ff.
- Q 159 Bildquelle: Internet:
<http://www.zeva.com.au/tech/zebra.jpg>, Zugriff: 25. Juli 2009, 17:00 MEZ
- Q 160 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.57
- Q 161 SCHUSTER, A.: Diplomarbeit: Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen. Wien, 2008, S.21-23
- Q 162 WAIDHAS, M: Grundlegende Technologie von Doppelschichtkondensatoren. Internet:
http://www.zvei-be.org/veranstaltungen/ultracaps/Waidhas_Siemens.pdf, Zugriff: 25. Juli 2009, 19:00 MEZ
- Q 163 VDI, Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Berichte 1565: Innovative Fahrzeugantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000, S. 731ff.
- Q 164 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.42ff.
- Q 165 VDI, Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Berichte 1459: Hybridantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, S. 42f.
- Q 166 NAUNIN, DIETRICH ET AL: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2007, S. 20ff.
- Q 167 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.43
- Q 168 NAUNIN, DIETRICH ET AL: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2007, S. 24ff.
- Q 169 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.47ff.
- Q 170 MOTORLEXIKON: Internet:
<http://www.motorlexikon.de/?I=9534>, Zugriff: 26. Juli 2009, 21:00 MEZ
- Q 171 Bildquelle: Internet:
<http://www.atzonline.de/Aktuell/Nachrichten/1/8116/Voith-stellt-zwei-Hybridssysteme-auf-der-IAA-Nutzfahrzeuge-vor.html>, Zugriff: 26. Juli 2009, 21:00 MEZ

- Q 172 Bildquelle: Internet:
<http://www.motorlexikon.de/?I=9535>, Zugriff: 26. Juli 2009, 21:00 MEZ
- Q 173 MOTORLEXIKON: Internet:
<http://www.motorlexikon.de/?I=9535>, Zugriff: 26. Juli 2009, 21:00 MEZ
- Q 174 GRÖTER, H.-P.: Weiterentwicklung bei Hybridantrieben. In: Hybrid- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Energiemanagement-Aufgaben und Strukturen. DGS ,Ingolstadt, 2005
- Q 175 MOTORLEXIKON: Internet:
<http://www.motorlexikon.de/?I=9495>, Zugriff: 26. Juli 2009, 23:00 MEZ
- Q 176 Bildquelle: Internet:
<http://www2.eti.uni-karlsruhe.de/wolfju/Elbtalwerk.htm>, Zugriff: 26. Juli 2009, 23:30 MEZ
- Q 177 NAUNIN, DIETRICH ET AL: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. 4. Auflage, Expert-Verlag, Renningen, 2007, S. 26f.
- Q 178 DE DONKER, R.W. ET AL: Elektrische Antriebe und deren Steuerungen zur Traktion von Elektro- und Hybridfahrzeugen. DGES-Fachtagung Mai 2003 Aachen, Berlin, 2003
- Q 179 SAUBERE AUTOS: Internet:
http://www.saubereautos.at/transport/strom/elektrokleinlaster_ecocarrier_wird_von_vw_sara_jevo/, Zugriff: 27. Juli 2009, 16:20 MEZ
- Q 180 ECOCRAFT AUTOMOTIVE: Internet:
<http://www.ecocraft-automotive.de/>, Zugriff: 27. Juli 2009, 16:30 MEZ
- Q 181 BALQON CORPORATION: Internet:
http://www.balqon.com/product_details.php?pid=2, Zugriff: 27. Juli 2009, 20:00 MEZ
- Q 182 PORT OF LOS ANGELES: Internet:
<http://www.portoflosangeles.org/>, Zugriff: 27. Juli 2009, 20:00 MEZ
- Q 183 ETG – ENERGIE TECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE: ETG Fachbericht 114 - EMA 2008 Elektromobilausstellung. VDE-Verlag, Berlin, 2008, S. 100
- Q 184 VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hg.): VDI-Berichte 1459: Hybridantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, S. 53
- Q 185 Bildquelle: Internet:
<http://www.hybrid-autos.info/technik/hybrid-varianten/parallel-hybrid-technische-beschreibung.html>, Zugriff: 28. Juli 2009, 17:00 MEZ
- Q 186 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.76f.
- Q 187 VDI, Verein Deutscher Ingenieure (Hg.): VDI-Berichte 1459: Hybridantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, S. 49-56
- Q 188 HYBRID-AUTOS.INFO:
<http://www.hybrid-autos.info/technik/hybrid-varianten/seriell-hybrid-technische-beschreibung.html>, Zugriff: 29. Juli 2009, 11:00 MEZ
- Q 189 Bildquelle: Internet:
<http://www.hybrid-autos.info/technik/hybrid-varianten/seriell-hybrid-technische-beschreibung.html>, Zugriff: 29. Juli 2009, 11:00 MEZ
- Q 190 ETG – ENERGIE TECHNISCHE GESELLSCHAFT IM VDE: ETG Fachbericht 114 - EMA 2008 Elektromobilausstellung. VDE-Verlag, Berlin, 2008, S. 102
- Q 191 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.73ff.

- Q 192 HYBRID-AUTOS.INFO:
<http://www.hybrid-autos.info/technik/hybrid-varianten/seriell-hybrid-technische-beschreibung.html>, Zugriff: 29. Juli 2009, 11:30 MEZ
- Q 193 VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hg.): VDI-Berichte 1565: Innovative Fahrzeugantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000, S. 675f.
- Q 194 GERL, BERNHARD: Innovative Automobilantriebe. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002, S.77f.
- Q 195 VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hg.): VDI-Berichte 1565: Innovative Fahrzeugantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000, S. 678
- Q 196 KERLE, HANFRIED ET AL.: Einführung in die Getriebelehre. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007
- Q 197 GESELLSCHAFT ENTWICKLUNG, KONSTRUKTION, VERTRIEB: Planetengetriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988
- Q 198 VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hg.): VDI-Berichte 1459: Hybridantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999, S. 59ff.
- Q 199 Bildquelle: Internet:
http://www.bayerisches-energie-forum.de/portal/bef_news_detail,1790,756,12669,detail.html, Zugriff: 15. August 2009, 00:30 MEZ
- Q 200 KERSCHL, S. ET AL: Effizienter Hybridantrieb mit Ultracaps für Stadtbusse. In: 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. 2005
- Q 201 KERSCHL, S. ET AL: Effizienter Hybridantrieb mit Ultracaps für Stadtbusse. In: 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. 2005, S.3
- Q 202 VDI, VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hg.): VDI-Berichte 1704: Innovative Fahrzeugantriebe. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002, S. 285ff.
- Q 203 KERSCHL, S.: Hybridbusse mit Ultracap-Technologie. In: VÖV Fachtagung „Technik und Betrieb Bus“. 2004, S.14
- Q 204 HANDELSBLATT:
http://www.handelsblatt.com/technologie/energie_technik/neuer-antrieb-fuer-lkw-hersteller,1291617, Zugriff: 31. Juli 2009, 11:00 Uhr MEZ
- Q 205 WATTGEHTAB ELECTRIC MOBILITY NEWS:
<http://www.wattgehtab.com/index.php/content/view/1362/25/>, Zugriff: 31. Juli 2009, 11:00 Uhr MEZ
- Q 206 Bildquelle: Internet:
<http://www.greencarsite.co.uk/GREENNEWS/nissan-hybrid-cng-atlas.htm>, Zugriff: 31. Juli 2009, 13:00 Uhr MEZ
- Q 207 ISUZU MOTORS LTD.:
<http://www.isuzu.co.jp/world/technology/randd/project6/>, Zugriff: 31. Juli 2009, 14:00 MEZ
- Q 208 Bildquelle: ISUZU MOTORS LTD.:
<http://www.isuzu.co.jp/world/technology/randd/project6/01.html>, Zugriff: 31. Juli 2009, 13:30 Uhr MEZ
- Q 209 Bildquelle: ISUZU MOTORS LTD.:
<http://www.isuzu.co.jp/world/technology/randd/project6/03.html>, Zugriff: 31. Juli 2009, 13:30 Uhr MEZ

- Q 210 Bildquelle: ISUZU MOTORS LTD.:
<http://www.isuzu.co.jp/world/technology/randd/project6/04.html>, Zugriff: 31. Juli 2009, 13:30 Uhr MEZ
- Q 211 NISSAN MOTOR CO, LTD:
http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2006/_STORY/060517-01-e.html, Zugriff: 31. Juli 2009, 14:00 MEZ
- Q 212 NISSAN MOTOR CO, LTD:
http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2007/_STORY/070130-01-e.html, Zugriff: 31. Juli 2009, 14:00 MEZ
- Q 213 PROGRANS AG: Transportmarktbarometer. Basel, 2008, Internet:
<ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/transportmarktbarometer/transportmarktbarometer42008.pdf>,
Zugriff: 16. August 2009, 02:30 MEZ
- Q 214 VCÖ, VERKEHRSClub ÖSTERREICH (Hg.): Verkehr 2020 – Ziele und Entwicklungen. LVDM, Wien, 2008, S. 39
- Q 215 GRÜNWALD, R.: Perspektiven eines CO₂- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick, Forschungszentrum Karlsruhe, Berlin, 2006
- Q 216 TRAKTUELL: Internationale Transport Revue:
http://www.traktuell.at/videos/der-neue-d13-motor/85156/?_q=1,
Zugriff: 20. September 2009, 20:00 MEZ

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BaU	Business as Usual
BS	Betriebsstrategie
CH ₄	Methan
CNG	Compressed Natural Gas
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
E85	Treibstoffgemisch mit 85% Ethanolanteil
EEV	Enhanced Environmentally Vehicle
EM	Elektromotor
EU	Europäische Union
f.	folgende
FAME	Fatty Acid Methyl Ester
ff.	ferner folgende
FFV	Flexible Fuel Vehicle
ggü.	gegenüber
GRM	Geschaltete Reluktanz-Maschine
GWP	Global Warming Potential
hzGG	höchst zulässiges Gesamtgewicht
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
LKW	Lastkraftwagen
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
Nfzg.	Nutzfahrzeug
NGT	Natural Gas Technology
NO _x	Stickstoffoxide
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchron-Maschine
RME	Rapsölmethylester
SO _x	Schwefeloxide
SRM	Switched Reluctance Machine (engl. für GRM)
Tab.	Tabelle
THG	Treibhausgas
TJ	Terajoule
Tkm	Tonnenkilometer
VM	Verbrennungsmaschine
Wh	Wattstunden

Abbildungsverzeichnis

Abb.1.1:	Anteil der LKWs an den Emissionen im Straßenverkehr Österreichs; Quelle: [Q 1].....	11
Abb. 2.1:	Anteil von Straßen- und Schienengüterverkehr im direkten Vergleich; eigene Darstellung, Quelle: [Q 214]	15
Abb. 2.2:	Gesamter LKW-Bestand 1931 – 2008; eigene Darstellung, Quelle: [Q 17].....	21
Abb. 2.3:	LKW-Bestand im Jahr 2008 nach Gewichtsklassen; eigene Darstellung, Quelle: [Q 17]	22
Abb. 2.4:	Anteilmäßige Aufschlüsselung der LKW-Flotten des Fuhrgewerbes (links) und des Werkverkehrs (rechts) nach Nutzlastklassen, eigene Darstellung, Quelle: [Q 18].....	23
Abb. 2.5:	Güterverkehrsaufkommen im Jahr 2005 in Österreich aufgeschlüsselt nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 20].....	24
Abb. 2.6:	Transportleistung im Jahr 2005 in Österreich, aufgeschlüsselt nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 21]	25
Abb. 2.7:	Aufschlüsselung der Transportleistung der Verkehrsarten nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 21]	26
Abb. 2.8:	Anteil des Werkverkehrs an der im jeweiligen Land erbrachten Transportleistung des Jahres 2006 in einigen EU-Staaten; eigene Darstellung, Quelle: [Q 22].....	27
Abb. 2.9:	Transportaufkommen von Schiene und Straße aufgeteilt nach Entfernungsstufen in Österreich im Jahr 2006; eigene Darstellung, Quelle: [Q 22]	28
Abb. 2.10:	Durchschnittliche Transportweiten der Verkehrsarten im Jahr 1994; eigene Darstellung, Quelle: [Q 23]	29
Abb. 2.11:	Anteil des Fuhrgewerbes am Transportaufkommen aufgeschlüsselt nach Entfernungsstufen; eigene Darstellung, Quelle: [Q 22].....	30
Abb. 2.12:	Treibhausgasemissionen Österreichs von 1990 – 2003, Kyoto-Ziel 2008 – 2012; Quelle: [Q 25]	31
Abb. 2.13:	Anteile der Verursacher an den Treibhausgasen in Österreich im Jahr 2003; eigene Darstellung, Quelle: [Q 27]	33
Abb. 2.14:	Veränderung der THG-Emissionen von 1990 - 2003 nach Verbrauchersektoren; Quelle: [Q 28]	34
Abb. 3.1:	Rudolf Diesel.....	39
Abb. 3.2:	Drehmoment- Drehzahl-Kurve bzw. Leistung-Drehzahl-Kurve eines Dieselmotors (links) und eines Benzinmotors (rechts); Quelle: [Q 36].....	39
Abb. 3.3:	Dieselmotor-Arbeitsweise nach dem 4-Takt-Verfahren; Quelle: [Q 37]	40
Abb. 3.4:	Prinzipskizze eines Dieselmotors mit Benennung der Komponenten; Quelle: [Q 39]	41
Abb. 3.5:	Pleuelstange samt Kolben, Quelle: [Q 40]	42
Abb. 3.6:	Kurbelwelle; Quelle: [Q 40].....	43
Abb. 3.7:	Kurbelgehäuse; Quelle [Q 39]	43
Abb. 3.8:	(1) Lüfter, (2) Wasserpumpe und Lichtmaschine, (3) Kältekompressor; Quelle: [Q 40].....	44
Abb. 3.9:	Komponenten eines Dieselmotors; Quelle: [Q 41]	45

Abb. 3.10: Verschiedene Motorbauarten; Quelle: [Q 42]	45
Abb. 3.11: Schadstoffemissionen über die Luftüberschusszahl Lambda; Quelle: [Q 48]	48
Abb. 3.12: Windleitkörper; Quelle: [Q 55]	51
Abb. 4.1: Rapspflanze; Quelle: [Q 62]	55
Abb. 4.2: (links): Zuckerrübe; Quelle: [Q 79]	
Abb. 4.3: (rechts): Zuckerrohrplantage; Quelle: [Q 80]	61
Abb. 4.4: Schema der Verarbeitung von Zuckerrüben zu Ethanol; Quelle: [Q 82]	62
Abb. 4.5: Ethanolbetriebener LKW: Scania P270; Quelle: [Q 99]	68
Abb. 4.6: Aufbau des Methanmoleküls; Quelle: [Q 105]	71
Abb. 4.7: Volumen und Gewicht unterschiedlicher Kraftstoffe bezogen auf 55 Liter Benzinäquivalent; eigene Darstellung, Quelle: [Q 106]	72
Abb. 4.8: Prinzip der Gasinjektion in einen Verbrennungsmotor; Quelle: [Q 110]	74
Abb. 4.9: CNG-Tankstellennetz in Österreich, Stand: Juni 2009; Quelle: [Q 117]	75
Abb. 4.10: CNG-Fast-Fill-Tankanlage an einer öffentlichen Tankstelle; Quelle: [Q 120]	76
Abb. 4.11: CNG- und Benzin-Tank-Einlässe am Fahrzeug; Quelle: [Q 122]	77
Abb. 4.12: CNG-Slow-Fill-Tankanlage; Quelle: [Q 123]	78
Abb. 4.13: Mercedes Sprinter 316 NGT; Quelle: [Q 129]	81
Abb. 4.14: Unterflur-Anbringung der Druckgasflaschen; Quelle: [Q 131]	83
Abb. 4.15: Mercedes Econic NGT im Einsatz als Müllsammelfahrzeug; Quelle: [Q 133]	84
Abb. 4.16: Mercedes Econic NGT im Einsatz als Sattelzugmaschine; Quelle: [Q 134]	84
Abb. 4.17: Anbringung der CNG-Druckflaschen am Fahrwerk; Quelle: [Q 136]	85
Abb. 5.1: Der Belgier Camille in dem Elektro-Gefährt, mit dem er 1899 einen Geschwindigkeitsrekord aufstellte; Quelle: [Q 144]	90
Abb. 5.2: Elektrischer Feuerwehrmannschaftswagen der Mainzer Feuerwehr in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts; Quelle: [Q 146]	91
Abb. 5.3: Schema der elektrochemischen Energiespeicherung; Quelle: [Q 148]	94
Abb. 5.4: Schema einer elektrochemischen Zelle; Quelle: [Q 150]	94
Abb. 5.5: Schema einer Bleibatterie-Zelle, Quelle: [Q 153]	95
Abb. 5.6: NiMH-Batterie, 6 Zellen in Serie; Quelle: [Q 156]	97
Abb. 5.7: Prinzip der Interkalation bei Li-Ion-Zellen; Quelle: [Q 158]	98
Abb. 5.8: ZEBRA-Batterie, Quelle: [Q 159]	99
Abb. 5.9: Aufbau einer Natrium-Nickelchlorid-Batterie; Quelle: [Q 160]	100
Abb. 5.10: Prinzip der elektrochemischen Doppelschicht; Quelle: [Q 162]	101
Abb. 5.11: Aufgewickelte Doppelschicht, Beschreibung: siehe Text; Quelle: [Q 162]	102
Abb. 5.12: Zusammengeschaltete Ultracaps; Quelle: [Q 162]	102
Abb. 5.13: links: Drehmoment-Drehzahlkennlinie einer Asynchronmaschine; rechts: Leistung-Drehzahl-Kennlinie einer Asynchronmaschine; Quelle: [Q 167]	104
Abb. 5.14 (links): Schema einer Asynchronmaschine; Quelle: [Q 172]	105

Abb. 5.15	(rechts): Asynchronmaschine (Fa. Voith), verwendet in Hybrid-Bussen; Quelle: [Q 171].	105
Abb. 5.16:	Prinzip einer Permanenterregten Synchronmaschine; Quelle: [Q 169]	106
Abb. 5.17	(links): Prinzip der geschalteten Reluktanzmaschine; Quelle: [Q 175]	107
Abb. 5.18	(rechts): Typische SRM, rechts davon ein ausgebauter Rotor; Quelle: [Q 176].....	107
Abb. 5.19:	Bereiche optimaler Wirkungsgrade der einzelnen Elektromotortypen in der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie; Quelle: [Q 177].....	108
Abb. 5.20:	EcoCarrier EL der Firma EcoCraft Automotive; Quelle: [Q 180].....	109
Abb. 5.21	Short-Haul Heavy-Duty Electric Truck Nautilus E-30 am Port of LA; Quelle: [Q 182].....	110
Abb. 5.22:	Mögliche Strukturvarianten von Hybridfahrzeugen; Quelle: [Q 184]	113
Abb. 5.23:	Schema eines parallelen Hybridfahrzeugs; Quelle: [Q 185]	114
Abb. 5.24:	Schema eines seriellen Hybridfahrzeugs; Quelle: [Q 189]	115
Abb. 5.25:	Prinzip der Phlegmatisierung, ermöglicht Downsizing; Quelle: [Q 190]	116
Abb. 5.26:	Einfache Betriebsstrategie eines Parallel-Hybrids; Quelle: [Q 198]	119
Abb. 5.27:	MAN Ultracap-Bus im Linienbetrieb; Quelle: [Q 199]	120
Abb. 5.28:	Prinzip des Ultracap-Bus; Quelle: [Q 201]	121
Abb. 5.29:	Geschwindigkeit (oben), Speicherleistung (Mitte) und Speicherladung (unten) des Ultracap-Busses bzw. der Ultracap-Energiespeicher im Linienbetrieb; Quelle: [Q 203]	122
Abb. 5.30:	Nissan Atlas Hybrid; Quelle: [Q 206]	123
Abb. 5.31:	Anbringung der Hybridkomponenten im Fahrwerk des Atlas Hybrid; Quelle: [Q 208]...	124
Abb. 5.32:	Betriebsmodi des Atlas Hybrid; Quelle: [Q 209]	124
Abb. 5.33:	Kraftstoffverbrauch des Atlas Hybrid im Vergleich zur Diesel-Version; Quelle: [Q 210] .	125
Abb. 6.1:	Ergebnisse der Berechnung für Szenario 1	139
Abb. 6.2:	Ergebnisse der Berechnung für Szenario 2:	142
Abb. 6.3:	Ergebnisse der Berechnung für Szenario 3:	146
Abb. 6.4:	Vergleich der drei Szenarien-Hochrechnungsergebnisse; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung.....	148
Abb. 6.5:	Vergleich der Szenarienhochrechnungen inkl. Differenzen; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung.....	148
Abb. 6.6:	Effekte alternativer Antriebe und Kraftstoffe; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung.....	152
Abb. 6.7:	Einstellparameter der einzelnen Szenarien zum Zwecke der Berechnung der Effekte des Anstiegs der Nfzg.-Zahl; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung.....	153
Abb. 6.8:	Effekte unterschiedlich steigender Nfzg.-Zahlen; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung.....	154
Abb. 6.9:	Effekte unterschiedlicher Effizienzsteigerungen; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung.....	156
Abb. 6.10:	THG-Einsparungen der „realistischen Szenarios“ ggü. dem BaU-Szenario bis 2020; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung.....	157
Abb. 7.1:	Ökonomische und Ökologische Gegenüberstellung alternativer Antriebsysteme; Quelle: eigene Recherche, eigene Darstellung.....	162

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Anzahl der LKWs aufgeschlüsselt nach Antriebsart; eigene Darstellung, Quelle: [Q 17] ...	22
Tab. 2.2:	Transportaufkommen 1999 und 2005 und Entwicklung, aufgeschlüsselt nach Transportmittel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 20].....	25
Tab. 2.3:	Transportleistung 1999 und 2005 und Entwicklung, aufgeschlüsselt nach Transportmittel und Verkehrsart; eigene Darstellung, Quelle: [Q 21].....	26
Tab. 3.1:	Wichtigkeit der Auslegungskriterien nach Nutzfahrzeugklassen, eigene Darstellung, Quelle: [Q 32]	37
Tab. 3.2:	Kennwerte von Dieselmotoren; eigene Darstellung, Quellen: [Q 46], [Q 45]	46
Tab. 3.3:	EU-Emissionsgrenzwerte seit 1990 in g/kWh, Quelle: [Q 50].....	49
Tab. 3.4:	Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte seit der EURO-0-Norm im Jahr 1990 in Prozent, Quelle: [Q 50]	49
Tab. 4.1:	Kennwerte von Rapsöl und RME im Vergleich zu Diesel; eigene Darstellung, Quelle: [Q 63]	56
Tab. 4.2:	Wirtschaftlichkeit von Biodiesel in LKWs; eigene Darstellung; Quelle: [Q 75].....	59
Tab. 4.3:	Ethanol-Erträge und erforderliche Biomasse der einzelnen heimischen Ausgangsrohstoffe; Quelle: [Q 85]	63
Tab. 4.4:	Kennwerte von Ethanol im Vergleich zu Diesel und Benzin; eigene Darstellung, Quellen: [Q 88], [Q 85]	63
Tab. 4.5:	Primärenergieaufwand bei der Nutzung und Bereitstellung von Ethanol, je nach verwendeten Energieträgern, im Vergleich zu Benzin; Quelle: [Q 90]	65
Tab. 4.6:	Kennwerte von Erdgas im Vergleich zu Diesel und Benzin; eigene Darstellung, Quelle: [Q 103]	71
Tab. 4.7:	Schadstoffminderungen von CNG im Vergleich zu Benzin; eigene Darstellung, Quelle: [Q 125]	80
Tab. 4.8:	Technische Daten des Mercedes Sprinter in den CNG-Varianten 316 NGT monovalent, 316 NGT bivalent und der benzinbetriebenen Ausführung 316; eigene Darstellung; Quelle: [Q 130]	82
Tab. 4.9:	Vergleich der Kraftstoffkosten je 100km für die verschiedenen Kraftstoffe des Mercedes Sprinter 316; Quelle: eigene Berechnung	83
Tab. 4.10:	Berechnung der Amortisationsdauer eines Econic NGT im Vergleich zur Diesel-Version; eigene Berechnung, Datenquelle: [Q 138]	86
Tab. 5.1:	Batterie-Kennwerte, die nach USABC für einen wirtschaftlichen Erfolg der Batterietechnologie notwendig sind; eigene Darstellung, Quelle: [Q 149].....	93
Tab. 5.2:	Kennwerte der Bleibatterie; eigene Darstellung, Quellen: [Q 154], [Q 155]	96
Tab. 5.3:	Kennwerte der NiMH-Batterie; eigene Darstellung, Quellen: [Q 154], [Q 155].....	97
Tab. 5.4:	Kennwerte der Li-Ionen-Batterie; eigene Darstellung, Quellen: [Q 154], [Q 155]	99

Tab. 5.5:	Kennwerte einer Natrium-Nickelchlorid-Batterie; eigene Darstellung, Quellen: [Q 154],[Q 155]	101
Tab. 5.6:	Kennwerte von Ultracaps; eigene Darstellung, Quelle: [Q 153]	103
Tab. 5.7:	Berechnung der Amortisationsdauer eines Atlas Hybrid im Vergleich zur Diesel-Version; eigene Berechnung, Datenquelle: [Q 207]	125
Tab. 6.1:	Übersicht über die Einstellparameter zur Berechnung der einzelnen Emissionshochrechnungen; Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung.....	133
Tab. 6.2:	Auszug aus dem Excelprogramm mit den einzustellenden Parametern, Szenario 1; Quelle: eigene Berechnung.....	137
Tab. 6.3:	Einstellparameter für die Berechnung des Business-as-Usual-Szenarios; Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung.....	138
Tab. 6.4:	Auszug aus dem Excelprogramm mit den einzustellenden Parametern, Szenario 2; Quelle: eigene Berechnung.....	141
Tab. 6.5:	Einstellparameter für die Berechnung des „ökologischen Szenarios“; Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung.....	141
Tab. 6.6:	Auszug aus dem Excelprogramm mit den einzustellenden Parametern, Szenario 3; Quelle: eigene Berechnung.....	144
Tab. 6.7:	Einstellparameter für die Berechnung des „realistischen Szenarios“; Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung.....	145
Tab. 6.8:	Übersicht über alle Einstellparameter der einzelnen Szenarien; Quelle: eigene Darstellung, eigene Berechnung.....	147
Tab. 6.9:	Einstellparameter der einzelnen Szenarien zum Zwecke der Berechnung der Effekte alternativer Antriebe und Kraftstoffe; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung ...	151
Tab. 6.10:	Einstellparameter der einzelnen Szenarien zum Zwecke der Berechnung der Effekte konv. Effizienzsteigerungen; Quelle: eigene Berechnung, eigene Darstellung	155

Anhang

Szenario 1: Business as Usual

	Einheit	Konv. Nutzfahrzeug		Hybrid*		CNG*		alternative flüssige KS*	
		<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t
CO2 Einsparungen bis 2020	%	5,00%	5,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Emissionen Vergleich zu (2008,konv)	%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%	95,00%
Marktdurchdringung 2008	%	100,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Marktdurchdringung 2020	%	100,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Anzahl Fahrzeuge 2008	1	307.287	55.703	0	0	0	0	0	0
Anzahl Fahrzeuge 2020	1	372.644	67.551	0	0	0	0	0	0
Emissionen ges. 2008	t CO2 Äqu.	3.174.161	4.027.739						
		7.201.900		0		0		0	
Emissionen pro Fahrzeug 2008	t CO2 Äqu.	10,33	72,31						
Emissionen ges. 2020	t CO2 Äqu.	3.656.813	4.640.184	0		0		0	
		8.296.998		0		0		0	
Emissionen pro Fahrzeug 2020	t CO2 Äqu.	9,81	68,69	9,81	68,69	9,81	68,69	9,81	68,69
durchschnittl. Emissionen pro Fzg 2008	t CO2 Äqu.	19,840491							
durchschnittl. Emissionen pro Fzg 2020	t CO2 Äqu.	18,848466							

	Einheit	2008	2020
CO2-Äquivalente gesamt	t CO2 Äqu.	7.201.900	8.296.998

Anhang 1: Fahrzeugzahlen und Emissionen nach Szenario 1, aufgeschlüsselt nach Antriebsart; Quelle: selbst erstelltes Excel-Programm

Szenario 2: Ökologisches Szenario

	Einheit	Konv. Nutzfahrzeug		Hybrid*		CNG*		alternative flüssige KS*	
		<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t
CO2 Einsparungen bis 2020	%	12,00%	12,00%	20,00%	5,00%	25,00%	25,00%	5,00%	5,00%
Emissionen Vergleich zu (2008,konv)	%	88,00%	88,00%	68,00%	83,00%	63,00%	63,00%	83,00%	83,00%
Marktdurchdringung 2008	%	100,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Marktdurchdringung 2020	%	50,00%	87,50%	25,00%	5,00%	20,00%	5,00%	5,00%	2,50%
Anzahl Fahrzeuge 2008	1	307.287	55.703	0	0	0	0	0	0
Anzahl Fahrzeuge 2020	1	153.644	48.740	76.822	2.785	61.457	2.785	15.364	1.393
Emissionen ges. 2008	t CO2 Äqu.	3.174.161	4.027.739						
		7.201.900		0		0		0	
Emissionen pro Fahrzeug 2008	t CO2 Äqu.	10,33	72,31						
Emissionen ges. 2020	t CO2 Äqu.	1.396.631	3.101.359	539.607	167.151	399.944	126.874	131.728	83.576
		4.497.990		706.758		526.818		215.303	
Emissionen pro Fahrzeug 2020	t CO2 Äqu.	9,09	63,63	7,02	60,02	6,51	45,55	8,57	60,02
durchschnittl. Emissionen pro Fzg 2008	t CO2 Äqu.	19,840491							
durchschnittl. Emissionen pro Fzg 2020	t CO2 Äqu.	16,383012							

	Einheit	2008	2020
CO2-Äquivalente gesamt	t CO2 Äqu.	7.201.900	5.946.870

Anhang 2: Fahrzeugzahlen und Emissionen nach Szenario 2, aufgeschlüsselt nach Antriebsart; Quelle: selbst erstelltes Excel-Programm

Szenario 3: Versuch einer realistischen Abschätzung

	Einheit	Konv. Nutzfahrzeug		Hybrid*		CNG*		alternative flüssige KS*	
		<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t	<3,5t	>3,5t
CO2 Einsparungen bis 2020	%	9,50%	9,50%	15,00%	3,00%	20,00%	20,00%	2,00%	3,00%
Emissionen Vergleich zu (2008,konv)	%	90,50%	90,50%	75,50%	87,50%	70,50%	70,50%	88,50%	87,50%
Marktdurchdringung 2008	%	100,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Marktdurchdringung 2020	%	74,50%	94,00%	12,50%	2,00%	10,00%	2,00%	3,00%	2,00%
Anzahl Fahrzeuge 2008	1	307.287	55.703	0	0	0	0	0	0
Anzahl Fahrzeuge 2020	1	267.309	61.139	44.851	1.301	35.880	1.301	10.764	1.301
Emissionen ges. 2008	t CO2 Äqu.	3.174.161	4.027.739						
		7.201.900		0		0		0	
Emissionen pro Fahrzeug 2008	t CO2 Äqu.	10,33	72,31						
Emissionen ges. 2020	t CO2 Äqu.	2.498.890	4.000.839	349.783	82.302	261.295	66.312	98.403	82.302
		6.499.729		432.086		327.607		180.705	
Emissionen pro Fahrzeug 2020	t CO2 Äqu.	9,35	65,44	7,80	63,27	7,28	50,98	9,14	63,27
durchschnittl. Emissionen pro Fzg 2008	t CO2 Äqu.	19,840491							
durchschnittl. Emissionen pro Fzg 2020	t CO2 Äqu.	17,553849							

	Einheit	2008	2020
CO2-Äquivalente gesamt	t CO2 Äqu.	7.201.900	7.440.127

Anhang 3: Fahrzeugzahlen und Emissionen nach Szenario 4, aufgeschlüsselt nach Antriebsart; Quelle: selbst erstelltes Excel-Programm